

4.

Maître de
Forges

Tom I

1910

287740 / 72445

Ne pas plier.

En cas d'absence du destinataire, retour aux
de Constructions Electriques de Jeumont (Nord), à

BMICSA

CYCLOPÉDIE-RORET

RE DE FORGES

TOME PREMIER

EN VENTE A LA MÊME LIBRAIRIE

Manuel du Fondeur, traitant de la Fonderie du fer, de l'acier, du cuivre, du bronze et du laiton, de la fonte des statues, des cloches, etc., par A. GILLOT et L. LOCKERT, ingénieurs. Nouvelle édition revue, corrigée et augmentée par N. CHRYSOCHOÏDÈS, ingénieur des Arts et Manufactures. 2 vol. ornés de 253 figures dans le texte. 8 fr.

— **Charpentier**, ou Traité complet et simplifié de cet Art, traitant de la Charpente en bois et en fer et de la Manipulation des diverses pièces de Charpente, par HANUS, BISTON, BOUTEREAU et GAUCHÉ. Nouvelle édition refondue, corrigée et augmentée de la *Série des Prix*, par N. CHRYSOCHOÏDÈS. 2 vol. ornés de 94 fig. dans le texte et accompagnés d'un Atlas de 22 pl. 8 fr.

— **Charron-Forgeron**, traitant de l'Atelier, de l'Outilsillage, des Matériaux mis en œuvre par le Charron, du Travail de la forge, de la Construction du gros et du petit matériel, etc., par G. MARIN-DARBEL. 1 vol. orné de nombreuses figures et accompagné de planches. 3 fr. 50

— **Automobiles** (De la construction et du montage des), contenant l'histoire, l'étude détaillée des pièces constituant les automobiles, la construction des voitures à pétrole, à vapeur et électriques, les renseignements sur leur montage et leur conduite, par N. CHRYSOCHOÏDÈS, ingénieur des Arts et Manufactures, professeur à la Fédération générale française des Chauffeurs, Mécaniciens, Electriciens. 2 vol. ornés de 340 fig. dans le texte. 8 fr.

— **Cubage des Bois** en grume ou écorcés au $\frac{1}{4}$ et au $\frac{1}{5}$ réduits, de 1^m à 10^m 90 de longueur inclus, et de 5^m 40 à 4^m de circonférence inclus; donnant tous les cubes par fraction de 0^m 10 en 0^m 10 pour la longueur et de 0^m 05 en 0^m 05 pour la circonférence, et permettant d'obtenir les cubes de toutes longueurs, par G. HAUBEERT, ancien marchand de bois à Vendôme. 1 vol. 1 fr. 25

— **Gaz** (Eclairage et Chauffage au), ou Traité élémentaire et pratique destiné aux Ingénieurs, aux Directeurs et aux Contre-Maitres d'Usines à Gaz, mis à la portée de tout le monde, suivi d'un *Aide-Mémoire de l'Ingénieur-Gazier*, par D. MAGNIER, ingénieur-gazier. Nouvelle édition corrigée, augmentée et entièrement refondue, par E. BANCELIN, ancien élève de l'Ecole polytechnique, ancien sous-régisseur d'usine de la C^{ie} Parisienne du Gaz. 2 vol. ornés de 322 figures dans le texte. 8 fr.

On a extrait de ce Manuel l'ouvrage suivant :

AIDE-MÉMOIRE DE L'INGÉNIEUR-GAZIER, contenant les Notions et les Formules nécessaires aux personnes qui s'occupent de la Fabrication et de l'Emploi du Gaz. Brochure in-18, 0 fr. 75

MANUELS - RORET

NOUVEAU MANUEL COMPLET

DU

MAITRE DE FORGES

TRAITANT

Des Minerais de Fer ; des Machines soufflantes
et des Appareils à chauffer l'Air ; des Combustibles
et Fondants ; des Fours et Hauts Fourneaux ;
de l'Acier Bessemer et Martin ; des Convertisseurs ;
des Laminoirs et des différents Appareils
employés pour le travail du Fer et de l'Acier.

NOUVELLE ÉDITION

PAR

N. CHRYSOCHOÏDÈS

Ingénieur des Arts et Manufactures

Ouvrage orné de 312 figures dans le texte

TOME PREMIER

PARIS

ENCYCLOPÉDIE-RORET

L. MULO, LIBRAIRE-ÉDITEUR

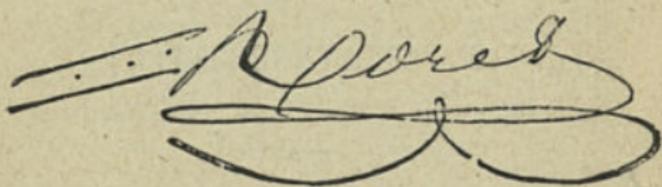
12, RUE HAUTEFEUILLE, VI^e

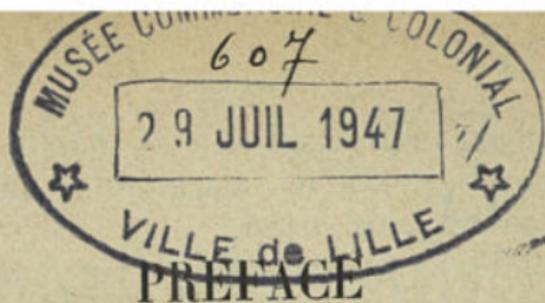
1910

703

AVIS

Le mérite des ouvrages de l'**Encyclopédie-Roret** leur a valu les honneurs de la traduction, de l'imitation et de la contrefaçon. Pour distinguer ce volume, il porte la signature de l'Éditeur, qui se réserve le droit de le faire traduire dans toutes les langues, et de poursuivre, en vertu des lois, décrets et traités internationaux, toutes contrefaçons et toutes traductions faites au mépris de ses droits.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Roret', with a large, decorative flourish underneath. The signature is written over a diagonal crease on the aged paper.



N-16
R-4

Depuis l'apparition de la dernière édition du *Manuel du Maître de Forges*, l'industrie du fer et de l'acier a fait des progrès énormes, ce qui a obligé l'éditeur de refaire complètement ce Manuel en suivant les nouvelles méthodes de fabrication introduites tant en France qu'à l'étranger.

Nous avons donc été chargé de cette lourde tâche et nous ne craignons pas d'être contredit, en affirmant que le *Nouveau Manuel du Maître de Forges* donne une idée aussi exacte que possible de l'état actuel de la fabrication du fer et de l'acier.

Nous avons divisé l'ouvrage en deux volumes ; le premier contient une classification générale des minerais de fer, le mode de leur extraction et de traitement. Dans un chapitre spécial nous avons indiqué les méthodes et les appareils employés tant en France qu'à l'étranger pour les

opérations de grillage. Dans le chapitre suivant nous avons traité les machines soufflantes et les appareils à air chaud.

L'étude des combustibles a fait l'objet d'un chapitre à part, comme d'ailleurs celle du calcul des lits de fusion.

Le second volume traite des hauts fourneaux et les convertisseurs, avec toutes les méthodes pour la fabrication du fer et de l'acier.

Des chapitres spéciaux ont été consacrés à la cémentation, à la trempe, au tréfilage et à certaines fabrications spéciales comme par exemple la fabrication des rails, etc.

L'exécution matérielle ne laisse rien à désirer, l'éditeur ayant fait tous les sacrifices nécessaires pour rendre ce manuel agréable à l'œil et facile à lire ; la correction du texte est aussi parfaite que possible.

C'est avec confiance que nous affrontons la critique du public ; et si quelques lacunes existent nous prions nos lecteurs de nous les signaler.

NOUVEAU MANUEL

COMMERCE

DU

MAITRE DE FORGES

TOME PREMIER

DES MATIÈRES PREMIÈRES

Avant d'aborder la question principale du sujet, c'est-à-dire la fabrication du fer et de ses dérivés, nous allons donner, d'une manière bien détaillée, les notions nécessaires sur les matières premières qui jouent un rôle important dans l'art du maître de forges et sur leur préparation préalable.

On donne le nom de *matières premières*, aux substances qui sont employées dans les fourneaux pour produire le fer, soit qu'on s'en serve à l'état où elles se trouvent dans la nature, soit qu'elles soient préalablement soumises à des opérations préparatoires. Ces matières sont de quatre sortes :

Les minerais ;

Les fondants ou flux ;

Les combustibles ;

L'air atmosphérique.

Maître de forges. — T. I.

1

On peut aussi y ajouter les matériaux réfractaires entrant dans la construction des fourneaux; nous donnerons également une description détaillée sur leur nature et sur leur origine.

CHAPITRE PREMIER

Des minerais de fer

SOMMAIRE. — I. Classification des minerais de fer. — II. Docimasia. — III. Exploitation des minerais. — IV. Préparation des minerais.

On désigne sous le nom de *minerai de fer*, les matières minérales dans lesquelles la quantité de fer combiné ou mélangé avec un certain nombre d'autres corps *est suffisante* pour permettre de les considérer ou de les employer comme matières premières de la sidérurgie.

Le fer n'existe pas dans la nature à l'état natif, c'est-à-dire à l'état de pureté absolue, à cause de sa grande affinité pour l'oxygène, avec lequel il est sans cesse en contact. Les rares échantillons qu'on rencontre sont dus à des accidents tels que l'éruption volcanique ou l'embrasement des houillères; le premier constitue en grande partie les *météorites*, c'est-à-dire des masses métalliques plus ou moins grosses, dont le fer pur forme toujours la matière principale; mais ce fer est presque toujours accompagné de quantités variables de nickel, de cobalt,

de chrome et de quelques autres corps. Il est à peu près certain que dans l'atmosphère humide des climats tempérés le fer natif se transforme en oxyde de fer hydraté.

Pour qu'une matière contenant du fer puisse être utilisée comme minerai, il faut d'abord qu'elle ne renferme pas d'éléments étroitement unis au fer ne pouvant pas en être séparés, ou capables de modifier tellement sa qualité qu'il ne puisse être d'aucun emploi ; il faut, en outre, que sa teneur en fer soit suffisante pour que le prix de revient du métal obtenu soit abordable par la consommation avec profit pour le producteur.

Cette condition de teneur minimum en fer dépend certainement des différentes conditions locales. On peut, en effet, se servir d'un minerai pauvre en fer quand son prix, y compris les frais de transport jusqu'à l'usine, est relativement bas, ou encore quand les frais de fabrication, tels que main-d'œuvre, dépense en combustible, etc., sont très réduits.

La nature des corps unis au fer est également à considérer ; si, par exemple, on a un minerai où domine l'eau et l'acide carbonique combiné, ou un corps fondant sans aucune addition, seule la chaleur peut suffire pour les éliminer ; mais dans le cas où il y a des corps qu'il faut scorifier, il faudra employer des agents auxiliaires qui sont les *fondants*, et beaucoup de corps en exigent de grandes quantités pour former une scorie fluide.

On emploie rarement des minerais contenant moins de 30 0/0 de fer ; certaines usines descendent cependant jusqu'à 25 0/0.

Lorsqu'on a à sa disposition plusieurs sortes de minerais dont les gangues sont de nature telle qu'en les combinant entre elles, on puisse obtenir un laitier assez fusible sans avoir recours à une addition de fondant, on trouve son avantage d'employer des minerais plus pauvres qui font pour ainsi dire fonction de fondants ferrugineux. De cette façon, on est arrivé à employer dans des mélanges certains calcaires contenant 15 0/0 de fer et même moins ; des produits secondaires d'opérations métallurgiques, dont les principaux sont traités comme de véritables minerais, ont été également employés dans certaines usines. Le véritable minerai de fer est composé d'oxyde de fer anhydre ou hydraté, rarement pur, le plus souvent mélangé intimement avec des terres. Son caractère tranché est d'être attirable à l'aimant, soit naturellement, soit après calcination au feu et réduction en poudre. Cette particularité le fait distinguer d'une foule d'autres minéraux avec lesquels il serait facile de le confondre, tels que les oxydes de manganèse, les sulfures de plomb, etc.

Un moyen bien simple pour distinguer en quelques instants les minerais de fer des substances que nous venons de citer consiste à pulvériser le minéral et jeter un peu de cette poudre dans de l'acide sulfurique étendu d'eau ; on filtre et on verse dans la liqueur filtrée un peu de cyanate de potasse. Presque aussitôt, la liqueur se colore, d'abord en vert sale, puis en bleu ; un précipité bleu se forme au fond du vase : c'est du *prussiate de fer* ou *bleu de Prusse*.

Soumis à la distillation, le minerai de fer perd

l'eau et les matières volatiles qu'il contient, se calcine, se boursoufle et devient plus léger. Le métal se dégage de son oxygène et passe à l'état de fer pur, encore engagé dans les terres qui l'accompagnent; il est fragile, facile à pulvériser, se coupe au couteau et se sépare aisément de ses gangues, après la pulvérisation, au moyen d'un barreau aimanté dans les essais de laboratoire, ou d'une machine électro-trieuse dans le travail industriel.

Les terres qui, avec l'oxyde de fer, formaient le minerai ne sont donc point à l'état de combinaison chimique, mais de mélange mécanique souvent très intime.

I. CLASSIFICATION DES MINERAIS DE FER

Une bonne classification des minerais de fer peut être établie facilement sous le triple point de vue chimique, minéralogique et industriel. Leur composition, leurs gisements, leur manière d'être, différent assez pour qu'on puisse leur assigner des caractères distinctifs auxquels il est difficile de se méprendre.

Malgré le grand nombre de variétés naturelles contenues dans les profondeurs de l'écorce de la terre, on peut ramener à quatre espèces tous les minerais de fer :

1° Le carbonate de fer, ou *fer carbonaté* ou *fer spathique*, dans lequel le métal est à l'état de protoxyde et qui est composé d'un atome de fer combiné avec un atome d'acide carbonique;

2° Le *fer oligiste* ou *peroxyde de fer*, composé de deux atomes de fer unis à trois atomes d'oxygène;

3° Le *fer oxydulé*, composé d'un atome de protoxyde uni à un atome de peroxyde de fer ;

4° Le *fer hydraté*, composé d'un atome de protoxyde uni à trois atomes d'eau.

Le fer lithoïde appartient aux terrains secondaires, à la formation houillère, et alterne ordinairement avec les couches de houille, sous forme de rognons arrondis ou aplatis, rangés eux-mêmes à côté les uns des autres et présentant des espèces de couches.

Le fer spathique, le fer oligiste et le fer oxydulé sont plus particulièrement en rognons dans les terrains anciens des étages inférieurs à la formation houillère.

Le fer hydraté forme des couches dans les terrains tertiaires ou secondaires supérieurs tels que le *lias* et l'*oolithe*. Il est parfois en dépôt limité sans gisement régulier, et en grains dans les terrains supérieurs à la craie.

Les fers carbonaté, oligiste et oxydulé, sont généralement anhydres, ou contiennent peu d'eau et seulement par accident

La condition d'existence des fers hydratés est la présence de l'eau, à l'état de mélange intime.

Enfin, un caractère distinctif de ces quatre espèces de minerais de fer est la façon suivant laquelle ils se laissent rayer par une pointe d'acier.

Le fer carbonaté donne une raie grise.

Le fer oligiste donne une raie rouge.

Le fer oxydulé donne une raie noire.

Et le fer hydraté donne une raie jaune.

A défaut de rayure la poussière donne les mêmes colorations,

Fer spathique carbonaté

Ce minéral est le résultat de la dissolution d'un composé de fer dans une eau chargée d'acide carbonique. C'est une des formes primitives que les minerais de fer ont prises au moment de leur formation.

Son caractère est d'être attirable à l'aimant après avoir été grillé ; il fait effervescence avec les acides à froid ; lorsqu'il est fraîchement extrait et qu'il n'a subi aucune altération il répond à la formule $Fe CO_3$ et contient 48 0/0 de fer ou 62 0/0 de protoxyde de fer ; mais dans le plus grand nombre de cas il est mélangé, en proportion plus ou moins grande, avec divers carbonates tels que ceux de manganèse, de chaux, de magnésie, avec lesquels il est isomorphe, sa teneur en fer en est naturellement diminuée.

Fraîchement abattu il est gris, gris-jaunâtre, gris-violacé et ressemble à certaine blende ou sulfure de zinc ; mais s'il est exposé quelque temps à l'air ou peu d'instant au feu, il passe au brun rougeâtre et au brun noir. Ce changement de couleur tient à ce que, dans le fer carbonaté, le métal est oxydé au minimum et est un véritable protoxyde qui, au contact de l'air, se suroxyde et passe à l'état de peroxyde avec la couleur propre à celui-ci. C'est à la même cause qu'il faut attribuer la propriété magnétique qu'il acquiert par la suroxydation au feu.

Le fer carbonaté est très pesant, fragile, à cassure anguleuse et à rayure blanche ; sa poussière est grise et un peu blanchâtre ; vue à la loupe,

elle présente un sel calcaire blanc ; il cristallise dans le système rhomboédrique.

On divise le fer carbonaté en deux classes qui se distinguent par la nature de leurs gisements :

1° Le *fer spathique*, appartenant aux terrains les plus anciens, où il constitue de puissants filons ou des amas étendus.

2° Le *fer lithoïde* ou *argileux*, qui se trouve dans les houillères et partout alternant avec des couches de charbon.

Fer spathique. — Le fer spathique est ordinairement lamelleux ; sa couleur est le blanc grisâtre, le gris jaunâtre, rarement le brun. La variété lamelleuse est très abondante et constitue un minéral précieux connu sous le nom de mine douce. On le trouve fréquemment associé à des pyrites, principalement à des pyrites de cuivre, à la galène, à la baryte sulfatée, à la calamine, etc., dont la présence influe sur le produit qu'on obtient.

Les phosphates s'y rencontrent rarement et pour cette raison on l'emploie de préférence pour la fabrication des fers et aciers que l'on veut exempts de phosphore.

Il est d'un emploi très commode dans les hauts fourneaux à cause de la grande facilité avec laquelle il se réduit, surtout s'il a subi un grillage préalable ; il contient, en outre, presque toujours un carbonate de manganèse en quantité assez importante et de ce fait il convient tout particulièrement à la fabrication des fontes manganésées comme les fontes spiegel, les fontes pour acier Bessemer, etc.

Ce minéral, à cause de l'absence du phosphore et

de sa grande teneur en manganèse, est souvent dénommé *minerai d'acier* et employé exclusivement à la fabrication de l'acier par les méthodes directes, ou des fontes destinées à être converties en acier.

Les principaux gisements de ce minerai se trouvent en Allemagne, au pays de Siégen, qui sont fameux depuis des siècles, et la quantité qu'on en tire encore aujourd'hui représente une fraction importante de la production totale de l'Allemagne. On le trouve abondamment en Thuringe, près de Saalfeld, à Osnabrück, en Saxe et dans le Hartz, près Stolberg.

L'Autriche et la Hongrie possèdent également des gisements très importants de ce minerai. L'Erzberg de Styrie possède des gisements de 150 mètres de puissance exploités depuis l'époque romaine et qui alimentent les hauts fourneaux de Styrie. En Carinthie près d'Hüttemberg, les gisements sont moins importants que les précédents mais ils rendent de bons services aux usines de cette région.

La Hongrie exploite des gisements importants de ce minerai qui alimentent les usines du pays et de la Haute-Silésie.

La France et l'Espagne possèdent des gisements moins importants, mais d'une certaine valeur ; tandis que l'Angleterre et les Etats-Unis d'Amérique en sont dépourvus.

Le tableau suivant donne la composition de quelques minerais de fer carbonaté spathique :

Éléments composant chaque échantillon	Minerais crus. Echantillons n ^{os}										Minerais grillés		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Fer	38.86	39.70	39.40	33.12	26.38	33.37	33.66	43.34	45.34	40.65			
Manganèse.	9.20	6.50	3.10	4.52	1.82	1.76	1.46	7.39	2.82	2.04			
Silice	0.22	8.00	3.52	3.57	1.40	10.55	16.78	14.69	12.33	16.11			
Alumine.	»	2.10	1.02	0.86	»	3.52	4.30	1.95	1.95	2.58			
Chaux.	0.70	0.50	4.68	8.92	15.90	0.77	traces	2.29	6.65	0.44			
Magnésie.	0.51	0.50	1.24	2.12	8.47	5.46	5.56	1.29	1.59	6.03			
Plomb.	»	»	»	»	»	»	»	0.03	»	»			
Cuivre.	0.03	0.10	»	»	»	0.01	0.05	0.09	»	0.02			
Soufre.	0.03	»	»	»	»	»	»	»	»	traces			
Phosphore.	traces	»	0.16	»	0.02	traces	traces	0.06	0.06	traces			
Acide car- bonique	»	»	»	»	»	»	»	7.12	8.75	»			
Eau	»	»	28.81	»	»	»	»	»	»	»			

Fer carbonaté lithoïde ou sphérosidérite argileuse. — Le fer carbonaté, lorsqu'il se trouve en grains ou en rognons, prend le nom de sphérosidérite ; il présente un aspect compact et grenu à cause de son mélange intime avec des éléments étrangers, principalement avec de l'argile. Sa couleur est gris foncé, sa cassure est terreuse et ténue ; il se trouve en masses informes ou en rognons aplatis, dont quelques-uns sont caverneux et sont tapissés de cristaux lenticulaires bruns. Sa poussière est grise lorsqu'il est pur et brune lorsqu'il commence à se décomposer.

Il arrive souvent que le minerai lithoïde soit jaune à sa surface quoique l'intérieur conserve sa couleur grise : c'est l'effet d'un commencement de décomposition. Le centre a, dans ce cas, l'aspect d'une roche à tissu grenu, serré, composé de petites écailles à la manière des calcaires saccharoïdes, mais sur une échelle beaucoup plus restreinte ; parfois il fait une vive effervescence avec les acides, lorsque surtout il sort de son gîte ; parfois cette effervescence est à peine perceptible. Il est quelquefois traversé de veinules de carbonate de chaux blanc cristallisé, qui contraste par son effervescence, avec le tissu du carbonate de fer, lorsqu'on y jette une goutte d'acide et qu'on examine à la loupe l'effet produit.

Cette sorte de carbonate de fer constitue un minerai très important par le nombre de gisements qu'on connaît et par l'étendue de quelques-uns d'entre eux. Ainsi, dans le Cleveland, il y a des gisements énormes qui alimentent l'industrie sidérurgique de cette contrée ; le tiers environ du mi-

nerai extrait du sol de l'Angleterre est composé de sphérosidérite. Le pays de Galles et l'Ecosse en contiennent également. Il existe aussi en dépôts assez importants en Allemagne et en Westphalie ainsi qu'en Silésie, en France, en Hongrie et en Pensylvanie. Ce minerai est souvent mélangé avec des pyrites, de galène, de blende et renferme par conséquent du cuivre, du plomb, du zinc avec une grande quantité d'argile et de houille et une quantité appréciable de phosphore.

C'est un minerai très facile à réduire surtout après un grillage, et on peut le traiter soit pour fonte grise, soit pour fonte blanche, suivant les matières qu'il contient. On distingue deux sortes de sphérosidérites : 1° les sphérosidérites ordinaires ou argileux, minerai compact, coloré en gris ou brun, contenant de l'argile et des matières organiques surtout de la houille en très forte proportion. Il appartient aux terrains jurassiques ou crétacés ; 2° Les sphérosidérites ou minerai houiller, ou blackbands proprement dits, renfermant une quantité si considérable de houille qu'il est tout à fait noir et susceptible de s'enflammer et continuer à brûler. La quantité des matières combustibles peut aller jusqu'à 25 pour 100. Les parties de minerai les plus riches en charbon brûlent seules et forment la séparation entre les minerais et les houilles les plus chargées en cendres. Il est employé dans les hauts fourneaux après un grillage préalable qui est d'autant plus facile à opérer que le minerai comporte avec lui le combustible nécessaire en quantité plus que suffisante parfois et la chaleur dégagée dans ce cas peut servir à

calciner d'autres minerais qu'on mélange avec celui-ci.

Nous donnons, page suivante, comme pour l'autre catégorie de minerai de fer carbonaté, un tableau de la composition de quelques échantillons employés dans les usines.

Fer oligiste

Chimiquement parlant, le fer *oligiste* se distingue du fer carbonaté en ce que dans le premier le métal est oxydé au maximum et donne un peroxyde pur, tandis que le dernier n'est qu'un protoxyde, ou fer au minimum d'oxydation.

Ce minerai est extrêmement répandu et on le rencontre dans presque tous les terrains, aussi offre-t-il les aspects les plus divers. Sa couleur est très variable ; il est souvent cristallisé, à surfaces brillantes, irisées, à reflets métalliques ; parfois en plaques ou lames polies, réfléchissant les objets à la manière d'un miroir, ce qui constitue la variété *spéculaire*. On le rencontre aussi sous forme de lamelles, en petites paillettes brillantes, d'un gris d'acier, d'un rouge vif et quelquefois chatoyant, en petites masses granulaires compactes et pulvérulentes.

La variété de fer écailleux mérite une mention particulière ; elle a souvent l'éclat métallique, d'un gris d'acier tirant un peu sur la plombagine ; vue à la loupe, elle présente une réunion de petites lamelles ou écailles appliquées les unes sur les autres, sans ciment apparent et comme empâtées confusément avec quelques parcelles de quartz ; sa raclure d'un rouge de brique, détache une foule

Composition de quelques sphérosidérites argileuses et blackband

Composants des échantillons	Sphérosidérites argileuses							Minerais bonillers ou blackband					
								Crus			Grillés		
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6
Fer	28.76	36.14	33.20	32.44	25.10	36.16	40.46	36.20	34.14	30.30	52.12	46.70	47.66
Manganèse	0.74	1.42	1.16	0.80	4.70	2.86	1.22	1.97	"	"	1.21	1.42	0.90
Silice	19.13	10.17	10.22	4.60	10.13	11.50	8.76	1.93	10.19	5.26	9.64	16.49	13.44
Alumine	7.63	4.80	1.14	4.88	4.40	3.64	1.53	1.23	2.39	"	5.75	5.88	4.46
Chaux	2.89	0.76	3.32	2.99	9.72	1.88	2.15	2.44	2.10	"	3.14	3.21	3.63
Magnésie	2.29	0.94	2.85	3.43	3.65	2.07	0.51	1.39	2.49	"	1.96	4.03	2.65
Cuivre	"	"	"	"	traces.	"	"	"	"	"	"	"	"
Soufre	0.10	0.04	0.42	0.08	0.15	0.36	"	0.18	0.09	"	0.79	0.14	0.90
Phosphore	0.20	0.33	0.48	0.33	0.01	0.30	0.24	0.29	0.50	0.30	0.49	0.45	0.50
Acide carbonique	25.41	30.44	28.63	3.07	"	"	28.25	10.46	"	25.76	"	"	"
Eau et mat. organiques	2.07	2.52	2.89	2.03	"	"	3.80	30.77	32.25	"	"	21.11	4.05
Matières organiques	"	"	"	"	"	"	"	1.47	"	"	3.00	"	"

de ces écailles brillantes qui tachent les doigts et qui laissent sur le papier des traces violacées savonneuses ou talqueuses que le souffle ne suffit pas toujours pour enlever.

Ce qui rend précieux le fer oligiste, c'est sa grande richesse en fer ; elle n'est pas moins de 50 pour 100 du minerai et s'élève parfois à 65 pour 100 et même au delà. Les terres qui accompagnent le peroxyde sont en trop petite quantité pour que ce minerai puisse se fondre facilement et seul dans le haut fourneau. Aussi l'emploie-t-on dans les forges catalanes où il n'a pas besoin d'être protégé contre le vent par l'abondance des laitiers.

La variété concrétionnée du fer oligiste porte le nom d'*hématite*, à cause de sa couleur rouge de sang. Elle est en effet d'un rouge brun ; sa texture est fibreuse, radiée, ressemblant souvent à des filaments de soie grège, qui divergent du centre des masses vers leur surface. Le minerai forme des masses réniformes et de stalagmites ; il est assez dur pour qu'on en fasse des brunissoirs qui servent à polir l'or. A la longue ces stalagmites se chargent d'eau, reçoivent les éléments de l'argile et passent à la variété rouge compacte, qui se confond à son tour avec le fer hydraté dont nous allons parler. La couleur brune tourne alors au rouge plus ou moins vif, perd de son éclat soyeux, finit par tacher les doigts et se métamorphose en *sanguine*.

L'hématite rouge est fort riche ; elle contient 80 à 95 0/0 de peroxyde de fer, ce qui suppose 56 à 66 de fer ; ses éléments terreux sont la silice et suivant son état plus ou moins avancé de décomposi-

tion, l'alumine ; elle a beaucoup de tendance à se charger d'oxyde de manganèse.

Fer hydraté

Le fer hydraté est très abondant dans la nature. C'est un peroxyde de fer uni à de l'eau, qui se distingue par sa rayure et sa poussière jaune ou jaunâtre et donne à la calcination une perte de 10 à 15 0/0, due à la vaporisation de l'eau. La couleur empirique du fer hydraté varie singulièrement ; tantôt elle est brune, comme dans le fer oxydé brun, l'hématite, le fer en grains, etc. ; tantôt elle est d'un rouge plus ou moins vif, comme dans la sanguine, l'ocre, etc. ; tantôt elle est jaune, comme dans le fer siliceux, le fer terreux, l'ocre, etc. Le fer oxydé brun compact a un éclat résineux, presque métalloïde ; sa raclure est jaunâtre, mais lorsqu'on le lime, l'endroit sur lequel a mordu l'acier prend presque toujours la couleur métallique du fer ; il existe même une certaine variété très compacte que l'on peut travailler à la lime, qui se laisse parfaitement polir et qui a alors toute l'apparence du fer pur, pour lequel on la prendrait facilement, s'il ne lui manquait la vertu magnétique. La cassure du fer oxydé brun compact est presque conchoïdale, à grains très serrés, présentant parfois çà et là, quelques interstices remplis d'hydrate jaune, rarement rouge. Sa poussière est brun jaunâtre ; il n'est point aimantaire, mais il le devient à la calcination ; l'acide azotique ne l'attaque point ; il ne se laisse que très difficilement rayer par le fer.

Ce minerai est quelquefois irisé et présente les

couleurs brillantes du cuivre panaché, avec lequel on serait tenté de le confondre ; mais cette irisation n'est que locale dans le fer, tandis que dans la pyrite cuivreuse elle est permanente et forme une variété *sui generis*. L'odeur du soufre que donne au chalumeau le cuivre et la vertu aimantaire qu'y acquiert le minerai de fer suffisent pour les faire distinguer l'un de l'autre. On trouve souvent le fer brun traversé par de petites bandes d'hématite brune, qui semblent avoir cimenté et réuni les blocs détachés du minerai.

Il n'est pas rare de rencontrer cette variété sous forme cloisonnée, spongieuse, papyracée, ayant souvent une légère couleur bleuâtre. L'hydrate de fer est parfois criblé de cavités plus ou moins grandes, souvent tellement rapprochées qu'il prend un aspect spongieux. Il est alors parfois traversé par de petites couches très minces d'un oxyde rouge vif. Dans d'autres circonstances, sa texture semble due à des feuilles qui, en se convertissant en oxyde de fer, se sont contournées, ont pris des plis et des formes onduleuses, angulaires, discordantes ; tantôt se réunissant pour former une masse solide, et dont la lime seule peut mettre à jour l'éclat métallique ; tantôt se déposant en petites strates concordantes, entre lesquelles se sont formées des stries creuses remplies de manganèse velouté, d'oxyde jaune et quelquefois de pyrite brillante. Parfois ces strates ont des points de contact par lesquels les stries éprouvent des solutions de continuité ; alors se forment de petites géodes, des cavités de toutes figures, tapissées des mêmes matières que les stries et qui sont de toutes dimensions, depuis

celle microscopique jusqu'à un diamètre de un décimètre et plus. Souvent les cavités renferment un noyau ovoïde autour duquel les petites couches de minéral se sont roulées en feuilles concentriques et qu'elles enveloppent de toutes parts.

L'*hématite brune* est souvent mamelonnée; sa surface est d'un gris noirâtre, métalloïde, concrétionnée, stalactitée; elle ne se laisse point rayer par le fer ou l'acier; la lime y produit cependant, mais avec difficulté, une rayure jaunâtre; sa cassure présente des fibres divergentes, d'une couleur plus blonde que celle de la surface, d'un éclat vitreux métallique, plus tendre que la masse extérieure et se laissant rayer par le fer. Lorsque la cassure est fraîche, elle a un reflet légèrement bleuâtre.

Dans les petits mamelons hématiteux, les fibres, quoique apparentes, forment souvent un tissu très serré, à grains très fins, un peu bleuâtre, mais à éclat métallique; dans les mamelons plus considérables, les fibres sont plus brillantes, écailleuses et comme arénacées; les morceaux présentent souvent des réunions de masses fibreuses qui se tiennent par les surfaces divergentes et dont les intersections sont des plans plutôt que des surfaces convexes.

Il n'est pas rare de voir l'hématite brune accompagnée d'oxyde de manganèse bleu-noirâtre, quelquefois compacte comme les oxydes de fer mêmes, quelquefois en efflorescences veloutées à la surface ou dans quelques cavités.

Le *fer hydraté rouge* compact a souvent l'aspect terreux et friable, ce qui est dû à l'oxyde rouge terreux qui l'accompagne; mais sous cette enveloppe, la lime ne tarde pas à découvrir le vérita-

ble tissu du fer, et comme dans l'oxyde brun compact, elle met bientôt à nu l'éclat métallique. La raclure de ce fer est jaune rougeâtre, sa couleur légèrement violacée, passe au brun compact ; il est quelquefois en petites couches superposées les unes aux autres, dont les feuillets se manifestent à peine par des espèces de joints difficiles à apercevoir.

L'hydrate rouge terreux a la couleur de l'ocre rouge, tirant sur le brun en certaines parties ; sa poussière est brun jaunâtre, sa raclure plutôt rouge que jaune ; il fait quelquefois effervescence avec les acides, est avide d'eau qu'il absorbe avec un léger sifflement et donne à l'insufflation l'odeur argileuse. Comme l'hydrate compact, il devient aimantaire à la calcination et se confond en beaucoup de points avec le fer brun, l'hématite et même le fer oligiste. Dans les terrains calcaires, les cavités que présente parfois son tissu sont remplies de petits cristaux prismatiques de carbonate de chaux, blanc, jaunâtre, violacé, bleuâtre et brun.

La sanguine est un minerai de fer argileux, couleur rouge de brique foncé. Sa texture est grenue et terreuse ; sa cassure grenue et angulaire ; sa rayure est un peu plus jaunâtre que la masse, et sa poussière, au contraire, un peu plus brune ; elle happe très fortement à la langue, donne, par l'insufflation, l'odeur alumineuse, brunit au feu et devient alors seulement magnétique. Elle est essentiellement graphique et sert à faire des crayons rouges en y ajoutant du savon et de la gomme arabique. Elle se délaie facilement dans l'eau, où elle ne forme qu'une pâte courte,

On rencontre fréquemment dans les terrains modernes, au milieu des grès bigarrés, des marnes irisées et des argiles ferrugineuses, de petits filons d'hydrate de fer limoneux, jaunâtre, brunâtre, bleuâtre, tachant les doigts, et dont le caractère distinctif est de donner une raclure jaunâtre pâle. Ce minerai qui, comme tous les hydrates de fer, devient aimantaire au feu, a quelquefois l'apparence d'une terre ocreuse, sableuse, rude au toucher et plus ou moins friable. Il est alors léger et n'offre qu'un mauvais minerai, tant à cause de sa pauvreté, qu'en raison des terres qui l'accompagnent.

L'hydrate des marnes irisées est gris-noir de fer, métalloïde ; il semble dû à des plantes qui se sont minéralisées. On le trouve en petits filons minces, sans importance, au milieu des marnes rouges du terrain de Keuper ; la terre qui l'enveloppe est d'un rouge foncé qui contraste avec l'apparence bleuâtre du fer. Il devient aimantaire par la calcination.

L'hydrate compact jaunâtre existe quelquefois dans les cavités des montagnes calcaires magnésiennes ; il est en morceaux détachés accompagnés de terre jaunâtre ou rougeâtre, très chargée d'oxyde de fer. La cassure du minerai est brun isabelle, légèrement conchoïde, jouant parfois le rayonnement de l'hématite, sans toutefois en avoir l'éclat métalloïde ; sa poussière est de même couleur que sa masse ; sous la lime, l'éclat métallique se manifeste ; il est enfin aimantaire après la calcination.

Certains grès siliceux contiennent quelquefois assez de fer pour offrir un minerai exploitable.

Ils ont essentiellement la texture grenue, distinctive de cette roche ; leur couleur est jaunâtre, rouge violacé, quelquefois assez foncée et passant au brun bleuâtre. Ils constituent souvent le minerai dit *oolithique* ; c'est une foule de petits grains ronds ou de forme elliptique, empâtés dans un ciment siliceux, alumineux ou calcaire. Quelquefois ces grains prennent un éclat semi-métalloïde, dû à leur aplatissement qui semble venir de quelque pression. Parfois des grains de quartz forment le ciment et se présentent sous une forme anguleuse en petits fragments beaucoup plus petits que les globules de fer, dont toutes les faces sont, au contraire, arrondies.

Dans le voisinage du minerai grenu hydraté, il est assez ordinaire de trouver un fer compact brun, dont le tissu, vu à la loupe, est formé de petits globules aplatis, fortement comprimés et unis entre eux de manière à former une cassure conchoïdale ; les petits noyaux sont ouverts et l'intérieur en est rempli d'oxyde jaune hydraté.

Quelquefois, les globules de fer oxydé ont été si fortement comprimés qu'ils forment une pâte compacte dans laquelle, ils sont difficiles à distinguer, même à la loupe. Cette masse ferrugineuse, généralement peu riche, tache les doigts et admet dans son tissu des petits grains de silice plus ou moins arrondis qu'on confond facilement avec les grains d'oxyde.

Le fer pisolithique, ou fer en grains, diffère du minerai oolithique en ce que ses grains sont libres, séparés et ne forment point de roche ou de masse.

Fer oxydulé

L'action bien prononcée de ce minerai sur l'aiguille aimantée est son caractère distinctif : aussi lui donne-t-on le nom d'*aimant naturel*. Non seulement il attire la limaille de fer, mais encore il présente souvent les deux pôles.

Ce minerai est composé de protoxyde et de peroxyde de fer, sa couleur est grise ; assez semblable à certain fer hydraté compact, il se présente quelquefois, en Espagne, par exemple, sous forme grenue noire, assez semblable à de l'argile et se laissant rayer à l'ongle. Sa rayure noirâtre et sa vertu magnétique servent à le distinguer.

La variété amorphe qui fournit à la Suède les masses grenues dont elle tire son fer si estimé pour les fabriques d'acier, est d'un gris foncé, à poussière noire, et forme des amas considérables.

On trouve dans plusieurs localités le fer oxydulé associé à l'acide titanique sous forme de titanate de fer. Ce minerai qui était, à ce qu'il paraît, la principale ressource de l'antiquité pour la fabrication de ce métal se trouve en amas arénacés et est encore exploité dans plusieurs endroits. Il est souvent en petits grains noirs dans le sable, comme à Saint-Quai, près Châtelaudren. Il contient jusqu'à 86 0/0 de peroxyde de fer.

Le fer oxydulé offre une variété fibreuse qui a été rencontrée à Bibsberg, en Suède. Ses fibres sont minces, droites ou divergentes ; sa couleur est le gris d'acier, parfois bleuâtre ; elle possède peu d'éclat.

Les gîtes les plus considérables sont en Scandi-

navie, dans les monts Ourals, aux bords du lac Champlain, dans l'Amérique du Nord ; en Pensylvanie, etc. Il en existe d'assez importants en Hongrie, en Saxe dans l'Erzgebirge, le Hartz, en Silésie ; mais ils sont loin d'être de la puissance des premiers. L'Algérie fournit également aux usines de l'Europe de très beaux minerais magnétiques, en même temps que des hématites rouges et brunes. On en exploite également en Corse et en Sardaigne. L'Angleterre n'en possède que des insignifiants.

De tous les minerais de fer, celui-ci est le plus riche à l'état de pureté, mais on le trouve plus rarement en cet état que l'hématite rouge, aussi très souvent il contient moins de fer que certains fers oligistes et certaines hématites mamelonnées. Il est ordinairement très peu phosphoreux, bien qu'en certains gisements on en trouve de mélangé d'apatite, mais le cas est rare, aussi cette nature de minerai est-elle recherchée pour la production de la fonte pure.

On trouve quelquefois associés à ce minerai, du quartz, du calcaire, des pyrites de fer et de cuivre, des pyrites arsenicales, etc. L'acide titanique a une influence très fâcheuse sur le traitement du haut fourneau, car il diminue la fusibilité des laitiers.

Le minerai magnétique est très difficile à réduire, aussi l'emploie-t-on après un grillage préalable.

Composition de certains fers oxydulés magnétiques

Fer.	66.22	44.26	55.67	52.96
Manganèse. . . .	0.76	5.76	0.16	»
Silice.	10.14	1.75	9.70	9.80

Alumine.	0.37	0.20	2.25	9.48
Chaux.	0.43	3.80	5.79	1.46
Magnésic.	0.29	7.53	1.38	0.72
Soufre.	0.05	»	0.27	0.06
Phosphore.	0.01	traces	0.02	0.23
Acide titanique. . .	0.57	»	»	4.40
Acide carbonique. . .	»	18.72	»	»
Eau.	»	»	»	»

Produits riches en fer provenant d'opérations diverses

A cette sorte de matières appartiennent les scories ferrugineuses des diverses opérations métallurgiques que nous allons décrire ultérieurement et notamment les scories des marteaux pilons et des laminoirs, les résidus du grillage des pyrites, etc., et que l'on peut utiliser comme minerais en raison de leur teneur en fer. Dans certains pays on utilise même les dépôts de scories anciennes provenant des affinages au bas foyer où l'on transformait le minerai directement en fer ou en acier.

La teneur en fer de ces matières dépasse souvent 50 0/0; celles qui proviennent des fours à puddler contiennent souvent de 2 à 4 0/0 de phosphore et quelquefois davantage; on recherche ces scories toutes les fois qu'on veut fabriquer des fontes phosphoreuses *Thomas* et qu'on ne dispose pas de minerai suffisamment phosphoreux.

Ces sortes de minerai sont d'un traitement difficile en raison de la résistance qu'elles opposent aux actions réductrices; les oxydes abandonnent péniblement leur oxygène sous l'influence des

gaz réducteurs, étant formés de silicates de fer ; le grillage est sans effet sur les scories.

Les pyrites grillées qui ont servi à faire de l'acide sulfurique ont une importance égale à celle des scories comme traitement au haut fourneau.

La teneur de ces matières est très élevée ; elles contiennent généralement de 60 à 65 0/0 de fer ; on se sert surtout de ces matières lorsque le lit de fusion est pauvre.

Le phosphore se trouve en très petite quantité ; il ne dépasse pas 0,01 0/0 ; ce sont donc des minerais très appréciés pour la fabrication des fontes peu phosphoreuses, mais il serait presque impossible de les utiliser sans préparation préalable à cause de la grande quantité de soufre qu'elles renferment qui peut s'élever souvent jusqu'à 6 0/0 ; on y rencontre également jusqu'à 12 0/0 de zinc, matière présentant des inconvénients graves pour leur fusion dans les hauts fourneaux.

Du cuivre, de l'argent, du nickel et même de l'or sont souvent rencontrés dans ces minerais et qu'on cherche à séparer avec profit. Pour toutes ces raisons on soumet ces résidus à une opération préalable, soit dans l'usine des produits chimiques où les minerais ont été grillés, soit aux hauts fourneaux où l'on veut les fondre.

Pour éliminer le soufre, on procède à un nouveau grillage des résidus pulvérisés avec addition de sel marin ; la poussière qu'on obtient est lavée avec de l'eau en grande quantité ; les eaux de lavage renferment le cuivre, l'or, l'argent, le nickel et le cobalt et sont traitées par les procédés appropriés pour la séparation de ces métaux.

Le résidu du lavage, qui renferme encore du plomb, de l'arsenic et de l'antimoine, est employé comme minerai de fer, dans lequel le fer se trouve en état de sesquioxyde. Si la quantité des métaux autres que le fer est notable, la valeur de ce produit diminue et on ne peut pas les employer en très grande quantité à cause de leur finesse ; on a cherché à les agglomérer avec de la mélasse de façon à pouvoir les mouler en forme de briques sous la presse, mais jusqu'à présent on n'a pas obtenu de résultat satisfaisant, le prix de revient dépassant la valeur du produit obtenu.

Les oxydes de fer pulvérulents provenant du grillage des pyrites dans la fabrication de l'acide sulfurique ont été employés aux hauts fourneaux de Terre-Noire en 1877 et sur une grande échelle en les agglomérant avec une petite quantité de chaux hydraulique et d'eau et les soumettant à une pression énergique. Ces matières ainsi préparées formaient la plus grande partie des lits de fusion destinés à produire de la fonte Bessemer. Cet exemple a été suivi par un grand nombre d'autres établissements en modifiant plus ou moins l'agglomération. La chaux hydraulique qu'on introduisait a pour but non seulement de réunir les particules et former une masse solide, mais aussi de retenir les petites quantités de soufre que ces oxydes peuvent contenir encore.

La métallurgie a donc trouvé dans ces résidus, qui autrefois constituaient un embarras pour les usines de produits chimiques, une ressource précieuse.

Le tableau suivant donne l'analyse de ces résidus

du grillage des pyrites après chloruration et lavage :

Fer	65.80	63.62
Manganèse.	traces	0.04
Silicium.	1.66	4.67
Alumine.	»	1.82
Chaux	0.10	0.46
Magnésie.	traces	0.12
Cuivre.	0.02	0.04
Plomb.	0.14	0.45
Zinc.	0.03	0.24
Arsenic.	»	0.05
Antimoine.	0.02	0.06
Soufre.	0.67	0.55
Phosphore	0.01	0.01

Minerais de manganèse

Le manganèse entrant dans une certaine proportion dans la composition de certains produits spéciaux, nous allons donner les différents minerais qu'on trouve dans la nature.

Ce sont le carbonate $Mn Co^3$ et l'acérodèse ou manganite $Mn^2 O^4 H^2$, la pyrolusite $Mn O^2$ ou encore des minerais mixtes de fer et de manganèse dits *manganésifères* comme le *grenat* ou la *knebelite*, composé de silicate de fer et de manganèse.

Le carbonate et l'acérodèse conviennent très bien à la fabrication des fontes manganésées lorsqu'ils sont purs, mais on les rencontre rarement dans la nature.

La pyrolusite se rencontre plus fréquemment soit seule, soit en mélanges de protoxyde et de peroxyde avec une certaine quantité d'eau, tantôt

purs, tantôt associés à de la silice, à de la chaux carbonatée et à de l'oxyde de fer. Pour que ces minerais soient convenables à la fabrication des fontes manganésées, il faut qu'ils contiennent peu de silice et que leur teneur en fer ne soit pas très forte. La teneur en phosphore doit être aussi faible que possible, car ce corps passe en entier dans la fonte et la rend moins propre aux usages auxquels on la destine.

Composition de quelques minerais de manganèse

Manganèse.	52.78	55.03	51.63
Fer.	1.89	1.40	13.72
Silice.	6.20	8.30	0.87
Alumine.	1.40	»	0.69
Chaux.	3.40	»	1.52
Soufre.	»	»	»
Phosphore.	0.15	0.01	»

II. DOCIMASIE

La docimasie est l'art de connaître la teneur des minerais, leur composition, leur rendement et leur manière d'être. Elle se divise en deux parties : l'*essai* et l'*analyse*.

L'*essai* a pour but de savoir combien un minerai peut produire en métal utile. Il a lieu sur une échelle plus ou moins grande, par des moyens plus ou moins analogues à ceux employés dans les usines.

En traitant un échantillon représentant la moyenne aussi exactement que possible de tous les échantillons, on n'a d'autre but que d'en extraire

tout le fer qu'il contient et par là de s'assurer de la richesse générale de la mine.

L'analyse a un but plus général et d'une plus grande portée ; elle conduit à connaître non seulement la teneur en fer de cette mine, mais encore la qualité et la quantité de toutes les substances qui se trouvent associées à l'oxyde de fer ; elle permet donc de déterminer, à coup sûr, les fondants qui doivent être ajoutés au minerai dans le haut fourneau et conséquemment la manière de les traiter.

On voit, d'après cela, dans quelle erreur sont tombés les anciens maîtres de forges et quelques écrivains qui ont rejeté constamment le secours de l'analyse, ce puissant et exact auxiliaire du travail métallurgique, sans lequel nous prétendons qu'on ne peut conduire les usines à fer qu'en aveugles et avec des pertes inévitables.

Pour procéder avec plus de facilité sur les minerais qu'on veut examiner, soit qu'on emploie l'un ou l'autre des moyens docimasiques, il est bon de savoir aussi exactement que possible sur quelles substances on va opérer. Cette investigation se fait au moyen de l'*essai au chalumeau*, ou par quelques tâtonnements aux acides. Nous commencerons donc par donner les procédés avant de traiter de l'essai proprement dit et de l'analyse.

Essai au chalumeau

Tout le monde connaît l'instrument nommé *chalumeau* (fig. 1) dont se servent les ouvriers en métaux pour souder des bijoux ou d'autres pièces de peu de volume, en dirigeant la flamme d'une

lampe sur l'objet qu'il s'agit de braser. C'est un tube conique de métal ou de verre fort allongé dont le gros bout A se met dans la bouche pour y

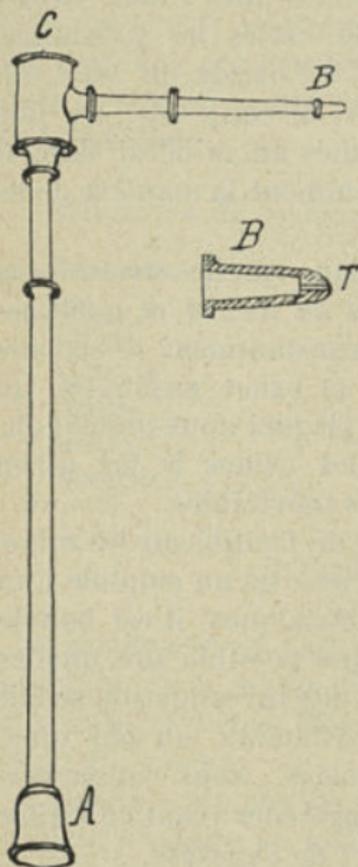


Fig. 1. Chalumeau.

opérer l'insufflation et le petit bout B, percé d'un trou aussi fin que possible T, se place dans la flamme d'une lampe ou d'une lumière quelconque, comme on le voit dans la figure 2.

Un réservoir C est placé à l'une des extrémités du tube pour y recevoir l'eau qui est chassée par les poumons et s'amasse dans l'instrument au point d'entraver l'opération lorsqu'il n'y a pas de réservoir.

L'extrémité B du bec étant exposée à la flamme, doit être faite en métal très réfractaire et non sujet à oxydation. Le platine remplit les conditions exigées, il se façonne avec une feuille soudée

à l'or, ou en perçant et taraudant un fil de ce métal. Le petit bouton percé s'enfonce à frottement sur l'extrémité du chalumeau.

Le support sur lequel on place l'objet qu'il s'agit d'essayer, est un morceau de charbon de bois bien brûlé, provenant d'une essence à tissu lâche, mais qui ne soit pas sujette à pétiller. On y creuse une petite cavité avec un couteau, afin d'y placer la

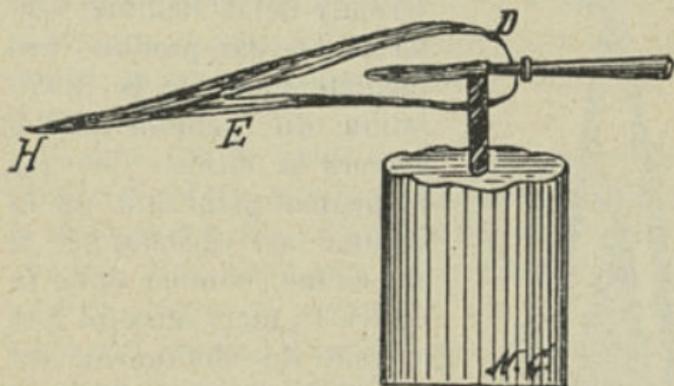


Fig. 2. Flamme oxydante. La pointe du chalumeau présentée à la flamme.

matière d'essai et le fondant qui doit servir à la réduire.

L'insufflation continue de l'air dans le tube du chalumeau exige une certaine habitude. On doit tenir les joues constamment tendues et leur faire faire l'office du soufflet, ménager avec soin son souffle et le tenir au même degré de compression, en introduisant de l'air dans la bouche, au fur et à mesure qu'il en sort par le chalumeau. L'habitude de cette petite opération s'acquiert facilement au bout de quelques jours, si l'on a soin de ne pas se presser et de ne pas trop serrer l'embouchure du chalumeau.

La flamme, qui, pour le premier venu, est bien homogène, présente à l'œil de l'observateur des parties distinctes dont les fonctions sont tout à fait différentes : la partie DE, qui est d'un

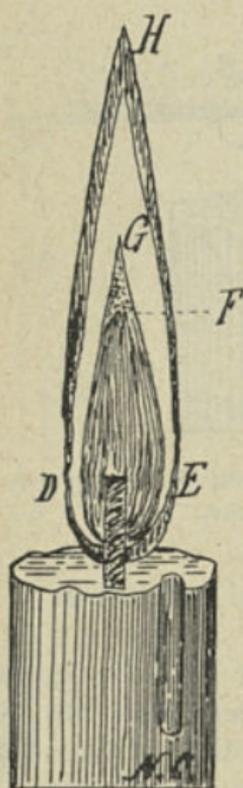


Fig. 3. Flamme
au repos.

bleu sombre et forme un demi-cercle à la surface inférieure de la flamme, renferme les gaz produits immédiatement par la distillation du combustible à travers la mèche. Ces gaz ne brûlent point tant que la flamme est abandonnée à elle-même, comme dans la figure 3 ; mais aussitôt que le vent du chalumeau est introduit dans cette flamme, la partie qui formait un croissant près de la mèche, s'allonge horizontalement comme dans la figure 2, se concentre dans l'intérieur et forme un petit cône qui se prolonge plus ou moins suivant la force du souffle.

C'est à l'extrémité G que se trouve la plus grande chaleur dans la flamme en repos ; lorsque la flamme est activée par le chalumeau, cette plus grande chaleur change de place et se porte à l'extrémité E, où, toute la masse du vent étant condensée et dirigée sur un petit espace, situé au milieu de la

flamme, la température devient énorme et capable de réduire et de volatiliser les substances qui, auparavant étaient réfractaires à la flamme libre.

La partie qui se trouve entre G et H est celle où la combustion est incomplète, où lorsqu'on y engage un objet qui résiste au feu, cet objet se couvre de suie et se noircit. Cette suie, qui est une substance composée principalement de carbone, donne naissance à une flamme brillante, avide d'oxygène.

Si donc on y place un oxyde métallique, ce corps s'y réduit, cède son oxygène au carbone de la flamme et passe à l'état de pureté plus ou moins absolue. C'est pour cela que la partie G H porte le nom de *flamme de réduction*. On facilite cet affinage par l'emploi d'un bec plus fin du chalumeau en ne l'engageant pas trop en avant dans la flamme (fig. 4).

A la pointe extrême de la flamme, en H, par exemple, toutes les parties combustibles sont saturées d'oxygène, qui y abonde par un courant naturel d'air extérieur. Un corps simple y est donc rapidement oxydé, et cette oxydation acquiert son maximum d'effet, un peu en dehors de la flamme, toutefois qu'on n'éloigne pas trop la substance pour que la température devienne insuffisante. C'est au rouge naissant que l'oxydation devient la plus active. Cette pointe extrême s'appelle la *flamme d'oxydation*.

Maintenant, si on expose un petit morceau de minerai de fer, de la grosseur d'un grain de moutarde environ, à la flamme extérieure H, il n'éprouve aucun changement, si surtout c'est un

peroxyde de fer ; mais si on le place dans la flamme intérieure, entre G et H, il noircit, perd de son oxygène, en donnant naissance à des gaz acides et devient magnétique.

Le borax a la propriété de former avec les oxydes de fer un alliage verdâtre qui ressemble à du verre et est transparent dans une foule de cas.

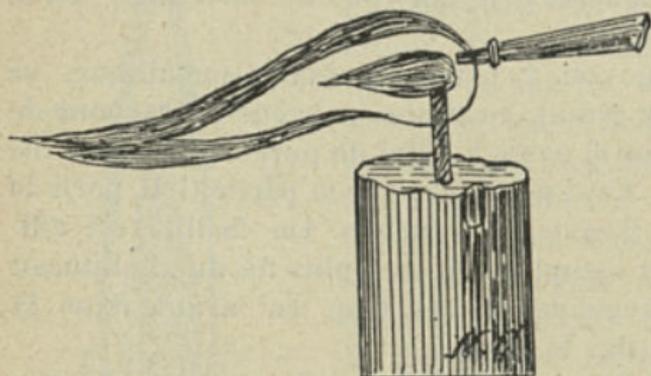


Fig. 4. Flamme de réduction.

On commence par fondre le borax sur le charbon qui sert de support et on place le grain ou la poussière de l'oxyde sur le réactif, soit au moment où il se boursoufle, soit après au moyen de l'humectation.

Placée au feu d'oxydation, la petite masse se convertit en un verre rouge sombre, qui s'éclaircit en refroidissant, puis passe à une teinte jaune et devient quelquefois parfaitement limpide. Au feu de réduction, le verre devient couleur vert-bouteille et même vert-bleuâtre, si la réduction est portée au plus haut degré possible. Cette couleur

appartient à l'oxyde magnétique et devient quelquefois si foncée qu'elle en est noire.

La silice n'éprouve aucun changement au chalumeau, si on n'y ajoute pas un fondant. Avec la soude, elle fond avec une vive effervescence et donne un verre limpide; la *dissolution de cobalt* lui procure une couleur bleuâtre, qui devient d'autant plus foncée qu'on y ajoute plus de cobalt, et finit par devenir gris foncé et noire.

L'*alumine* n'est point attaquée par le feu seul; elle fond lentement avec le borax et forme un verre diaphane qui ne devient opaque que par une forte addition d'alumine en poudre. Le *sel de phosphore* produit le même effet. On distingue l'alumine de la silice, en ce que, par une suraddition de cobalt, le verre d'alumine conserve sa couleur bleue en se fonçant, tandis que celui de la silice perd cette teinte et passe au noir.

La *chaux* passe également au noir par la *solution de cobalt*; le borax la change en verre transparent qui devient opaque au *flamber*, c'est-à-dire à une légère chauffe donnée à la flamme extérieure. Si c'est un carbonate de chaux, sa fusion s'opère avec effervescence. Avec le sel de phosphore, le verre est limpide et conserve sa transparence après le refroidissement. La soude n'a aucune influence sur la chaux.

La *magnésie* prend une belle couleur de chair pâle avec la solution de cobalt; cette teinte est plus visible après le refroidissement; le verre est transparent avec le borax et devient opaque au *flamber*; le sel de phosphore donne un verre limpide qui tourne au blanc de lait par le refroidissement.

Ces terres, du reste, sont inaltérables au chalumeau si elles ne sont point accompagnées de fondants.

La *pyrite* doit être grillée sur le charbon à un feu doux et incapable de la fondre. Le soufre s'évapore en jetant une odeur prononcée d'acide sulfureux et le métal reste seul. Comme il n'est possible de confondre le sulfure de fer qu'avec celui de cuivre, on opère, après la disparition totale du soufre, les réactions nécessaires pour reconnaître celui de ces deux métaux qui était saturé de soufre.

Après le grillage, le sulfure de fer est transformé en oxyde, qui agit comme nous l'avons dit précédemment. En poussant la température à un degré élevé à la flamme intérieure, on obtient un grain dont l'ignition persiste quelques instants après qu'on l'a retiré du feu, et qui se revêt, après le refroidissement, d'une masse noire inégale et cristalline. Sa cassure est cristalline, jaunâtre et brillante.

L'essai de ce grain ou de sa poussière par le barreau aimanté est trompeur, attendu que celui obtenu du cuivre pyriteux (combinaison de sulfure de cuivre et de sulfure de fer) est également attirable à l'aimant, lorsque l'insufflation au chalumeau a été prolongée. Mais le cuivre pyriteux, après avoir pris, au premier coup de feu, une teinte superficielle de couleur sombre, devient rouge par le refroidissement. Le sulfure de cuivre d'ailleurs, à quelque variété qu'il appartienne, fond avec facilité à la flamme extérieure, bouillonne et projette des gouttes incandescentes. A la flamme intérieure il se couvre d'une croûte et dès lors ne peut plus entrer en fusion.

Ces essais au chalumeau n'offrent aucune difficulté, mais ils exigent une certaine habitude de l'insufflation, dont on s'effraie à tort et dont on vient facilement à bout avec un peu de persévérance. Néanmoins, comme il faut encore une certaine étude et que beaucoup de personnes reculent devant un travail qui a quelque chose de nouveau et de plus ou moins répugnant, voici des moyens empiriques élémentaires pour reconnaître la nature de la terre dominante dans un minerai ; car, nous le répétons, sans cette connaissance, il est très difficile de faire réussir un essai et de bien diriger une analyse.

Essai aux acides

Après avoir fait un échantillon moyen des minerais qu'on veut analyser et l'avoir réduit en poudre impalpable, on en dissout une certaine quantité dans de l'acide chlorhydrique, ou mieux de suite, dans de l'eau régale, qui est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide azotique.

Si l'on a eu soin de faire calciner la poudre de minerai avant de la projeter dans l'acide, l'eau régale dissoudra toutes les substances, excepté la silice qui restera au fond du vase sous forme de précipité blanc. On décantera et on divisera la liqueur dissolvante en cinq parties, qu'on recueillera sur autant de capsules ou mieux de tubes à précipiter. En jetant dans un du sulfate de soude, la *chaux* se précipitera en formant du *sulfate de soude* peu soluble.

Le *carbonate de soude* projeté dans le second tube nous donnera un précipité de magnésie.

La *potasse* précipitera l'alumine, mais s'il y a excès de potasse ce précipité redeviendra soluble.

L'*alcool* ou l'*acide sulfurique* précipiteront la *baryte*; la terre obtenue par ce dernier procédé est insoluble dans l'eau.

Enfin, la *potasse* précipite le manganèse et comme la potasse précipite également l'alumine, on ajoute du ferro-cyanure jaune qui, avec le manganèse, donne une couleur de chair.

Ces indications, toutes légères qu'elles soient, suffisent pour reconnaître les terres qui accompagnent un minerai, et l'on peut passer ensuite à l'essai proprement dit.

Essai proprement dit

L'essai connu sous le nom d'*essai par la voie sèche*, s'opère à l'aide de *flux* ou *fondants*, par opposition à l'analyse qui se fait au moyen de réactifs.

Le flux diffère du réactif en ce qu'il agit plus particulièrement sur les molécules intégrantes des minerais et qu'il en opère la séparation en facilitant leur fusion; le réactif, au contraire, agit sur les molécules constituantes et procure la décomposition du corps à l'aide du jeu des affinités. Le flux procure la liquéfaction des matières soumises à son action; le réactif n'agit que sur des substances liquéfiées par la dissolution.

Les anciens essayaient les minerais de fer avec une certaine habileté; ils calcinaient l'échantillon dans une forge de maréchal; après quoi on le réduisait en poudre, qu'on lavait avec soin et qu'on desséchait. On en tirait le plus de fer possible par un aimant, puis on retirait du creuset la

poudre restante, on l'étalait et on la triait avec les barbes d'une plume. L'aimant y était de nouveau promené, tant qu'il s'y attachait des particules de fer. Enfin, le tout était mis dans un creuset avec du sel de nitre et on poussait le feu jusqu'à parfaite fusion. On obtenait ainsi un culot de fer. Le minerai était jugé riche si, après calcination et pulvérisation, l'aimant retirait avec facilité beaucoup de parcelles ferrugineuses ; on le regardait comme pauvre, au contraire, si le tirage à l'aimant ne séparait que peu de métal.

Le choix du fondant qu'on doit ajouter à un minerai pour obtenir la fusion complète des substances terreuses et par conséquent la séparation du métal, dépend de la qualité de ces terres qui accompagnent l'oxyde de fer dans le minerai.

Si le minerai contient peu de matières étrangères et est fort riche, tel que le fer magnétique, le fer oligiste ou des peroxydes compacts, il fond presque toujours sans fondant. Cependant il est bon d'y ajouter un peu de borax ou un silicate fusible. Ces mêmes minerais renferment le plus souvent un peu de silice. Le flux doit être alors du carbonate de soude, ou un carbonate de chaux et d'alumine, ou enfin un carbonate de chaux et de dolomie.

Le carbonate de chaux est un excellent fondant pour les minerais hydratés et peroxydés qui, outre la silice, contiennent de l'alumine, et qu'on nomme argileux. Si le minerai ne renferme point ou très peu de silice, on peut employer comme fondant le quartz, s'il est manganésifère, et du quartz et de la chaux s'il est magnésien. Les fers hydratés pauvres et les fers spathiques sont dans ce cas. Les mine-

rais alumineux exigent du quartz et de la chaux ; les fers titanés veulent en outre un peu d'alumine ; les minerais très calcaires, de l'argile pure. Enfin, les scories d'affinage, les laitiers de haut fourneau, et quelques minerais qui contiennent les trois bases, et sont par conséquent fusibles par eux-mêmes, n'exigent point de fondant.

La plus grande difficulté qu'on éprouve lorsqu'il s'agit d'essayer par la voie sèche un minerai de fer, consiste dans le choix des échantillons qui doivent représenter la moyenne du ou des minerais. Pour arriver à obtenir une bonne moyenne, on prend dans plusieurs tas un tonneau de chaque sorte, qu'on réunit ensuite sur une aire où on fait remuer le tout à la pelle pendant plusieurs heures, et on finit par étaler les minerais ainsi mêlés en forme de carré ; à chaque coin du carré et au centre, on en prend un seau, et on réunit ces cinq seaux sur une autre aire, où on les fait briser en morceaux moins gros. On exécute de nouveau, en petit, ce qui a été fait sur une plus grande échelle, et on fait réduire en poussière les cinq petits tas recueillis, dont on mêle bien le résultat. C'est dans cette poussière qu'on puise un échantillon destiné à être pulvérisé d'une manière impalpable et dont quelques grammes seulement doivent être soumis à l'essai. On en fait autant des fondants qui doivent servir et on mélange bien intimement la poudre de minerai avec celle du fondant.

D'un autre côté on broie, on pulvérise et on tamise du charbon de bois, qu'on humecte légèrement avec de l'eau gommée, ou avec un peu d'huile, pour former ce qu'on appelle la *brasque*.

Le charbon est essentiellement désoxydant : il réduit tous les oxydes métalliques, en s'emparant de l'oxygène pour former de l'acide carbonique qui s'échappe et laisse le métal à l'état de pureté. C'est le plus puissant réactif connu, à cause de son affinité pour l'oxygène.

On choisit un creuset de grès ou de plombagine, on tasse au fond une certaine quantité de brasque qu'on presse légèrement avec un pilon quelconque ou avec le doigt, on enduit de même brasque les parois intérieures du creuset, en ayant soin de laisser, au milieu, une cavité dans laquelle on verse le minerai et son fondant en poudre. On remplit ensuite le creuset jusqu'à la partie supérieure et on le recouvre d'un couvercle qu'on lute avec soin.

On place ce creuset sur un biscuit de porcelaine ou de grès au milieu d'un feu de maréchal ou d'un petit fourneau d'essai ; on chauffe doucement d'abord, pendant une heure, et on pousse graduellement le feu pendant la seconde heure. On retire alors l'appareil qu'on frappe doucement sur les côtés pour réunir les petites parties de métal réduit et on laisse refroidir. Après avoir brisé le creuset, on en retire un *culot* qu'on nettoie avec soin et qu'on pèse ; après quoi, on cherche dans la scorie qui l'accompagne les petites parcelles de métal qui s'y trouvent sous forme de grenailles et qu'on pèse avec soin, afin d'en ajouter le poids à celui du culot obtenu.

Les oxydes de fer ne donnent pas, par ce moyen, du fer pur métallique : ce métal retient toujours un peu de carbone et forme de la fonte. C'est donc un culot de fonte qu'on a obtenu. Le métal réduit

forme, outre le culot, une foule de petites grenailles disséminées vers la partie inférieure du creuset. C'est l'inconvénient du charbon employé seul. Le carbonate de soude les rassemble dans le culot. En ajoutant donc 4, 8 ou 16 parties de carbonate alcalin à une partie de charbon et mélangeant le

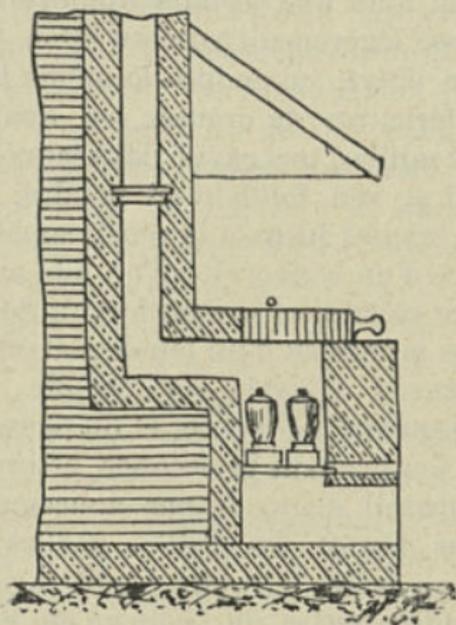


Fig. 5. Fourneau d'essai au laboratoire.

tout bien intimement, on n'obtient qu'un culot unique et qu'une scorie. Le fourneau d'essai, représenté par la figure 5, donne une idée de celui employé dans les laboratoires où on essaie les minerais ; il est d'une telle simplicité et si facile à comprendre que nous ne croyons pas devoir donner plus d'explications.

Analyse

Un minerai de fer étant donné, il s'agit de déterminer sa composition par l'analyse chimique.

A cet effet on pulvérise une certaine quantité de minerai dans un mortier d'*agate*, avec un pilon de même nature. Un mortier de fer ou de fonte ne conviendrait guère, en ce que le minerai pourrait, dans certains cas, lui emprunter quelques parcelles de métal. Le minerai pulvérisé devra, pour plus d'exactitude, et afin d'opérer la division la plus complète possible, être passé au tamis de soie très fin.

Après ces opérations préliminaires, on prendra un certain nombre de grammes de la poudre impalpable ; on les placera dans un creuset d'argent ou de platine, sur un feu d'abord faible, puis augmenté successivement ; on calcinera le minerai pendant plusieurs heures ; on le retirera et on s'assurera, par la perte de poids qu'il aura subie, de la quantité d'eau qu'il contenait avant sa calcination.

Ordinairement cette opération est faite sur une petite quantité de minerai indépendante de celle qui doit être soumise à l'analyse par les acides.

Lorsqu'on veut procéder à celle-ci, voici le moyen qu'on peut employer. Prenons par exemple un minerai de fer composé de :

Peroxyde de fer,
Silice,
Alumine,
Chaux,

qui renferme toutes les terres élémentaires, et dont

la fusion au haut fourneau se ferait sans addition de fondants, si ces terres se trouvaient dans la proportion voulue.

Première opération. — Après avoir pesé bien exactement une capsule de porcelaine, on ajoute sur le plateau opposé de la balance, au poids trouvé, un nouveau poids de 5 ou 10 grammes, suivant la quantité sur laquelle on veut opérer et l'on verse doucement dans la capsule une quantité équivalente de la poudre du minerai.

Nous ferons remarquer avant d'aller plus loin que, lorsque l'alumine a été reconnue, par l'essai préliminaire, se trouver en grande proportion dans le minerai, il convient d'opérer sur la moindre quantité possible, attendu que les précipités qu'on obtient de cette terre dans le cours de l'opération sont extrêmement volumineux et demandent plusieurs jours pour leur lavage. Berzélius n'opérait jamais dans ce cas sur plus d'un gramme. La poudre de minerai qu'on a versée dans la balance n'a pas besoin d'être calcinée. Dans le courant de l'opération il se forme quelquefois des bisilicates de chaux et d'alumine qui, par la calcination, perdraient la propriété de se dissoudre dans les acides. On déduit dans ce cas l'eau et les matières volatiles, de la portion de minerai qui a été préalablement soumise au feu.

Ceci étant bien entendu, on ajoute dans la capsule contenant la poudre du minerai, de l'acide chlorhydrique ou de l'eau régale à qui l'on doit donner la préférence surtout lorsqu'on opère sur un fer carbonaté dont le fer est en état de protoxyde. Cet acide porte l'oxydation au maximum. Dans la

précipitation par l'ammoniaque caustique, une partie du protoxyde resterait en dissolution dans la liqueur, et le reste se trouverait dans le résidu. Cet inconvénient n'a pas lieu pour le peroxyde.

On porte ensuite cette capsule avec son contenu sur un bain de sable ; on chauffe doucement en ayant soin de ne pas faire bouillir, pour éviter la projection de quelques parties et en couvrant préalablement le vase d'un petit couvercle de papier. Lorsque la masse commence à se solidifier, on la remue avec un petit bâton cylindrique de verre, jusqu'à ce qu'elle soit parfaitement sèche et qu'on ne sente plus d'acide. Cette manipulation a pour but de rendre la silice insoluble dans l'eau ; ce qui est important pour le lavage sur le filtre qu'on doit employer plus tard ; mais elle produit un effet analogue sur le peroxyde de fer, l'alumine et la magnésie, qui en perdant de leur acide deviennent aussi insolubles.

Comme il est important que la silice seule ne soit pas entraînée dans la solution, on rend les trois autres substances solubles en humectant la masse avec de l'acide chlorhydrique concentré. Ensuite on délaie avec de l'eau et on passe le tout au filtre ; toutes les substances se trouvent dissoutes et entraînées par la liqueur. La silice seule reste sur le papier filtre.

On enlève ensuite ce papier et on le dépose avec le résidu siliceux qu'il contient, dans un petit creuset de platine qu'on a eu soin de peser d'avance. Ce creuset est placé au-dessus de la cheminée d'une lampe à esprit-de-vin à mèche circulaire. On pousse la calcination de la silice et du papier

jusqu'au rouge obscur ; on pèse ensuite le tout, qui doit donner un poids dont il faut déduire celui du creuset et celui connu d'avance des cendres du papier (1). Le reste donne le poids de la silice.

Ainsi, des quatre substances contenues dans le minerai, une, celle qui n'est pas soluble dans l'acide chlorhydrique ou dans l'eau régale, est connue et séparée ; les trois autres doivent se trouver dans les deux résidus liquides : la dissolution acide et l'eau de lavage. Ils y existent à l'état de chlorure, grâce à la base de l'acide.

Deuxième opération. — On commence alors par faire évaporer ce dernier liquide, de manière à le réduire au moindre volume possible ; on l'ajoute ensuite au premier, et l'on procède à l'analyse du tout.

L'ammoniaque caustique a la propriété de séparer toutes les bases moins puissantes qu'elle ; elle précipite par conséquent les terres et les oxydes métalliques ; mais la chaux échappe à son action et reste dans la liqueur. On verse donc de l'ammoniaque caustique dans la liqueur et on continue de verser jusqu'à ce qu'il y ait excès, ce qui se reconnaît à une légère odeur ammoniacale qui se manifeste. L'excès d'ammoniaque empêche les chlorures contenus dans le précipité de se dissoudre dans

(1) Pour apprécier avec certitude et ne pas commettre d'erreur au pesage, on doit avoir plusieurs papiers du même poids, qu'on fait incinérer d'avance et dont les cendres sont pesées avec soin. Cette incinération doit être répétée plusieurs fois, afin de s'assurer que le poids des cendres est bien le même pour un poids donné du papier.

l'eau lors du lavage ; mais il ne faut pas mettre un trop grand excès, car alors une portion de l'alumine serait dissoute. Le précipité qu'on obtient contient le peroxyde de fer et l'alumine. La chaux reste dans la liqueur.

Il faut avoir soin de couvrir le vase qui la contient d'un disque en verre, afin d'éviter le contact de l'air, car l'atmosphère renferme toujours un peu d'acide carbonique qui, en se combinant avec la chaux, donnerait lieu à une précipitation de carbonate calcaire.

Le précipité et la dissolution sont passés au filtre qu'on continue à préserver du contact de l'air, en opérant avec célérité à cause de la facilité que possède l'air atmosphérique de précipiter du carbonate de chaux ; on lave à l'eau bouillante le précipité qui se trouve sur le filtre et on continue ce lavage jusqu'à ce qu'une goutte de la liqueur filtrée, versée et évaporée sur une spatule de platine, n'y laisse point de tache. Les eaux de lavage réunies sont ensuite réduites à un petit volume par l'évaporation : puis on les ajoute à la dissolution filtrée.

Cette dissolution filtrée, comme nous l'avons dit, tient en suspens la chaux. En y versant de l'oxalate d'ammoniaque, on forme un oxalate de chaux qui se précipite, qu'on filtre, qu'on lave, qu'on sèche et qu'on calcine.

La calcination, en chassant l'eau, transforme l'oxalate en carbonate de chaux, auquel on ajoute encore un peu de carbonate d'ammoniaque pour rendre au précipité le peu d'acide carbonique que lui enlève la chaleur. Cela fait, on sèche, on cal-

cine jusqu'au rouge naissant et on pèse. Le carbonate de chaux est composé, pour 100 parties, de :

Acide carbonique	43,90
Chaux	56,10

Il devient donc très facile de connaître la quantité contenue dans le précipité calciné; il suffit en effet de multiplier le poids du précipité par 0,561. On obtient ainsi la chaux.

Le précipité qui est resté sur le filtre contient nous avons dit le peroxyde de fer et l'alumine que nous allons tâcher de séparer.

Troisième opération. — On enlève avec soin ledit précipité de dessus le filtre (1), on le sèche, on le calcine et on le pèse. On verse ensuite dessus de l'acide chlorhydrique ou de l'acide sulfurique concentré et de la potasse caustique en excès qui ne dissout que l'alumine et précipite le peroxyde de fer.

Après avoir filtré, lavé et séché, on pèse le précipité et on en déduit le poids de l'alumine par la différence du poids actuel avec celui du précipité précédent.

Si le minerai soumis à l'analyse ne contenait que juste le peroxyde de fer et les trois terres, l'opération serait terminée : il ne resterait plus qu'à en additionner les divers résultats partiels, pour s'assurer qu'ils représentent bien le poids total de la substance, mais il en est rarement ainsi.

La séparation de l'oxyde de fer du protoxyde de

(1) S'il en restait sur le papier, on l'enlèverait au moyen d'un acide,

manganèse au moyen de la magnésie, doit se faire à froid; le sel magnésien serait exposé à se décomposer, du moins en partie, si l'on chauffait la dissolution, à plus forte raison si on la faisait bouillir. On sait d'ailleurs que la séparation du fer est complète à froid comme à chaud.

Lorsqu'un même minéral contient des oxydes de fer à des degrés différents, comme le fer oligiste, par exemple, voici comment on parvient à déterminer la quantité relative de l'un et de l'autre de ces oxydes :

Dans un flacon bouché à l'émeri, on introduit la matière réduite en poudre et on remplit avec du gaz acide carbonique, ce qui est facile, à cause de la grande pesanteur de ce gaz qui permet de le transvaser comme un liquide. On ajoute ensuite de l'acide chlorhydrique, on bouche hermétiquement et on attend. Aussitôt qu'on s'aperçoit que le minéral est entièrement dissous, on rouvre le flacon et on le remplit rapidement d'une dissolution d'hydrogène sulfuré qui vient d'être préparé et qui ne doit point contenir de soufre en suspension. On rebouche de suite. L'hydrogène sulfuré a la propriété de ramener le peroxyde à l'état de protoxyde de fer. La liqueur est d'abord laiteuse; mais, au bout de quelques jours le soufre se dépose. Il est alors facile de le recueillir sur le filtre.

La quantité d'oxygène qui a été enlevée au peroxyde par l'hydrogène rendu libre se déduit de la quantité de soufre précipité. Pour déterminer ensuite la proportion de peroxyde, il faut substituer à l'hydrogène sulfuré une dissolution de chlorure d'or et de sodium; l'or est précipité et du

poids qu'on en retire, on déduit facilement la quantité d'oxygène qui sature le fer.

III. EXPLOITATION DES MINERAIS

Nous allons maintenant passer en revue les différentes manières d'exploitation des gîtes minéraux. Lorsqu'on a découvert un gîte de minerai de fer, il faut étudier son allure, son inclinaison et sa direction; il faut s'assurer de sa puissance. Ce sont là des *travaux de recherches* qui s'exécutent suivant l'importance et la profondeur, ou par des *tranchées* sur le gisement même, ou par des *puits* et des *galeries* dans la profondeur.

Les minerais sont ou en *amas*, ou en *filons* ou en *couches*; ils sont entourés de roches *tendres*, *dures* ou *tenaces*. Les terres végétales, les sables, les cailloux roulés, les schistes argileux, les calcaires grossiers, les marnes, les terrains d'alluvion, en un mot, sont dans la première classe, se défont avec la pioche et s'enlèvent avec la pelle. Le pic, les masses, les coins, les leviers sont des outils dont on se sert pour les attaquer et les abattre.

Les marnes, les calcaires, les serpentines, les schistes métallifères, les grès, le calcaire compact et les roches cristallines en décomposition, sont dans la seconde classe et s'attaquent à la poudre ou avec le pic à rochers, les pointerolles, les coins et les leviers.

Enfin, la troisième classe se compose assez généralement des gangues ou de la matière même du filon, telles que le quartz, les spath-fluor, la baryte, etc., qui ne peuvent être entamés qu'à la poudre.

Il est ordinaire que les roches soient plus tendres à la surface que dans l'intérieur de la terre : les intempéries de l'air et les agents atmosphériques tendent à les détériorer et à les amollir. On ne doit donc pas juger, d'après leur ténacité extérieure, de la résistance qu'elles peuvent opposer dans la profondeur,

Lorsqu'on attaque un filon superficiellement, on donne à l'entaille la forme de gradins, offrant des massifs dégagés sur les deux faces ; on profite des moindres fissures pour y placer des coins ou des leviers et les enfoncer par force. Des coins de bois sec, dur, enfoncés dans les fentes et mouillés ensuite sont quelquefois d'excellents moyens pour séparer les morceaux d'une roche. S'il s'agit d'une couche ou d'une galerie, le mineur l'entaille à une certaine hauteur, et si la couche contient plusieurs strates de différentes duretés, il place ses coins dans les parties tendres et les enfonce à coups de masses.

Dans un poste de huit heures, un piqueur avance de 20 à 40 centimètres dans une galerie de un mètre de large sur deux mètres de haut.

Les anciens se servaient du feu pour chauffer les roches, les dilater, leur enlever l'humidité et les forcer à se fendre. La contraction qu'ils faisaient éprouver ensuite à la pierre, en projetant de l'eau dessus, au moment de sa plus grande dilatation, les faisait fendre de toutes parts. Aujourd'hui, on emploie le même moyen pour produire des fissures à l'aide desquelles on en détache des morceaux avec des pointerolles. Mais on ne peut user de ce procédé que pour les galeries où les moyens d'aé-

rage sont puissants et faciles ; car la fumée qui en résulte et qui séjourne longtemps au toit de la couche, obligerait d'attendre assez de temps pour que la galerie pût être de nouveau habitée. Ce mode d'exploitation n'est plus guère en usage depuis qu'on a sous la main la poudre.

Ce dernier moyen, en effet, est le plus simple et le plus puissant qu'on emploie dans nos mines actuelles ; il ébranle d'énormes blocs de rochers en peu de temps, surtout depuis que la force expansive de la poudre est employée sur la plus vaste échelle et qu'à l'aide de l'électricité, on peut enflammer la lumière d'une mine à toute distance.

On creuse à l'aide d'un fleuret à pointe d'acier, un petit canal cylindrique dans la pierre, en ayant soin de choisir une partie dure, homogène et sans fissures. On introduit dans ce cylindre une cartouche de poudre qu'on presse fortement avec un bourroir, en ayant soin de ménager le long du cylindre une petite cheminée destinée à recevoir la poudre qui doit allumer la cartouche par le bas.

Pendant qu'on creuse au fleuret, il se forme une espèce de boue au fond du petit canal, l'instrument ne s'enfonce plus qu'avec peine et ne produit aucun effet par le choc. Il faut alors remonter de temps en temps le fleuret et nettoyer le trou avec une petite tringle plate en fer, recourbée en cuiller, qu'on nomme *curette*. Une fois le trou nettoyé, on le sèche avec un tampon d'étoupes, on place sur le côté, à l'endroit resté vide pour la cheminée, une épinglette en cuivre et on bourre avec du calcaire ou de l'argile réduite en poussière. On retire l'épinglette et on descend, dans sa place, un

tube mince de papier rempli de poudre délayée et séchée.

La charge dans l'intérieur des mines est de 60 à 150 grammes de poudre ; elle peut être portée à l'extérieur jusqu'à 500 grammes.

La poudre de mine est composée de 65 parties de nitre, 15 parties de charbon et 20 de soufre ; elle doit avoir les grains bien égaux, secs, durs et ne pas tacher les doigts. On emploie également la dynamite.

Exploitation à ciel ouvert

Lorsqu'on exploite à ciel ouvert, ce qui a lieu chaque fois qu'on attaque un grand amas, ou bien une couche puissante voisine de la surface, on se borne presque exclusivement au dégagement des abords du gîte et à l'attaque des terres et des roches qui le couvrent et l'avoisinent.

Les couches qui couvrent un gîte sont assez généralement faibles : ce sont des terres végétales, des sables, des pierres décomposées et des alluvions ; celles qui l'avoisinent sont presque toujours plus consistantes et exigent un abatage plus coûteux.

Le principes généraux qui président à l'excavation à ciel ouvert, sont de dégager le gîte et ses abords, de ménager des rampes pour les transports et de faire les tranchées et les canaux nécessaires pour l'écoulement facile des eaux de pluie et de celles d'infiltration.

Le dégagement, du gîte au moyen de l'abatage et des tranchées coûte, dans de bonnes conditions, les prix suivants :

Terre végétale.	0 fr. 70
Terre franche	1 00
Terre glaise.	2 25
Roche dure	2 75

le mètre cube.

On emploie la brouette et le tombereau pour le transport hors des tranchées. La brouette porte 60 kilogr. ; ses relais sont de 30 mètres dans une voie horizontale, de 20 mètres sur une rampe qui excède 6 centimètres. Au delà de 100 mètres de distance, on adopte l'usage des tombereaux, dont la dépense ne dépasse que de 50 0/0 celle d'un relai de brouette.

Les roches consistantes sont attaquées d'une autre manière : on isole les blocs par des entailles faites avec le pic, jusqu'à ce qu'ils n'adhèrent plus que par une de leurs faces. Alors, on opère un effort simultané sur toute la longueur de cette face, soit en se servant de coins, soit en plaçant plusieurs coups de mine. Pour que l'ouvrier puisse travailler sans trop de gêne, l'entaille doit être large de 35 centimètres. Cette largeur dépend de la profondeur qu'on veut lui donner.

Travaux souterrains

Nous n'entrerons pas ici dans tous les détails d'exploitation des puits et des galeries dans les travaux souterrains. Nous renvoyons à ce sujet aux traités spéciaux. Nous nous bornerons à donner d'une manière succincte les principes généraux qui en déterminent la direction.

Il faut d'abord atteindre le gîte et y établir des

travaux préparatoires qui permettent de réunir et d'épuiser les eaux qui suintent à travers les roches, de donner de l'air aux mineurs occupés de l'abatage des minerais et d'amener au jour les matières utiles qui résultent du travail souterrain. On doit atteindre le gîte à sa plus grande profondeur possible dès l'abord, de manière qu'à n'avoir plus qu'à remonter. Cela donne plus de durée et d'avenir aux excavations profondes dans lesquelles se trouvent naturellement placés les moyens de transport souterrain et le centre d'aéragé. Commencer par le haut, ou à une petite distance du sol, c'est vouloir recommencer, par étages successifs et de temps en temps, tout l'ensemble des travaux qui constituent l'exploitation souterraine proprement dite.

On commence par s'assurer de l'inclinaison du filon ou de la couche ; puis on fonce sur cette inclinaison et non en dehors, un puits vertical, qui doit rencontrer le minerai à une profondeur qu'il est facile à calculer, à peu de chose près. Ce puits doit être très profond, attendu qu'il est destiné à recevoir les eaux qui de là seront puisées et remontées à la surface du sol. Pour cela, on le termine, dans son extrémité inférieure, bien au-dessous et au mur du gîte qu'il coupe à angle aigu. Cette extrémité se nomme le *puisard*, où se réuniront toutes les eaux des travaux supérieurs.

Cela fait, on commence l'attaque du gîte ; on le divise en massifs par des galeries, et, au besoin, par des puits, et on détache ces massifs sur deux de leurs faces. Si le filon est à peu près parallèle à la surface du versant de la montagne, on perce, à

partir du grand puits et un peu au-dessus du niveau des plus hautes eaux de la vallée, une galerie qui va aboutir au jour et qui sert à la fois de galerie de décharge du minerai ou des gangues, et de galerie d'écoulement des eaux ; si l'inclinaison du filon ou de la couche est opposée à celle des versants, le meilleur moyen d'exploitation consiste dans des puits et des galeries de traverse qui rejoignent sans cesse le gîte à ses différents niveaux. Si les travaux, au lieu d'être ouverts dans les roches encaissantes, étaient foncés dans le minerai même, on serait forcé de réserver du minerai pour empêcher les éboulements. Cela s'évite en établissant les puits et les galeries au delà du filon métallique lui-même.

Quelquefois, mais rarement, il est avantageux d'établir, dans le sens de l'inclinaison, des galeries inclinées nommées *descenderies* ou *fendues*, parce qu'elles permettent d'extraire dès le début de l'exploitation ; mais ce moyen doit être rarement employé, parce qu'en outre qu'il exige des réserves de minerai pour soutenir le toit, il oblige à des roulages, des épuisements et des extractions beaucoup plus dispendieux.

La division en massifs de minerais consiste à pousser, dans le gîte même, et dans le sens de sa direction, des galeries d'allongement, en leur donnant une pente de quelques millimètres par mètre pour le service des eaux. Ces galeries placées les unes au-dessus des autres, s'appuient en partie sur le mur et en suivent par conséquent toutes les ondulations ; de 50 mètres en 50 mètres on communique d'une galerie à l'autre par des bures d'incli-

naison dans le minerai même, en sorte qu'il se trouve divisé en parallépipèdes d'une certaine dimension. Cette série de percements constitue les *travaux préparatoires*. Ce n'est qu'après les avoir bien établis, qu'on procède à l'*abatage* et à l'*extraction*.

Abatage

La puissance, l'inclinaison, l'allure en un mot, du gîte ferrifère, indiquent le mode d'abatage à employer.

Pour les couches dont l'épaisseur est moindre que trois mètres, la méthode dite à *gradins droits* est la plus convenable. Elle consiste à attaquer le massif, disposé par les travaux préparatoires, en le divisant en petits parallépipèdes de 2 mètres sur 4 mètres.

On les abat successivement en donnant au front d'attaque la disposition d'un escalier, chaque gradin représentant un de ces parallépipèdes; on boise le vide qui se fait avec des étais allant du toit au mur, et on fait sur ces étais des planchers destinés à recevoir les déblais stériles. Le minerai auquel on fait subir un pareil triage descend de gradin en gradin, jusqu'au puits de recette.

La méthode à *gradins renversés* est inverse de la précédente. Les massifs sont attaqués par leur partie inférieure, ce qui facilite beaucoup l'abatage; un boisage solide établi au-dessus de la galerie d'allongement supporte les déblais. Les remblais forment des planchers sur lesquels s'élèvent les mineurs, ce qui maintient la disposition en gradins. Les boisages de soutènement provisoires

s'enlèvent à mesure qu'on peut les remplacer par des remblais. Dans les couches peu inclinées, on procède quelquefois par gradins, mais leurs axes successifs se trouvant dans le plan des couches, on s'appuie nécessairement sur le mur et l'on y dépose les déblais.

Les minerais en masse et qui forment des amas très volumineux sont attaqués par des galeries de *traverse* qui vont joindre l'amas. On conduit dans la couche même une galerie d'allongement, d'où partent des ramifications qui enlèvent toute la section horizontale. Quand le minerai de cette section est épuisé, on la comble et on perce au-dessus des galeries semblables. On continue ainsi, en ayant soin de remplir de remblais les galeries abandonnées, et même, lorsque le minerai est friable, de laisser des piliers de soutien, soit en bois, soit en pierres.

Boisage

La décomposition, l'action des eaux, la poussée latérale des terres, le poids des masses supérieures, sont autant de causes qui ôtent de la solidité aux galeries. Il faut donc en soutenir les parois et leur donner de la force. Cela se fait par le muraillement ou le boisage. Nous nous occuperons uniquement de celui-ci comme présentant seul des difficultés.

Les bois qui servent au soutènement ne sont exposés qu'à deux efforts actifs : l'écrasement et la flexion. Le premier effort ne s'exerce que lorsque la longueur de la pièce a moins de cinq fois son diamètre. Au delà, la résistance absolue à l'écrase-

ment se transforme en résistance relative et le rôle de la flexion commence. Le calcul de l'effort que les bois ont à supporter est facile en théorie ; mais on ne peut guère y avoir égard dans la pratique. La nécessité de prévoir le cas où une des pièces de soutènement viendrait à manquer par suite d'altération, oblige à multiplier le nombre des pièces et à employer un excès de force.

En écorçant les bois, on croit leur éviter toute cause d'altération. Dans ce cas, il vaudrait mieux les écorcer sur pied, avant de les abattre, cela consoliderait l'aubier ; il est bon de ne pas les équarir et employer de préférence des bois jeunes. L'emploi des liquides préservateurs est un très bon moyen. Les essences les meilleures pour le boisage doivent être choisies dans l'ordre suivant : chêne, sapin rouge, hêtre, pin, sapin blanc ; il faut éviter de laisser dans les bois employés des cavités ou des traits de scie, par lesquels l'eau pourrait s'infiltrer dans le corps de la pièce. Le meilleur moyen de les couper, c'est à la hache ou à l'herminette. En tout cas, c'est un bon moyen que de les goudronner à chaud.

Les principes généraux du boisage sont ceux-ci :

- 1° Employer les pièces les plus courtes possibles ;
- 2° En encastrent solidement les extrémités et ne laisser aucun jeu ;
- 3° Répartir la charge le plus uniformément qu'on peut sur toute la pièce ;
- 4° Tourner les surfaces planes vers les rochers ;
- 5° Eviter les alternatives de sécheresse et d'humidité.

Le boisage d'une galerie se compose de *cadres* et de *garnissage* en planches; la pièce supérieure se nomme *chapeau*; les deux côtés, *montants*, et la pièce inférieure, *semelle*. Lorsque le mur est solide, on ne se sert pas de semelle; quelquefois même, on ne pose qu'un montant et on place l'extrémité du chapeau dans une cavité nommée *potelle*. Enfin il y a des cas où on peut se passer des deux montants. On donne à l'épaisseur des bois de 0,16 à 0,20. Les chapeaux doivent toujours être plus forts que les montants.

Le boisage des puits est composé de quatre pièces qui se croisent à angles droits et qui sont soutenues par des entailles, des chevilles ou des clous. Ces pièces, espacées les unes des autres comme des cadres, sont reliées par des planches fortement clouées qu'on nomme *coulans*, si elles sont placées à l'intérieur du puits, du côté opposé à la roche.

L'endroit où les galeries viennent aboutir au puits et où la benne passe, se nomme *chambre d'accrochage* ou *recette*.

Aérage

L'air est très facilement vicié dans les galeries; la respiration des ouvriers, la combustion et la fumée des lampes, la décomposition des roches et des bois, l'emploi de la poudre et de la dynamite, l'introduction des gaz délétères, sont autant de causes qui obligent à renouveler sans cesse l'air et à l'entretenir constamment respirable.

Lorsque les galeries sont inclinées, la chaleur du corps suffit pour dilater l'air intérieur et le faire remonter le long du toit vers la partie supé-

rieure ; mais au bout de 150 à 200 mètres de profondeur, si l'inclinaison est légère, la chaleur des roches fait équilibre à celle du corps humain, et l'effet dynamique du gaz n'est plus produit. Dans ce cas, comme dans les galeries horizontales, on établit deux ouvertures verticales ou cheminées, placées à distance l'une de l'autre, et dont l'une a son orifice extérieur plus élevé que celui de l'autre. Quelquefois, on laisse entre le plancher artificiel de la mine et le sol naturel du terrain, un vide continu qui débouche également au jour et porte l'air froid dans le fond de la galerie : l'air chaud sort alors par le haut de la galerie principale ou par un puits pratiqué à cet effet.

A mesure que les travaux deviennent plus profonds et se développent, l'aérage spontané est plus difficilement applicable ; il faut alors avoir recours à l'aérage artificiel. Celui-ci consiste à établir un double courant d'air au moyen du feu, qui dilate l'air respiré, le force à monter dans un puits ou conduit à ce destiné et fait ainsi affluer l'air froid extérieur pour le remplacer.

Quant aux moyens mécaniques employés pour refouler l'air froid dans les excavations ou en aspirer l'air chaud, ils ont pour conditions : 1° de déplacer de grands volumes d'air ; 2° de leur imprimer de faibles vitesses ; 3° n'en guère augmenter la pression. On se sert à cet effet de machines soufflantes et de ventilateurs.

La vitesse de l'air dans les travaux ne doit pas dépasser 1 m. 20 par seconde ; la moitié de cette vitesse est la plus convenable. La quantité d'air à introduire, et par conséquent toutes les conditions

mécaniques de l'aérage, se calculent d'après les sections des travaux, leur profondeur, le nombre des ouvriers et des lumières.

Transports

Le transport des minerais dans les exploitations s'effectue à l'aide de l'homme, du cheval ou de la traction mécanique. L'homme se charge de paniers, de hottes ou de sacs ; il porte à la brouette, pousse ou traîne un traîneau à patins ou des chariots à roues. Le tout sur le sol ou un chemin en bois ou en fer à ornières.

Porteur, il charge de 40 à 60 kilogr. sur une pente maximum de 45 degrés ; ses relais sont de 60 à 80 mètres ; il produit ainsi un effet utile de 300 kilogr. portés à 1,000 mètres de distance.

A la brouette, l'effet utile est de 500 kilogr. à 1,000 mètres en 8 heures de temps. La brouette est chargée de 50 kilogr. Quant au trainage l'effet est double. Le chariot pèse 30 kilogr. et la charge de 60 à 80 kilogr. ; sur les chemins à ornières et poussé par un enfant et un homme, l'effet utile est de 1,400 kilogr. Avec un cheval, sur un chemin de mine ordinaire, l'effet s'élève à peine à 2,800 kilogr. en 8 heures ; sur un chemin de fer il va jusqu'à 30,000 kilogr. Nous n'allons pas nous étendre davantage sur ces questions que les lecteurs intéressés trouveront à consulter utilement dans des ouvrages spéciaux.

IV. PRÉPARATION DES MINÉRAIS

Les minerais tels qu'ils sortent des mines sont mélangés avec les roches qui forment leur gangue, avec des terres dans lesquelles ils sont empâtés ; leurs fragments sont quelquefois si gros, qu'il faudrait une grande perte de temps et de combustible pour parvenir à les chauffer en cet état ; enfin, ils contiennent de l'eau, de l'acide carbonique, du soufre, du phosphore, etc., qui produisent de mauvais effets dans les fourneaux. Il est donc nécessaire de les ramener à un état plus propre au traitement qu'ils doivent éprouver, et c'est ce qu'on appelle la préparation des minerais.

On réduit les gros morceaux en fragments plus petits par le *cassage* et le *bocardage* ; on sépare la gangue et les roches par le *triage* : on enlève la terre par le *lavage* à l'eau, et enfin on vaporise par le *grillage* l'eau et les substances volatiles que la mine contient.

Cassage

L'opération du *cassage* a pour but de faciliter soit l'action des agents métallurgiques, par exemple la réduction, soit les opérations ultérieures comme le *triage* et le *lavage*.

Le *cassage* s'opère soit avant toute autre opération, soit après le *lavage*, et quelquefois même après le *grillage*. On casse en morceaux d'autant plus petits que la masse est plus compacte.

Le *cassage* se fait soit à la main, soit mécaniquement, mais le *cassage* à la main est généralement employé, car il donne moins de menus. Pour cette

opération l'ouvrier est muni d'un marteau de cassage ayant un côté rectangulaire et l'autre taillé en biseau, à l'aide duquel il casse les morceaux sur un billot de pierre dure ou mieux de fonte. Souvent il emploie la masse ou un gros marteau.

Le cassage mécanique s'opère soit avec des marteaux basculants, dits *martinets*, soit au bocard, soit au concasseur Black.

Nous passons sous silence les martinets et les bocards, qui présentent l'inconvénient de donner beaucoup de poussière et nous allons donner la description du concasseur Black.

Concasseur Black

Il se compose (fig. 6) de deux mâchoires A B, ondulées à leurs faces internes, dont une celle A est fixe et l'autre B mobile, actionnée par une manivelle M articulée à rotule à la bielle motrice. Un ressort puissant R rappelle toujours en arrière la mâchoire mobile B, il sert en outre à maintenir la barre F dans son logement et l'empêche de toucher.

En déplaçant le coin C, suspendu à une vis, on change la grosseur du minerai cassé. On obtient le même résultat en allongeant les barres F.

L'appareil marche à 200 tours par minute et peut travailler de 60 à 100,000 kilogr. de minerai en 12 heures avec une dépense de force motrice de 5 à 10 chevaux à l'heure.

Triage

L'opération du triage se fait généralement à la mine même et non pas à l'usine. Il s'effectue pour tous les oxydes en roches,

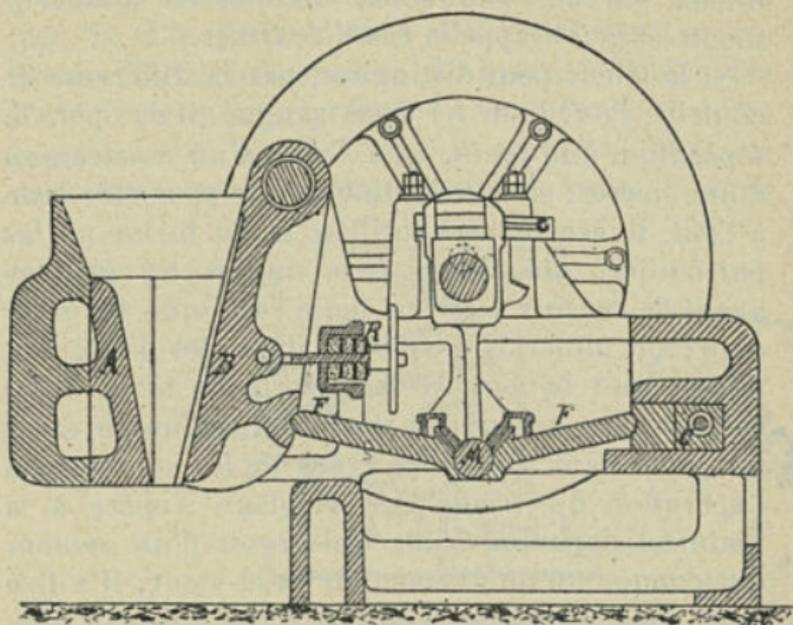


Fig. 6. Concasseur Black.

Cette opération est très facile et on y emploie de préférence des enfants, des femmes ou des vieillards. Elle exige cependant quelquefois une certaine sagacité, une habitude de la mine; mais cette routine s'acquiert bien vite, et un enfant, au bout de quelques jours, peut facilement distinguer, dans presque tous les cas, le minerai de la roche qui l'accompagne.

Le trieur doit être muni d'un marteau de cassage pour séparer grossièrement les portions de roches qui ne renferment aucun minerai et qui servent de gangue au filon. Les parties qui renferment du fer sont portées hors de la mine et mises en tas ou

mieux sur des banquettes divisées en compartiments et qu'on appelle *bancs de triage*.

Si le trieur peut distinguer, par la différence de couleur, l'oxyde de fer de sa gangue, il en opère la séparation à la main, ou à l'aide d'un marteau ou d'une masse ; si cette distinction ne peut être faite à l'œil, il écarte l'échantillon et en forme un tas particulier, qui devra être soumis au grillage avant de revenir sous sa main. Lorsque les morceaux de minerais, exploités dans des lieux humides, sont boueux et recouverts de terre, il les entasse dans un endroit destiné à cet usage et les fait laver dans un crible avant de les soumettre à l'opération du triage. Ce criblage s'opère à la main ou dans un crible qui reçoit d'un moteur quelconque un mouvement de va-et-vient ; il a lieu dans une cuve pleine d'eau ou dans une eau courante telle qu'un ruisseau.

Ainsi le travail du trieur se réduit à cinq opérations : 1° rejeter la gangue ou la pierre qui ne contient aucun minerai ; 2° séparer le minerai attaché à sa gangue ; 3° mettre à part le minerai à griller ; 4° en faire autant du minerai boueux bon à laver ; 5° faire un tas particulier des fragments trop gros qu'il ne peut diviser.

Il est quelquefois utile de trier le minerai en morceaux de grosseurs variées, pour réunir en tas ceux d'une même dimension ; cette opération a lieu après le premier triage et s'appelle *classement par grosseurs*. Il s'exécute à l'aide de cribles ou de grilles en fer dont les ouvertures sont proportionnées aux fragments qu'on veut obtenir. Quelquefois ces grilles sont inclinées et conduisent de l'une

à l'autre comme dans le *crible à double bascule* (fig. 7). Les deux caisses A B reçoivent par les tirants T un mouvement de bascule autour des axes C ; le minerai, placé d'abord dans la caisse supérieure A, descend sur le crible K dont les ouvertures sont les plus grandes ; puis il passe

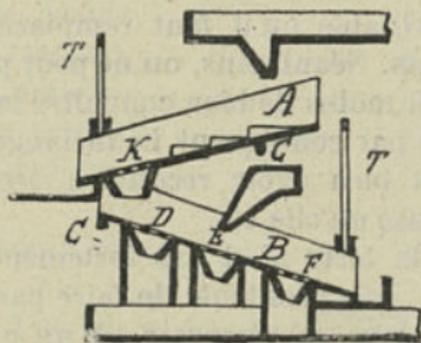


Fig. 7. Crible à double bascule.

dans la caisse inférieure B, où il rencontre les cribles D, E, F, de diverses dimensions, qui le reçoivent et en séparent les fragments.

On fait ordinairement passer un courant d'eau dans les caisses et on opère ainsi tout à la fois le triage de grosseur et le lavage. Cette opération a son avantage, car souvent on a besoin d'avoir des mélanges de gros et de menus dans certaines proportions.

Lavage et débouillage

Chaque fois que le minerai de fer est terreux ou boueux, c'est-à-dire mélangé avec des terres ou empâté dans une substance terreuse forte, on a recours au lavage pour séparer le minerai de fer

des matières étrangères. La plupart des oxydes hydratés et quelques peroxydes sont dans ce cas.

L'opération du lavage n'est pas sans inconvénient : elle enlève aux fers ocreux les parties les plus fines et les plus fusibles ; elle augmente la proportion d'eau dans les hydroxydes ; elle ôte aux minerais terreux, argileux, calcaires, etc., une gangue vitrifiable qu'il faut remplacer par d'autres fondants. Néanmoins, on ne peut pas toujours l'éviter, et à moins de bien connaître la théorie des fondants et par conséquent le mélange des minerais, il faut bien avoir recours à cette méthode toute vicieuse qu'elle est.

Lorsque la terre n'est pas fortement adhérente au minerai, on se contente de faire passer un courant d'eau dans un réservoir où un ouvrier agite continuellement la mine ; l'eau entraîne les terres et une certaine quantité de minerai dans un second bassin, placé plus bas que le premier, et là on recommence à agiter de nouveau et à dégager les terres que l'eau emporte avec elle dans un troisième bassin, où l'on peut continuer encore à laver.

Le lavage a lieu le plus souvent et pour des terres fortes dans un appareil dit *patouillet*. C'est une caisse ou une fosse C (fig. 8) demi-cylindrique qu'on appelle *huche*, à l'axe de laquelle se meut un arbre A portant des bras en fer B et des pelles déversées D. On fait passer dans la cuve G un courant d'eau, en même temps que les bras de l'arbre remuent le minerai qui y est placé et le lavent.

L'arbre fait 8 à 15 tours par minute. L'inconvénient de cet appareil est qu'il emploie beaucoup d'eau qui sort de l'appareil complètement sale,

Si la terre est très forte et adhérente, on fait précéder cette opération de lavage d'un bocardage.

Quand il s'agit d'un minerai présentant des fentes remplies de terre délayable, on s'en débarrasse au moyen d'un débourbeur mécanique.

Il se compose d'un cylindre en tôle de grandes dimensions, pouvant tourner sans être traversé par un axe (il est porté à cet effet par des galets de roulement à gorge s'engageant dans des collerettes fixées sur le cylindre). L'intérieur du cylindre est garni de nervures superposées dans les deux sens ; on y fait arriver l'eau dans un mouvement contraire à celui du minerai.

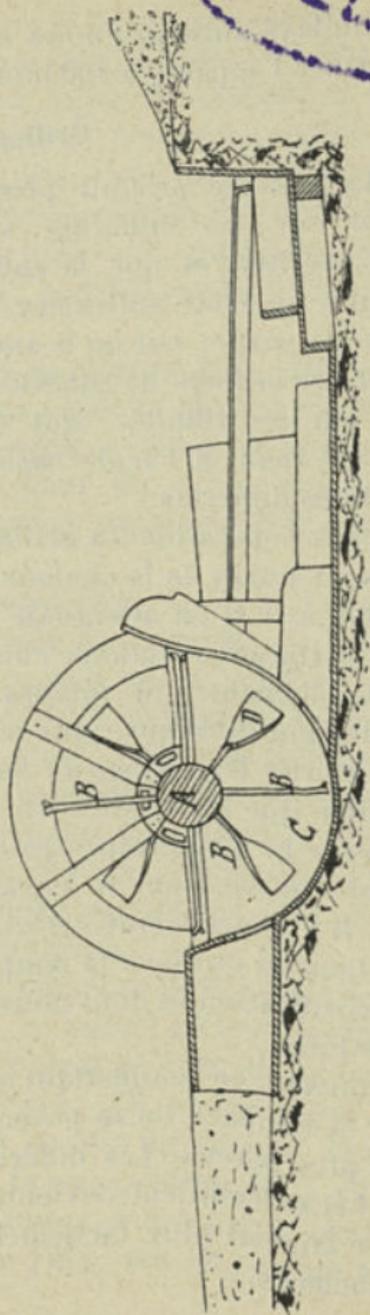


Fig. 8. Patouillet.

On lave ainsi 45 tonnes en 10 heures en faisant tourner l'appareil à 100 tours à la minute.

Grillage

Le grillage produit presque toujours un bon effet sur les minerais, soit qu'ils contiennent des pyrites, et que la calcination convertisse le soufre en acide sulfureux, ce qui en dégage une grande partie, soit qu'il amollisse la gangue, qu'il détruise la force de cohésion et prépare le minerai au jeu des affinités, soit qu'il chasse en grande partie l'eau et l'acide carbonique contenus dans certains minerais.

Dans l'opération du grillage on soumet les minerais à l'action de la chaleur sans arriver jusqu'à la fusion, car si on atteignait ce point, il se produirait certaines réactions chimiques entre les différents éléments du minerai qui rendraient leur traitement ultérieur plus coûteux ; il se formerait des scories ferrugineuses beaucoup plus difficiles à réduire que les oxydes libres. Donc, il faut éviter d'élever la température jusqu'au point où les minerais commencent à s'agglomérer et à se scorifier. Il y a cependant certains cas tout à fait particuliers où on élève la température jusqu'au point de scorification et dont nous allons donner la raison plus loin.

Souvent en soumettant au grillage un minerai dur et compact, on se propose seulement de le rendre plus poreux. Les différents fragments se gercent et se fendillent, deviennent plus faciles à casser et se laissent plus facilement pénétrer par les gaz réducteurs.

Les minerais carbonatés et hydratés sont décomposés par cette opération préliminaire; ils abandonnent leur carbone en oxyde de carbone et en acide carbonique mélangés et il reste un oxyde de fer plus oxygéné que le protoxyde de fer. La température à laquelle la décomposition du carbonate s'effectue est plus élevée (800°) que celle à laquelle commence la réduction; le grillage vient donc en aide à celle-ci.

Le soufre des pyrites se dégage avec difficulté dans les hauts fourneaux; tout ce qu'on y obtient, c'est que la pyrite descende à l'état de protosulfure. Il est le plus important des corps étrangers associés aux minerais qu'on puisse enlever par le grillage.

Les pyrites qu'on rencontre le plus souvent sont: la pyrite Fe S^2 jaune ou blanche, la pyrite magnétique $\text{Fe}^8 \text{S}^9$, la pyrite de cuivre $\text{Cu S}^2 \text{Fe}$, la pyrite arsenicale As S Fe , le sulfure de zinc Zn S , et le sulfure de plomb Pb S . Tous ces sulfures se trouvent fréquemment combinés avec les oxydes magnétiques et les carbonates spathiques. L'opération du grillage produit des effets différents sur le soufre suivant que ce corps appartient à tel ou tel des sulfures ci-dessus indiqués.

Les pyrites jaunes et blanches se décomposent à très basse température, la moitié de leur soufre se volatilise et brûle au contact de l'air en se transformant en acide sulfureux; s'il ne rencontre pas d'oxygène il se dégage en état de vapeur; le sulfure qui reste conserve la composition de la pyrite magnétique et ne se décompose pas par la chaleur tant qu'il est à l'abri de l'air; mis en contact avec

de l'air, il perd une nouvelle quantité de soufre sous la forme d'acide sulfureux et le résidu est un sulfate de fer qui est décomposé lui-même quand la température s'élève davantage (au rouge) et il ne reste que du sesquioxyde de fer.

On voit que théoriquement on peut désulfurer complètement un minerai renfermant des pyrites, mais dans la pratique on atteint rarement ce résultat aussi complet, parce que l'air pénètre difficilement dans l'intérieur des fragments.

Les minerais magnétiques et ceux qui s'en rapprochent sont particulièrement difficiles à désulfurer si la température n'est pas assez élevée pour produire une scorification ; ils restent compacts et imperméables, tandis que les fers spathiques et les sphérosidérites se fendillent et se divisent. La pratique a démontré que ces minerais perdent leur soufre en les portant à la température de scorification et en la maintenant assez longtemps, tandis que l'air arrive en abondance en contact avec le minerai. Le sulfure de fer se liquéfie et coule par les fissures des morceaux de minerais et se décompose au contact de l'oxygène contenu dans le gaz lorsqu'il arrive à la surface.

La pyrite de cuivre $\text{Cu S}^2\text{Fe}$ soumise à un grillage à l'abri de l'air résiste à une chaleur assez élevée, mais exposée à une calcination oxydante elle se décompose et donne des sulfates solubles dans l'eau ; si on continue à chauffer davantage, l'acide sulfurique se dégage et il ne reste plus que des oxydes.

La pyrite arsenicale As S Fe , chauffée au rouge sombre et à l'abri de l'air, perd une partie de son

soufre et de son arsenic en donnant du sulfure d'arsenic; si on élève la température et qu'on opère en présence de l'air, il se produit des sulfates et des arséniates; les sulfates se conduisent comme ceux provenant des pyrites de fer, les arséniates sont indécomposables. Une partie de l'arsenic reste unie au fer et l'accompagne partout; certains minerais calcaires peuvent éliminer l'arsenic en formant des arséniates de chaux.

La blende grillée produit de l'oxyde de zinc et du sulfure de zinc qui n'est détruit qu'à une très haute température; mais comme il est soluble dans l'eau, on peut s'en débarrasser par un bon lavage.

La galène perd une partie de son soufre en état d'acide sulfureux à une température peu élevée et au contact de l'air; le reste s'unit à l'oxyde de plomb et constitue un sulfate qui ne se décompose pas.

On peut donc conclure qu'on peut enlever la plus grande partie du soufre aux minerais qui en sont souillés; que la désulfuration sera d'autant plus complète que l'air affluant sera en plus grande quantité; que par un lavage souvent on arrive à éliminer les sulfates solubles et compléter ainsi l'effet du grillage.

On a essayé d'appliquer la vapeur d'eau à la désulfuration des minerais, mais on a reconnu bien vite que dans ces conditions les résultats obtenus n'étaient pas plus avantageux que par un simple grillage.

Enfin le dernier but qu'on se propose par le grillage, c'est de transformer les oxydes de fer

contenus dans les minerais à l'état de protoxydes en sesquioxydes, car la pratique a démontré que le sesquioxyde était plus sensible à l'action des gaz réducteurs que les oxydes inférieurs et l'oxyde magnétique.

Les fers carbonatés spathiques et les sphérosidérites grillés à l'abri de l'air se transforment d'abord en oxydes magnétiques; chauffés ensuite dans une atmosphère oxydante, ils s'oxydent de plus en plus et passent à l'état de sesquioxyde reconnaissable à sa couleur rouge.

Les minerais magnétiques doivent être soumis beaucoup plus longtemps à l'action des gaz oxydants pour se transformer en sesquioxydes.

Dans la pratique on n'arrive ni pour les uns ni pour les autres à une suroxydation complète, parce que l'air pénètre difficilement et irrégulièrement à l'intérieur des morceaux; on obtient un très bon résultat quand la surface des morceaux est plus grande par rapport à leur volume, quand l'opération a une plus longue durée et que l'air est admis en plus grand excès.

De même on soumet à un grillage préalable les scories ferrugineuses provenant des fours d'affinage ou de soudage pour transformer en peroxyde le fer contenu, partie en protoxyde et partie en sesquioxyde.

De tout ce que nous venons de dire il résulte qu'on ne soumet pas à un grillage préalable tous les minerais et que la plus grande partie d'entre eux est employée à l'état cru. Ce n'est qu'après examen de la nature du minerai et de sa gangue, en même temps que du traitement métallurgique

auquel il doit être soumis, qu'on décide si cette opération préliminaire de grillage a quelque utilité au point de vue du prix de revient.

Dans la plupart des cas les minerais sont passés aux hauts fourneaux en état cru ; si, comme cela arrive bien souvent, le laitier est basique, il a la propriété d'absorber le soufre qui n'a plus une influence nuisible sur le produit, pourvu que le lit de fusion n'en contienne pas une grande quantité ; si au contraire le laitier est peu calcaire et qu'il répond à la formule des bisilicates ou trisilicates, comme dans la plupart des hauts fourneaux au bois, la plus grande partie du soufre passe dans la fonte et nuit considérablement à la qualité du métal. Dans ce cas il est indispensable de griller les minerais contenant des sulfures, si on ne veut pas obtenir un produit sans valeur.

Le grillage s'opère ordinairement dans une atmosphère oxydante ; la présence de l'air en excès est en effet indispensable lorsqu'on se propose d'obtenir une suroxydation ou une désulfuration et ne présente aucun inconvénient si le but qu'on poursuit est différent.

La température la plus convenable n'est pas la même pour le grillage des différents minerais ; elle doit être peu élevée quand on craint une combinaison entre les oxydes métalliques et leurs gangues, comme, par exemple, ceux dont la gangue est quartzreuse. De même les minerais calcaires ; car on sait que le sesquioxyde et la chaux s'unissent lorsqu'ils sont exposés à une forte chaleur et forment une combinaison plus difficile à réduire que l'oxyde seul.

Le grillage ayant pour effet de rendre les minerais plus friables, il est généralement d'usage de ne pas les concasser avant cette opération, car souvent la chaleur les divise suffisamment et l'on évite ainsi des frais inutiles ; si la chaleur ne donne pas ce résultat, on procède alors à un concassage des minerais grillés qui s'opère plus facilement.

S'il s'agit de désulfurer un minerai on doit le concasser avant le grillage, car les gros morceaux offrent moins de surface de contact aux gaz oxydants ; souvent même on fait double grillage, un premier avant le cassage et un autre ensuite dont l'effet est surtout de désulfurer.

L'essentiel est de bien griller le minerai, de manière à le rendre friable et à empêcher que la surface des morceaux ne soit vitrifiée.

Les signes auxquels on reconnaît qu'un minerai a été convenablement grillé sont les suivants : Si dans le minerai grillé on rencontre des parties agglomérées par la scorification, on doit en conclure que la température était trop élevée. La couleur du produit doit être rouge, franche et régulière si l'opération a été bien conduite.

Lorsqu'on brise un fragment de minerai grillé, l'aspect intérieur doit être le même qu'à l'extérieur ; si on y voit un noyau central rappelant les facies du minerai cru, on doit conclure que l'opération n'a pas été assez prolongée ; le minerai grillé doit se rompre facilement ; les carbonates deviennent même friables sous la pression des doigts.

Opération du grillage. — On grille les minerais soit en *tas*, soit dans des fourneaux particuliers dits *fours de grillage* avec toutes les sortes de com-

bustibles solides ou gazeux ; le minerai houiller renfermé assez d'éléments combustibles non seulement pour son propre grillage, mais souvent même pour celui d'autres minerais qu'on mélange avec lui.

Grillage en tas et en stalles. — On a commencé à faire le tas d'une manière analogue à celle des tas où meules de carbonisation. Des pièces de bois de 22 à 27 centimètres de diamètre en forment la base ; au-dessus et transversalement, sont placées des bûches d'une certaine grosseur, et d'autres pièces de bois s'élèvent verticalement et de manière à faire cheminée lorsqu'on les retire du tas.

On dispose sur les premières bûches une couche de fraïsil et l'on étale des couches de minerai et de combustible en les faisant alterner. Puis on couvre le tout d'une enveloppe de poussier de charbon et on met le feu ; le combustible brûle lentement au contact de l'air et grille le minerai. On peut employer comme combustible le fraïsil du charbon de bois, soit de la houille même.

La forme qu'on donne au tas est celle d'une pyramide tronquée à base rectangulaire, de faible hauteur, et comme il est nécessaire que l'air pénètre jusqu'au centre de la masse, on fixe la largeur d'après la grosseur des morceaux du minerai et la résistance qu'ils peuvent opposer au passage des gaz. Pour les minerais ordinaires, on la règle entre 4 et 6 mètres, avec les minerais houillers on va jusqu'à 10 mètres.

Quant à la longueur, elle ne dépend que de la quantité qu'on veut griller et de l'emplacement dont on dispose ; elle atteint souvent 60 mètres,

La hauteur doit être faible pour que les gaz puissent circuler à travers le tas ; elle dépend également de la grosseur des fragments et de leur forme ; elle varie de 1 à 5 mètres, mais dépasse rarement 2 m. 50.

L'emplacement occupé par le tas doit être à proximité du dépôt de minerai ; on le prépare s'il est nécessaire, en terre damée ou en pavés, de façon qu'il soit sec, résistant et uni. Au fur et à mesure que le tas s'élève on a soin de réduire l'épaisseur de la couche de combustible et augmenter celle du minerai, car les lits supérieurs sont chauffés par les gaz provenant de la combustion des couches inférieures.

Si on ne dresse pas autour des tas des murs en gros morceaux, ceux-ci prennent naturellement une inclinaison correspondant au talus d'éboulement des matières employées.

La principale difficulté du grillage en tas, consiste dans la conduite du feu et le moyen d'obtenir une cuisson bien uniforme. Pour cela, on retarde la calcination dans les endroits où elle est trop avancée, en fermant les événements formés par les vides que laissent les bûches ; ou l'on favorise la propagation du feu dans d'autres endroits où la chaleur est peu active, à l'aide de poussier bien sec, ou en facilitant la circulation de l'air. *

Lorsque la longueur du tas est grande on allume à une extrémité, le feu gagne peu à peu en avançant vers l'autre bout ; pendant ce temps on enlève au fur et à mesure la partie grillée et sur le même emplacement, on peut commencer à reconstruire le tas avant que la cuisson du premier ne soit ter-

minée; il faut quinze jours pour le grillage d'un petit tas et celui des grands dure un mois.

La quantité de combustible consommé dépend de la nature du minerai, de la dimension du tas et de la température qu'on veut obtenir. On peut compter 100 kilogr. de houille par 1,000 kilogr. de minerai grillé et 0 fr. 50 à 0 fr. 60 de main-d'œuvre.

Le combustible est mal utilisé; les parois du tas et la partie supérieure étant à découvert se trouvent refroidies par le contact de l'air sans cesse renouvelé; en outre la marche de la combustion est soumise à l'influence de tous les agents atmosphériques, notamment à celle du vent dont la violence et la direction varient; aussi arrive-t-on rarement à griller d'une manière uniforme toutes les parties d'un tas; même par un temps sec et calme, les irrégularités sont très difficiles à éviter, les parties supérieures du tas chauffées par les gaz des couches inférieures sont souvent portées à une très haute température; on y rencontre des parties presque fondues et d'autres mal cuites.

Dans les forges des côtes d'Espagne, on calcine le minerai à un degré très élevé; il perd totalement sa couleur d'oxyde, devient semblable au fer oligiste grenu, gris, à éclat métallique et brillant, et attire fortement l'aiguille aimantée. Cet éclat cependant n'est qu'extérieur; à l'intérieur, le minerai est gris métalloïde, beaucoup moins brillant; sa cassure est grenue; il ne se laisse rayer que difficilement par le fer.

En cet état sa pesanteur spécifique est 4,246. C'est, suivant les fonderies, le degré qui convient le mieux; c'est celui qui rend le plus de fer.

Ce mode de grillage est presque complètement abandonné aujourd'hui à cause des inconvénients que nous avons cités plus haut et à cause de la dépense assez élevée en combustible. On y recourt seulement pour les minerais houillers qui portent avec eux le combustible nécessaire à l'opération, ce procédé ayant pour lui une grande simplicité et des frais d'installation insignifiants.

Pour diminuer les inconvénients que nous venons de signaler, on a limité les tas par des murs de faible hauteur percés d'un certain nombre d'ouvertures pour l'admission de l'air; c'est le mode de *grillage en stalles* ou en *cases* dans lesquelles on règle l'entrée de l'air, en fermant plus ou moins les ouvertures à l'aide de briques. Mais la dépense nécessitée par la construction de ces murs n'est pas compensée par les avantages qu'on obtient par ce procédé; aussi le grillage en stalles est plus rarement employé que les simples tas.

Grillage dans les fours. — Aujourd'hui le grillage s'opère presque exclusivement dans des fours à cuve assez semblables à ceux que l'on emploie pour la chaux.

En Toscane, où l'on fond les minerais de l'île d'Elbe, les fourneaux de grillage ont la forme d'un cône tronqué dont la base est tournée en haut. Les dimensions de ces fourneaux varient souvent, mais celles qui paraissent les plus convenables sont les suivantes :

Diamètre supérieur.	2 ^m 92
Diamètre inférieur	1 ^m 46
Hauteur	1 ^m 62

Une ouverture est ménagée à la partie inférieure afin de livrer passage à l'air et de pouvoir retirer le minerai grillé. La chemise intérieure de la cuve est faite en briques réfractaires, mais le mur extérieur est bâti en briques ordinaires. Le fond du fourneau est élevé d'un mètre au-dessus du sol, afin de faciliter le travail de l'ouvrier qui retire le minerai grillé.

Avant de commencer à charger le fourneau, on forme, à l'intérieur et tout autour de la porte, une espèce de voûte avec de gros morceaux de minerai. Cette précaution est nécessaire pour empêcher l'obstruction de l'orifice et en même temps pour ménager un passage au courant d'air. On jette ensuite du charbon que l'on dispose en couche et qu'on allume aussitôt ; puis on place une couche de minerai sur le charbon incandescent ; on remplit ainsi la cuve de couches successives de houille et de minerai.

Pour que le feu ne s'éteigne pas pendant le remplissage de la cuve, on doit procéder avec d'autant plus de lenteur que le four est plus élevé et que le minerai a plus de tendance à se tasser.

On peut employer également les combustibles gazeux pour le grillage dans les fours. Si ce gaz provient des hauts fourneaux ou de gazogènes spéciaux, il pénètre dans le four par des ouvertures ménagées à la partie inférieure ; l'air arrive par les orifices qui servent à l'extraction du minerai grillé, il passe donc ainsi à travers les matières encore chaudes, les refroidit et ramène à l'intérieur du four la chaleur qu'il leur enlève.

On établit souvent en outre des ouvertures sup-

plémentaires pour l'admission de l'air, surtout lorsqu'on veut opérer un grillage très oxydant ; le tirage s'établit par le four lui-même, qui fait office de cheminée,

L'emploi du gaz comme combustible présente, en outre des autres avantages dont il a été déjà question, un tout spécial aux fours de grillage, qui est d'empêcher le minerai de se mélanger avec les cendres du combustible ; le chauffage au gaz permet, en outre, d'arriver plus facilement aux températures élevées et aux actions oxydantes si favorables à la désulfuration complète des minerais pyriteux.

Dans beaucoup d'usines on donne la préférence aux combustibles solides, car dans la plupart des cas les menus charbons qu'on y utilise sont sans grande valeur et leur transformation en gaz exigerait une installation coûteuse de gazogènes d'une conduite assez délicate.

La forme et les dimensions des fours de grillage employés sont très variées, et comme cette opération ne s'applique en réalité qu'aux minerais carbonatés et magnétiques, ce n'est que dans les contrées où les gisements de ces matières sont abondants qu'on rencontre ces différents fours,

Lorsqu'on a à établir un four de grillage, on doit se préoccuper de rendre le gueulard accessible aux ouvriers et aux wagonnets ; pour cette raison et quand le terrain est accidenté, on établit le four en contre-bas des dépôts des matières premières, de façon que la plate-forme du gueulard soit au même niveau que ces derniers. Si le terrain ne se prête pas à cette disposition, et quand la hauteur du

four est grande, on établit des plans inclinés ou des monte-charges pour le service de chargement.

La marche de l'opération est simple. Le feu étant mis à des intervalles réguliers, variant de 1 à 2 heures pour les fours à gaz, de 6 à 12 pour les autres, on retire par le bas une certaine quantité de minerai grillé, on provoque ainsi la descente des matières qui remplissent la cuve ; on comble le vide produit à la partie supérieure du four, en ayant soin de recouvrir de minerai la dernière charge de combustible.

Dans les fours alimentés avec des combustibles solides la combustion se propage de bas en haut, et quand le moment arrive de retirer le minerai grillé par la partie inférieure, la couche supérieure du combustible est incandescente si le four est peu élevé.

Dans les fours à gaz, la combustion a toujours lieu dans la même zone, tant qu'on ne modifie pas les arrivées de gaz et d'air, on y obtient donc facilement une température élevée, et si les minerais ont tendance à se scorifier, il peut se produire des voûtes qui empêchent la descente régulière des charges ; il faut dans ce cas briser avec des ringards ces masses agglomérées pour maintenir le fonctionnement de l'appareil ; on ménage à cet effet des ouvertures un peu au-dessus des entrées d'air.

La mise en feu d'un four chauffé au gaz s'opère de la façon suivante : on commence par mettre des morceaux de bois ou des matières facilement inflammables près des entrées d'air et contre les parois ; au milieu, on met un mélange de minerai et

de charbon et on remplit la cuve au tiers de sa hauteur du même mélange. On allume le bois et on continue à charger peu à peu en minérai, et lorsque le bas du four est bien rouge, on y introduit le gaz combustible et la marche de l'opération s'effectue normalement.

Nous allons donner la description des principaux fours de grillage employés aujourd'hui :

Four de Siegen. — C'est le plus simple des fours de grillage, composé uniquement d'un cône tronqué A (fig. 9) porté par trois pieds. La forme conique rend plus uniforme la circulation de l'air qui se répartit d'autant mieux, qu'il pénètre plus près de l'axe du four, tandis que dans les cuves cylindriques, il a toujours tendance à suivre les parois.

Lorsque le four est en travail, la partie inférieure est occupée par du minérai grillé en train de se refroidir; ce minérai étant enlevé, est remplacé au fur et à mesure, par d'autre qui descend de la cuve.

Les fours de ce genre sont employés avec succès pour le grillage des minerais spathiques, les sphérosidérites et les minerais houillers. Leurs dimensions courantes sont :

Diamètre en haut	2 ^m 85
Diamètre en bas	1 ^m 61
Hauteur	3 ^m 20

Le bas du four est à 78 centimètres du sol et leur production est considérable. Ainsi, un four de 15 mètres cubes de capacité, peut griller jusqu'à 20,000 kilogr. par jour de fer carbonaté,

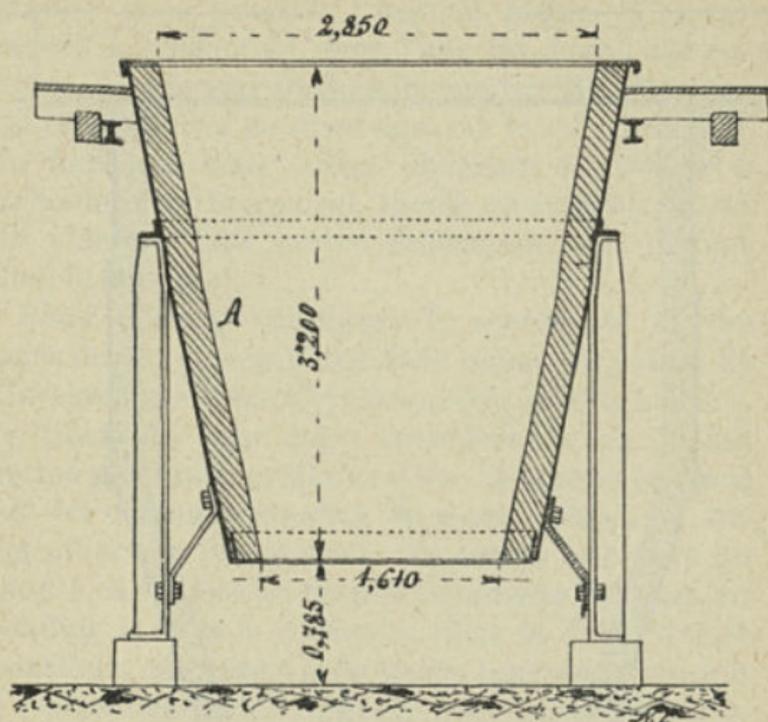


Fig. 9. Four de grillage, Siegen.

Les dimensions de ces fours sont limitées, car on ne peut augmenter outre mesure le diamètre du gueulard sans rendre le chargement très difficile sinon impossible. On adopte par conséquent la forme du four de grillage dit de la Haute-Silésie.

Four Borrie. — Ce four est représenté figure 10 et sa partie supérieure A est cylindrique et le bas reste conique. Ce four est employé pour le grillage des fers spathiques et magnétiques. Un four ayant 36 mètres cubes de capacité, grille de 16 à 17,000 kilogrammes par 24 heures, avec une consommation de 50 kilogr. de houille par 1,000 kilogr. de

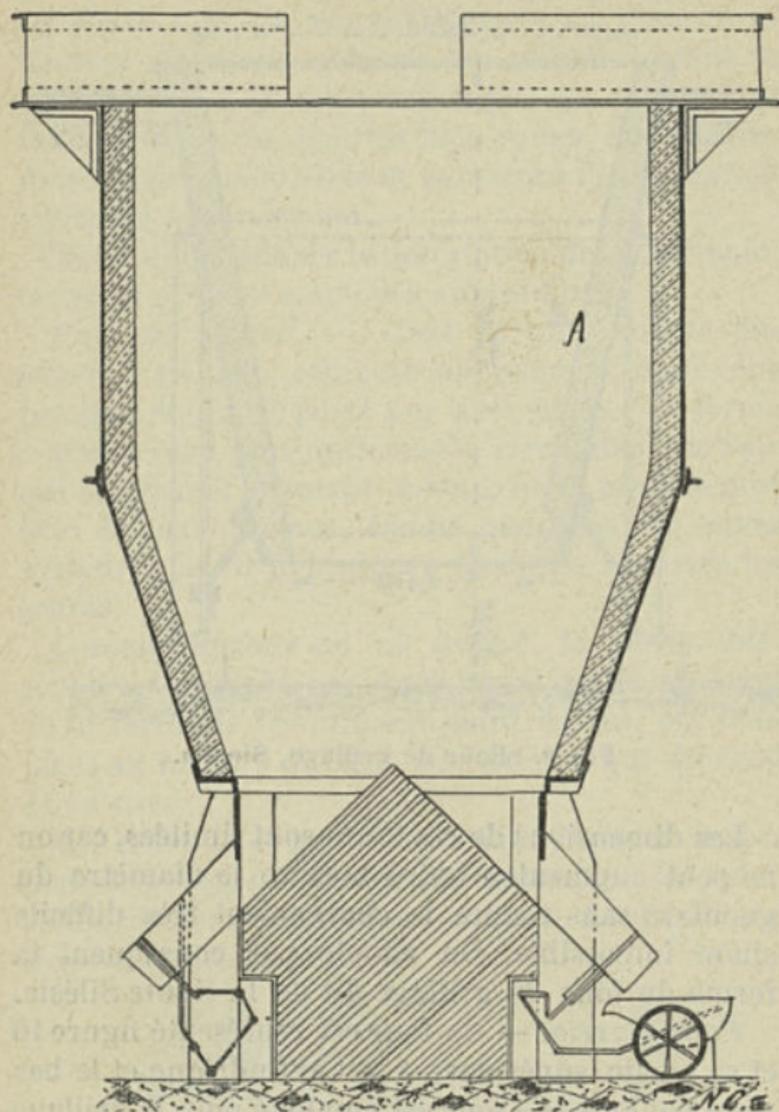


Fig. 10. Four Borrie du Cleveland.

mineral grillé. Si on augmente encore le diamètre l'air rencontre une résistance de plus en plus

grande pour pénétrer jusqu'au centre et on est exposé à rencontrer dans l'axe du four, une colonne de minerai imparfaitement grillé. On évite cet inconvénient en disposant sur le sol, dans l'axe du four, un cône creux obligeant le minerai à s'ébouler extérieurement, tandis qu'au centre reste un vide où l'air arrive facilement; on obtient ainsi le four *Gjers*.

Four Gjers. — La figure 11 représente un des fours de ce type employé dans plusieurs usines du Cleveland pour la calcination des sphérosidérites. Le poids du four étant considérable, on le fait porter par l'intermédiaire d'une couronne en fonte sur des colonnes courtes de même métal, ou sur des piliers en maçonnerie. Au centre se trouve un cône A, à l'intérieur duquel on amène l'air par un conduit B et de là il pénètre dans le four. Sur le pourtour, on réserve de petits regards C servant à l'introduction des ringards pour briser les agglomérations qui pourraient se produire pendant le travail.

Au-dessus du gueulard, on fait arriver deux voies parallèles à écartement normal de sorte que les wagons qui apportent le combustible et le minerai viennent se placer directement au-dessus de la cuve et y laissent tomber la charge qu'ils contiennent. Des plates-formes établies entre les voies permettent aux ouvriers l'accès et la manœuvre des wagons qui sont ceux du chemin de fer.

La hauteur de ces fours varie de 9 à 15 mètres. Leur diamètre le plus grand varie entre 6^m 80 et 7^m 50 et leur capacité de 230 à 450 mètres cubes. On y brûle 40 kilogrammes de houille menue par

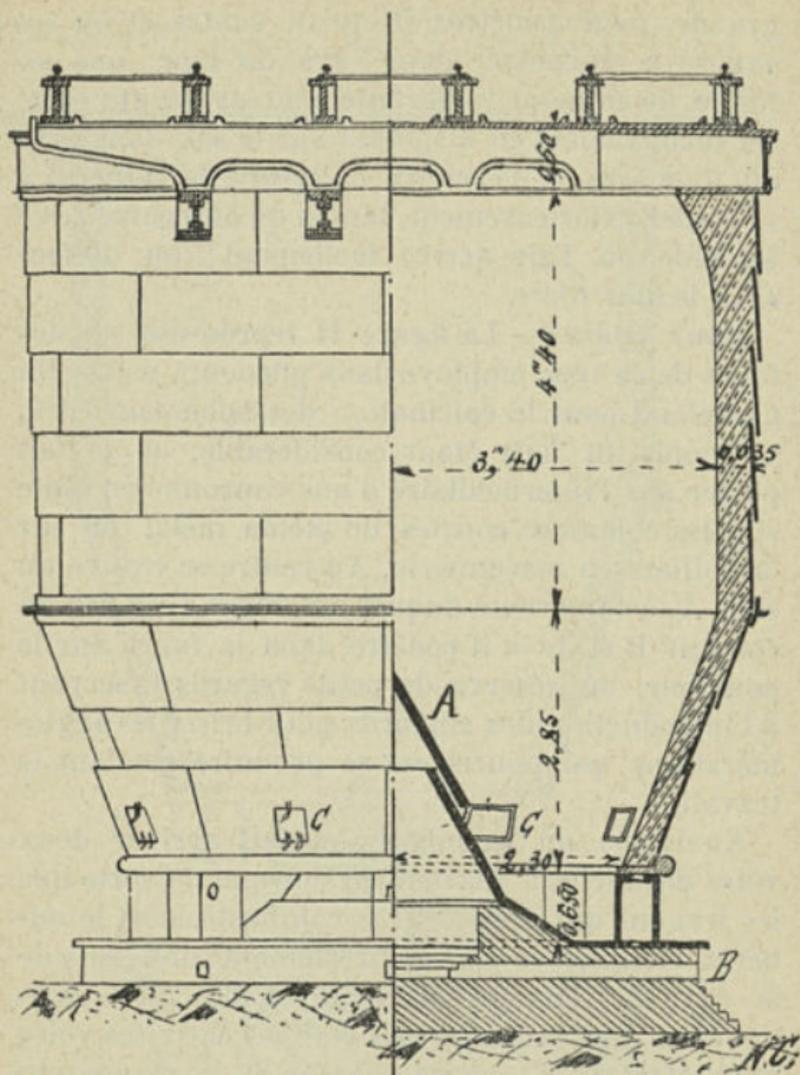


Fig. 11. Four de grillage Giers (Cleveland).

1,000 kilogrammes de minerai grillé. Le plus petit de ces fours grille 100 tonnes par vingt-quatre heures, et le plus grand 160 tonnes.

Four de grillage des hauts fourneaux de Ria ou four F. Wagner. — Ce four, représenté figures 12 et 13, a été construit pour le grillage des minerais de fer carbonatés spathiques, et est employé

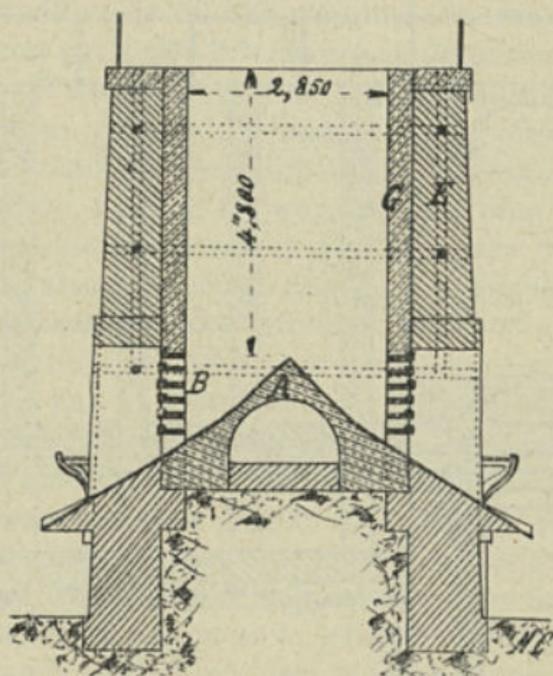


Fig. 12. Four Wagner (coupe transversale).

aux usines de Ria (Pyrénées-Orientales), à Erzgebirge et autres centres industriels.

Ce four est formé d'une enveloppe E épaisse qui entoure la chemise réfractaire G. La grille B se termine à la partie inférieure par des gradins en fortes plaques de fonte encastrées dans la maçonnerie, au-dessus des deux ouvertures par lesquelles s'opère l'extraction du minerai grillé. Ces gradins

rétrécissent la cuve et permettent à l'air un passage facile dans le four.

Un massif en maçonnerie A formé de deux pentes en sens inverse l'une de l'autre facilite la sortie

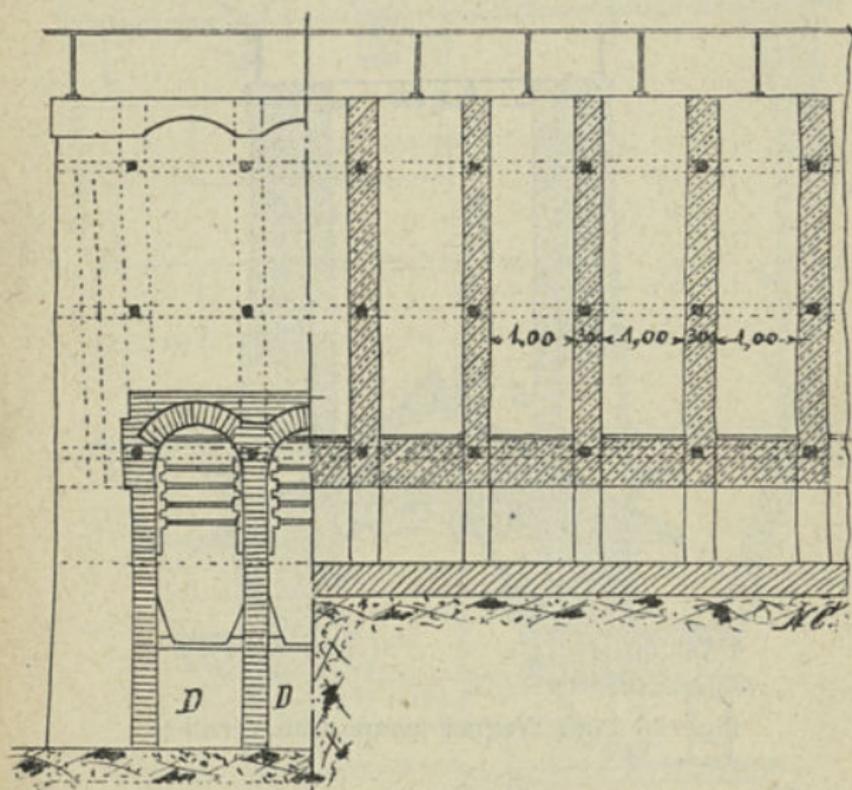


Fig. 13. Four Wagner (coupe longitudinale).

du minerai de chaque côté en dessous des grilles. Le minerai grillé est reçu dans des wagonnets qui arrivent à la base du massif par l'intermédiaire de couloirs D.

Les dimensions d'un pareil four sont les suivantes :

Longueur	4 ^m 50 à 6 ^m 50
Largeur	2 ^m 85
Hauteur	4 ^m à 5 ^m

Les plus grands ont 85 mètres cubes de capacité et produisent 15 à 20,000 kilogrammes avec une consommation de 50 kilogrammes de charbon de bois menu par 1,000 kilogrammes de minerai cru.

Four Westman. — Les fours Westman sont employés au grillage des minerais magnétiques en gros morceaux à une température voisine de la scorification. Ce sont les appareils les plus remarquables qu'on a rencontrés pour ce genre d'opération, en raison de leurs dimensions considérables et l'importance de leur production. Aussi, depuis son apparition en 1851, ce type n'a cessé de se substituer aux anciens fours.

En Suède, ces fours sont chauffés exclusivement avec les gaz des hauts fourneaux ; ils pourraient l'être aussi bien avec du gaz de gazogène pourvu qu'il ne contienne pas une trop forte proportion de vapeur d'eau. Mais, comme nous l'avons déjà dit, l'emploi du gaz pour le grillage ne se justifie que quand celui-ci n'a pas d'autre application, qu'il est disponible et ne coûte rien. La désulfuration qui résulte de la haute température de tels fours n'a d'intérêt que quand les fourneaux marchent au charbon de bois, à moins cependant que les minerais ne soient très chargés en soufre. Quoique ce four n'est employé que dans les régions où l'on traite au charbon de bois des minerais magnétiques, nous allons donner sa description parce qu'il peut prendre rang parmi les plus intéressants appareils de l'industrie du fer,

Le profil de la cuve est disposé (fig. 14) tout différemment de celui des autres fours marchant à basse température; il est évasé vers le bas pour éviter ou, tout au moins, rendre plus difficile la formation de voûtes d'accrochage et pour aider la descente des matières. Cet évasement est plus accentué encore dans la zone de grillage, immédiatement au-dessus des orifices d'entrée de gaz, là où les minerais commencent à se ramollir, grâce à la haute température qui règne dans cette région.

Le four est construit avec chemise réfractaire A et enveloppe extérieure B en briques ordinaires. La chemise réfractaire est portée par un anneau en fonte formé de plusieurs parties, dont chacune forme le linteau d'une des ouvertures C, par lesquelles on extrait le minerai grillé, et est encastrée dans les parties pleines qui séparent ces ouvertures. Les gaz arrivant des hauts fourneaux descendent par deux tuyaux E aboutissant à un tuyau horizontal D, qui forme ceinture autour du four et repose sur une partie avancée G de la maçonnerie, au-dessus des orifices C de déchargement.

De cette conduite générale D, le gaz est distribué par des petits tuyaux F dans des carneaux verticaux H ménagés dans l'épaisseur de la maçonnerie, puis pénètre dans le four par les carneaux horizontaux I disposés immédiatement au-dessus de l'anneau, débouchant à l'intérieur du four et fermés extérieurement par des portes ou des clapets, qu'on peut ouvrir lorsqu'on veut atteindre avec les ringards le minerai à l'intérieur de la cuve.

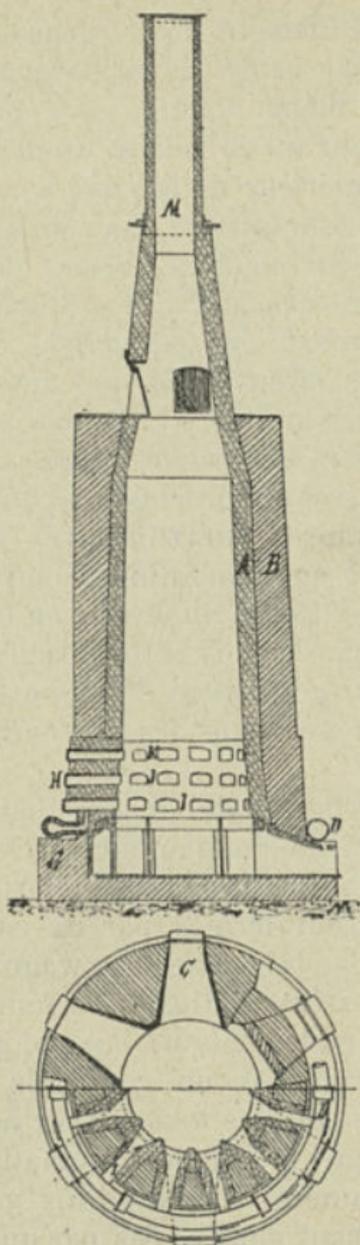


Fig. 14. Four de grillage Westman (Suède),
au gaz de haut fourneau.

Il y a généralement deux carneaux d'introduction de gaz par orifice de déchargement, et ils se trouvent en même temps assez près des dites ouvertures pour qu'on puisse atteindre toutes les parties de l'intérieur de la cuve à ce niveau avec les outils et briser tous les blocs de matières agglomérées qui pourraient se former dans la partie basse. D'autres carneaux J, K sont ménagés à deux niveaux différents, qui permettent également de travailler dans la cuve; ils sont aussi rapprochés que possible des premiers I. Toutes ces ouvertures sont évasées vers l'intérieur, comme on le voit sur la figure, et assez rapprochées les unes des autres pour qu'on puisse parvenir avec des outils à atteindre toute agglomération de minerai formée dans cette zone. Enfin, au-dessus on trouve quatre rangées de regards plus petits formés comme les précédents, qui permettent de s'assurer de la température qui règne dans les diverses sections du four.

Le four est surmonté d'une cheminée M de 10 mètres environ de hauteur, et les portes de chargement sont inclinées vers l'intérieur et maintenues en position fermée par un contrepoids et qui s'ouvrent par la poussée des wagonnets.

Dans d'autres installations, les fours n'ont pas la cheminée directement sur eux; le gueulard est simplement fermé par un couvercle incliné qui glisse dans une coulisse lorsqu'il est poussé par le wagonnet et qui provoque automatiquement la décharge du minerai. Les produits gazeux de la combustion sortent dans ce cas par quatre tuyaux verticaux placés près de la circonférence, aboutis-

sant à une caisse d'où part une cheminée haute de 10 mètres environ par laquelle ils s'échappent dans l'atmosphère; un papillon placé à la base de cette cheminée permet de régler le tirage du four.

L'air nécessaire à la combustion pénètre dans la cuve par les ouvertures de déchargement et, avant de rencontrer le gaz, s'échauffe au contact du minerai dont le grillage est terminé.

Pour régler l'entrée de l'air, les embrasures de déchargement sont elles-mêmes munies de portes dans lesquelles on a laissé cinq ouvertures pourvues de papillon. Le nombre des embrasures dépend de la dimension du four; dans les grands appareils on en dispose huit; dans les plus petits n'ayant que 1^m90 de diamètre au bas de la cuve, on n'en rencontre que cinq. Il va sans dire que les plus grands fours sont les plus avantageux.

Dans quelques fours Westman, au lieu de faire appel de l'air dans la cuve par le tirage naturel, on met une soufflerie en relation avec l'anneau qui porte la chemise et qui est creux. Cet anneau est percé, sur la face intérieure, de nombreux petits trous par lesquels l'air est lancé dans la cuve. Cette modification paraît bonne à première vue; mais, jusqu'à présent, n'a pas donné une amélioration sensible.

La production d'un four Westman est de 5,000 kilogrammes de minerai grillé par embrasure de déchargement et par vingt-quatre heures. Ainsi un four ayant huit embrasures et de 31 mètres cubes de capacité produit 40,000 kilogr., soit 1,300 kilogrammes par jour et par mètre de capacité.

Les déchargements de minerai grillé s'effectuent toutes les heures environ.

Four Allevard. — Les fours Allevard sont alimentés avec du gaz de gazogène et ont 12 mètres de hauteur sur un diamètre intérieur de 3 mètres. Ils sont formés de deux cuves A, B (fig. 15 et 16) superposées, avec étranglement au tiers de la hauteur totale.

Le gaz, fourni par des gazogènes spéciaux, est distribué, à l'intérieur du fourneau, par une série de carneaux C disposés sur la circonférence en dessous de l'étranglement, la cuve inférieure servant seulement au refroidissement de la partie grillée, en même temps qu'au réchauffement de l'air destiné à la combustion.

Dans un four de ce genre, la production atteint 25,000 kilogr. en vingt-quatre heures avec une consommation de 30 kilogrammes de houille par 1,000 kilogr. de minerai grillé.

Ces fours n'ont pas donné une économie de combustible dans le grillage. Pour que les charges descendent régulièrement, il faut que l'extraction se fasse régulièrement tout autour.

On a cherché à faire griller les minerais dans les fours Hoffmann. On a également grillé les minerais de fer dans des fours *Belani*, dans lesquels le gaz arrive non seulement par les parois, mais encore par le centre où l'on établit une sorte de cheminée fermée à son extrémité et portant sur une circonférence un certain nombre d'ouvertures. On établit sur le gueulard du four une chambre métallique surmontée de la cheminée. Les dimensions de cette chambre sont telles que les wagons

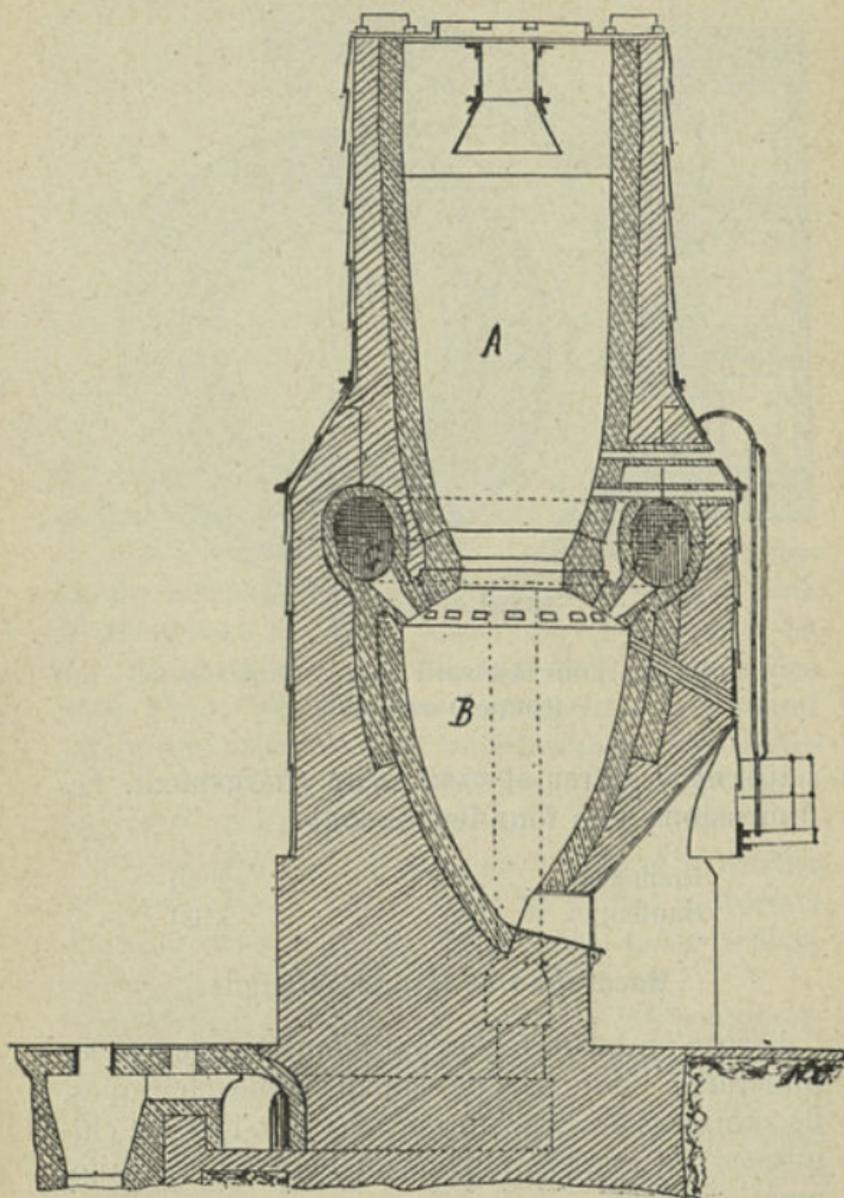


Fig. 15. Four Allevard au gaz de gazogène (coupe verticale).

Maitre de forges. — T. I.

6

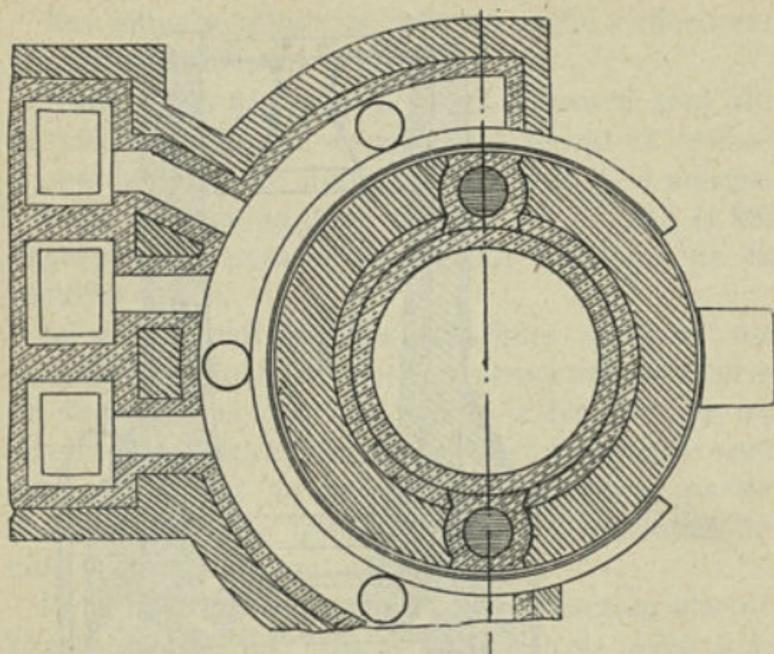


Fig. 16. Four Allevard au gaz de gazogène
(coupe horizontale).

puissent y entrer et vider leur chargement. Les dimensions d'un four Belani sont :

Diamètre	2 ^m 50
Hauteur	4 ^m 00

Macération et lavage chimique

Lorsqu'on laisse exposés pendant longtemps les minerais à l'influence des agents atmosphériques, ils subissent des transformations physiques et chimiques qui rendent plus ou moins facile le traitement ultérieur.

Ainsi la chaleur du soleil et l'humidité qui

pénètrent jusqu'au cœur des morceaux provoquent des fissures qui permettent, par la suite, aux gaz réducteurs d'atteindre les parties centrales et qui rendent en outre la matière plus friable. Souvent même on a constaté la séparation complète des gangues d'avec les minerais. Les minerais empâtés de schiste argileux, très adhérent, se débarrassent de cette matière après quelque temps d'exposition à l'air. La gelée agit d'une façon identique.

L'action chimique des agents atmosphériques consiste surtout dans la transformation des sulfures métalliques en sulfates solubles que la pluie fait disparaître petit à petit, ou que l'on peut faire disparaître plus vite par un lavage à l'eau.

Le soufre disparaît en partie par cette action des agents atmosphériques et le lavage, tandis que le phosphore lui, reste intact, car il se trouve en état de phosphate de chaux et de fer insolubles dans l'eau. On a essayé de déphosphorer quand même les minerais par voie humide, c'est-à-dire par un lavage à l'eau additionnée d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfureux.

Ce procédé a été essayé en Suède et à Kladno (Bohême), où l'on s'est servi de l'acide sulfureux provenant du grillage des pyrites qu'on mélangeait aux eaux de lavage.

Aujourd'hui, on ne pratique plus cette sorte de déphosphoration des minerais, la découverte des procédés Bessemer et Martin permettant de déphosphorer plus complètement la fonte pendant sa transformation en métal malléable dans le convertisseur.

CHAPITRE II

De l'air atmosphérique

SOMMAIRE. — I. Calcul de la quantité de vent à insuffler dans les hauts fourneaux. — II. Des machines soufflantes. — III. Disposition des obturateurs et mode de leur construction. — IV. Des régulateurs. — V. Air chaud. — VI. Appareils à chauffer l'air. — VII. Conduite et distribution du vent. — VIII. Porte-vent et tuyères. — IX. Pyromètres.

L'air pur et sec est formé en poids de :

Oxygène.	23.10
Azote.	76.90

ce qui donne, pour le rapport de l'azote à l'oxygène, 3,33 à 1.

L'air ordinaire contient en outre 0,0003 à 0,0006 d'acide carbonique et une proportion de vapeur d'eau qui varie avec les lieux, la direction des vents, la température, etc.

D'après les expériences de Saussure et Verver, l'air contiendrait environ 5 pour 10,000 d'acide carbonique; dans les usines à fer, où il se brûle d'énormes quantités de charbon, on peut doubler cette quantité et porter à 0,001 l'acide carbonique contenu dans l'atmosphère. La vapeur aqueuse est contenue dans l'air dans une proportion que Verver a trouvé être en moyenne de 8 pour 1,000.

Dans les forges, on peut hardiment calculer sur 10 pour 1,000.

D'après cela, laissant de côté les substances gazeuses qui y sont en si petite quantité qu'on n'a pu jusqu'à ce jour les doser, l'air atmosphérique qui règne dans les forges et leurs environs est composé, pour 1,000 parties, de :

Oxygène	205.81
Azote	783.19
Acide carbonique.	1.00
Vapeur d'eau.	10.00
	<hr/>
	1000.00

Dans le pays de Galles ou le Monmouthshire, on calcule que pour obtenir 1,000 kilogrammes de fonte au coke, il faut 300,000 pieds cubes d'air atmosphérique. Cette masse de vent, qui équivaut à 8,494 mètres cubes et pèse 11,034 kilogr., se compose de :

Oxygène	2270 kg. 90
Azote	8641 72
Acide carbonique.	11 03
Vapeur d'eau.	110 35
	<hr/>
	11034 kg. 00

Cette assertion vaut bien la peine d'être examinée. Sur la quantité précitée, l'azote tout entier traverse le fourneau, sans produire aucun effet que celui d'enlever de la chaleur à la cuve; l'acide carbonique se mêle aux réactions qui s'y opèrent, et l'hydrogène a le sort de l'azote, laissant 98 kil. 10 d'oxygène derrière lui.

Ainsi, il ne reste réellement d'actif que :

6.

Oxygène de l'air pur.	2270 kg. 90
Oxygène de l'eau.	98 10
	<hr/>
	2369 kg. 00

Or ces 2,369 kilogr. d'oxygène brûlent pour produire de l'acide carbonique	1165 kilogr. de carbone
Supposant que la fonte en prene 3 1/2 0/0, tant en alliage qu'en dissolution . .	35 — —
	<hr/>
Total du carbone employé.	1200 kilogr.

Voyons comment cette quantité de combustible pur est fournie dans les usines à fonte : Dans le Staffordshire, pour produire 1,000 kilogrammes de fonte, on consomme 2,000 kilogrammes de houille, lesquels, à 60 0/0, représentent 1,200 kilogrammes de carbone.

Dans le Pays de Galles, on emploie 3,000 kilogrammes de houille donnant 2,100 kilogrammes de coke, pour produire une tonne de fonte. Si l'on en déduit 1,000 kilogrammes de houille pour le grillage, les 2,000 kilogrammes restant donnent 1,330 kilogrammes de coke, lesquels, à 90 0/0, sont les représentants de 1,197 kilogrammes de carbone.

Suivant Mashet, il faut, en Angleterre, 1,229 kilogrammes de charbon de bois pour 1,000 kilogrammes de fonte. Or, ce combustible contient 95 0/0 de carbone ; ce calcul donne donc 1,167 kilogrammes.

Comme on le voit, le chiffre de 8,494 mètres cubes d'air est assez exact ; il pourrait être porté sans erreur à 8,500 pesant 11,042 kilogrammes.

D'après cela, il faudrait 7^m 083 d'air pour brûler 1 kilogramme de charbon pur.

Dans une usine qui fait quinze tonnes de fonte grise par vingt-quatre heures, il ne faut pas moins de 127,500 mètres cubes d'air dans le même temps. C'est près de 89 mètres cubes par minute. On peut, d'après cela, calculer le rapport du produit journalier d'un haut fourneau avec sa consommation en air et en combustible.

I. CALCUL DE LA QUANTITÉ DE VENT A INSUFFER DANS LES HAUTS FOURNEAUX

Pour se rendre compte d'une façon précise de ce qui se passe dans un haut fourneau dont on a la direction, il est absolument indispensable de savoir quelle est la quantité de vent qu'il faut y insuffler par minute. Plusieurs méthodes nous y conduisent.

La plus simple consiste à la calculer d'après le poids du combustible brûlé dans un temps donné; ce n'est qu'un moyen approximatif dont les résultats peuvent être loin de la vérité. Pourtant, la totalité du carbone qui parvient dans la région des tuyères, y est transformée en oxyde de carbone aux dépens de l'air insufflé; si donc on connaît la proportion d'oxygène contenu dans l'air et si on admet que tout le carbone chargé au gueulard descend intégralement jusque dans la région des tuyères, il est facile d'en conclure pour l'air introduit par minute. Désignons par P le combustible consommé par vingt-quatre heures en kilogr., par p sa teneur en carbone, par Q le volume de l'air soufflé par minute, nous aurons :

$$Q = \frac{P p}{1440} \times 4,5 = \frac{P p}{320} \quad (1)$$

formule dans laquelle 4,5 représente en mètres cubes la quantité d'air nécessaire pour transformer 1 kilogr. de carbone en oxyde de carbone.

Dans la pratique, les choses ne se passent pas aussi simplement qu'on le suppose. Dans tous les hauts fourneaux, il y a, en effet, une partie du carbone qui est employée pour produire la réduction directe du minerai et n'atteint pas, conséquemment, la région des tuyères; une autre partie est absorbée par le métal. Il en résulte donc que le volume d'air qu'on obtient par le calcul précédent est bien supérieur à celui réellement nécessaire. Il faut donc admettre un coefficient K de réduction et la formule (1) devient :

$$Q = K \frac{P p}{320} \quad (2)$$

Suivant que le minerai est plus ou moins facile à réduire, on prend K égal à 0,75 ou 0,85.

Une autre méthode simple, mais approximative comme la précédente, consiste à calculer le volume engendré par le piston de la machine soufflante pendant une minute; ce volume devrait représenter théoriquement celui de l'air insufflé; mais, en raison de l'influence des espaces nuisibles, des pertes de temps dues à l'ouverture et à la fermeture des clapets ou des soupapes, le volume de l'air aspiré n'est jamais égal à celui engendré par le piston dans sa course; il faut, en outre, tenir compte des fuites plus ou moins importantes qui

se produisent sur le parcours entre la machine et les tuyères. D'après Hauer, on ne doit jamais compter sur un rendement supérieur à 0,70 du volume engendré par le piston.

Si l'on désigne par Q le volume de l'air lancé dans le haut fourneau par minute, par F la surface du piston soufflant en mètres carrés et par V la vitesse de ce même piston en mètres par minute, on aura :

$$Q = 0,70 F V$$

Enfin, dans certains cas particuliers, on peut se servir de la méthode suivante citée par *Stockmann*.

La totalité de l'azote contenu dans le gaz des hauts fourneaux provient presque exclusivement de l'air introduit par les tuyères, et comme c'est un gaz inerte, il se retrouve dans le gaz. Si donc on arrive à bien connaître le volume du gaz sortant du fourneau dans un temps donné et sa composition moyenne, il sera facile, d'après le nombre trouvé pour l'azote, de calculer le volume d'air qui a passé par le fourneau, en se basant sur ce que 100 volumes d'air renferment 79 volumes d'azote et 21 volumes d'oxygène, d'où on tire que 100 volumes d'azote correspondent à 126 volumes et demi d'air.

Il faut donc déterminer, par analyse, la composition exacte du gaz ; d'autre part, il faudra évaluer le volume de gaz qui sort dans un temps donné du gueulard, d'après le poids du carbone introduit dans le même temps, soit par le combustible, soit par les matières des lits de fusion, en ayant soin de déduire de cette quantité celle qui est retenue par

la fonte; la différence doit se retrouver dans le gaz.

En appelant Q_1 la quantité de carbone, en kilogrammes, introduit par le combustible, Q_2 celle introduite par les matières du lit de fusion, et Q_3 celle qui est retenue dans la fonte, on aura :

$$Q_1 + Q_2 - Q_3 = Q$$

Q étant la quantité de carbone sortant du haut fourneau sous la forme de carbures d'hydrogène, d'oxyde de carbone et d'acide carbonique, et l'on sait que :

l'acide carbonique renferme .	27.27	de carbone
l'oxyde de carbone	42.86	—
le protocarbure d'hydrogène .	75	—

On peut donc, d'après la composition du gaz, calculer la quantité de carbone qui sort du gueulard dans une minute, et comme le total du carbone est $Q = Q_1 + Q_2 - Q_3$, on en déduit simplement le volume total du gaz. La proportion d'azote reconnue par l'analyse permet de calculer le volume de ce gaz qui s'échappe et d'en conclure la quantité d'air insufflé par les tuyères dans le même laps de temps.

Prenons pour exemple, afin de mieux faire comprendre cette méthode, le gaz qui sort d'un haut fourneau de la société du Phoenix, à Laar, ayant la composition suivante :

	En volume	En poids
Azote	55.76	54.79
Acide carbonique.	9.99	15.42

Oxyde de carbone.	24.88	24.45
Protocarbure d'hydrogène .	0.40	0.22
Hydrogène	0.97	0.07
Vapeur d'eau.	8.00	5.05
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

Le carbone contenu dans 100 kilogr. de ce gaz était en poids :

Dans l'acide carbonique. . . .	$15.42 \times 0.2727 =$	4.21
Dans l'oxyde de carbone. . . .	$24.45 \times 0.4286 =$	10.48
Dans le protocarbure.	$0.22 \times 0.75 =$	0.17
		<u>14.86</u>

Si on prend seulement une quantité de gaz telle qu'elle contienne 1 kilogr. de carbone, ce dernier se trouvera réparti de la façon suivante :

En acide carbonique.	0 kg.	283
En oxyde de carbone	0	705
En protocarbure	0	012
		<u>1 kg. 000</u>

Si la production de notre haut fourneau est en moyenne de 40,000 kilogr. de fonte par vingt-quatre heures, avec une consommation de 1,300 kil. de coke par 1,000 kilogr. de fonte, et si le coke renferme 77 0/0 de carbone pur, il passera de ce fait dans le fourneau en vingt-quatre heures :

$$40.000 \times 1.300 \times 0.77 = 40.040 \text{ kg.}$$

de carbone.

Les minerais qui servent ne sont pas carbonatés, mais il y a addition de 48,000 kilogr. de carbonate

de chaux renfermant 43,7 d'acide carbonique pour cent, soit 11,73 0/0 de carbone, par conséquent, sous forme de fondant, on introduit dans le four :

$$48.000 \times 0.1173 = 5.630 \text{ kg. de carbone}$$

La fonte produite analysée donne une teneur de 4 0/0 de carbone, il y a donc une absorption de :

$$40.000 \times 0.04 = 1.600 \text{ de carbone}$$

Par conséquent :

$$Q = 40.040 + 5.630 - 1.600 = 44.070 \text{ kg. de carbone}$$

44,070 kilogr. de carbone sont donc entraînés par le gaz sortant, et on pourrait calculer les proportions de chacune des trois formes sous lesquelles ce carbone s'échappe; mais pour le but qu'on se propose, il suffit d'appliquer le calcul à une seule des formes et d'en déterminer le poids et la quantité de gaz. Ainsi, on sait que l'oxyde de carbone renferme 70,5 0/0 du carbone contenu dans le gaz; par conséquent, il s'échappe du gueulard $44,070 \times 0,705 = 31,069$ kilogrammes de carbone sous forme d'oxyde de carbone, et comme un mètre cube de ce gaz pèse 1 kilogr. 2546, son volume serait de 58,000 mètres cubes.

Nous avons, d'autre part, trouvé que ce gaz contient 24,88 0/0 d'oxyde de carbone, donc il sort du haut fourneau en vingt-quatre heures :

$$\frac{58.000}{0.2488} = 233.120 \text{ mètres cubes de gaz,}$$

soit 162^{m3} à la minute.

Ces 162 mètres cubes renferment 55,76 0/0

d'azote, c'est-à-dire 90 mètres cubes qui traversent le fourneau sans aucune altération et correspondent à 114 mètres cubes d'air introduits par minute. Aux Etats-Unis, on introduit dans les hauts fourneaux une quantité de vent variant de 1,2 à 1,4 par mètre cube de capacité. En Allemagne, on ne souffle que de 1 à 1,20 d'air dans les mêmes conditions.

Le tableau suivant donne la quantité d'air brûlé en fonction de la production et de la consommation en combustible :

Production en 24 heures	Air brûlé en mètres cubes	Combustible consommé	
		Coke	Charbon
kilogr.		kilogr.	kilogr.
1.000	8.500	1.500	1.230
2.000	17.000	3.000	2.460
3.000	25.500	4.500	3.690
4.000	34.000	6.000	4.920
5.000	42.500	7.500	6.150
6.000	51.000	9.000	7.380
7.000	59.500	10.500	8.610
8.000	68.000	12.000	9.840
9.000	76.500	13.500	11.070
10.000	85.000	15.000	12.300
11.000	93.500	16.500	13.530
12.000	102.000	18.000	14.760
13.000	110.500	19.500	15.990
14.000	119.000	21.000	17.220
15.000	127.500	22.500	18.450
16.000	136.000	24.000	19.680
17.000	144.500	25.500	20.910
18.000	153.000	27.000	22.140
19.000	161.500	28.500	23.370
20.000	170.000	30.000	24.600

Vitesse et pression du vent injecté. — Mais ce n'est pas seulement la quantité d'air fournie au haut fourneau, c'est la vitesse avec laquelle elle est lancée, c'est la pression sous laquelle elle est injectée qu'il faut considérer. M. Knauff, membre du comité scientifique des mines à Saint-Petersbourg, a trouvé que 100 pieds cubes d'air projetés dans un haut fourneau, sous une pression de deux pouces de mercure, produisent le même effet que 200 pieds cubes d'air sous la pression d'un pouce, avec cette différence que, dans ce dernier cas, on brûle le double de charbon.

L'expérience a appris que la pression du vent dans un haut fourneau au coke, qui produit 20 tonnes de fonte par vingt-quatre heures, est de 0^m16 de mercure. C'est assez généralement le chiffre adopté en Angleterre.

M. Walter a donné le tableau suivant :

	Hauteurs du mercure
Charbon de bois tendres	0.02 à 0.03
— de bois résineux.	0.03 à 0.04
— de bois durs.	0.04 à 0.06
Coke léger.	0.08 à 0.13
Coke dur et compact.	0.13 à 0.19

En été, il convient d'augmenter la pression à cause de la raréfaction de l'air. Avec de l'air chaud, on ne lui fait éprouver qu'une faible diminution. A la Clyde (Ecosse), la quantité de vent, qui était de 2,827 pieds cubes à l'air froid, fut diminuée jusqu'à 2,120 pieds cubes, lorsqu'on employa l'air chaud à 222 degrés; il en fut de même à Batterley, où de 2,500 pieds cubes d'air froid,

la quantité fut ramenée à 2,160 pieds cubes à 182 degrés.

Dans le dernier fourneau, on avait laissé la pression telle qu'elle était au manomètre (2,5 livres), mais augmenté l'ouverture de la buse d'un demi-pouce ; dans le premier, en opérant la même chose sur la buse, on avait diminué la pression d'une demi-livre. A Calder, la pression n'avait pas sensiblement varié, qu'on employât l'air chaud ou l'air froid : dans le premier cas, elle était de 3,1 ; dans le second, de 3,25 livres par pouce carré anglais (0^m168 à 0^m160).

On fait varier la pression du vent en augmentant ou en diminuant l'œil de la buse à la tuyère. A la Clyde, en Ecosse, cet œil avait 2,5 pouces de diamètre avec l'air froid et au coke : lorsqu'on voulut employer la houille en nature, en usant de l'air chaud, on augmenta l'œil de 1/2 pouce.

Si dans une machine soufflante ou un régulateur, où l'air est comprimé, on fait une petite ouverture, le vent s'échappera avec plus ou moins de violence par cette ouverture. Le poids placé au-dessus du trou pour maintenir le fluide et faire équilibre à sa force, sera la mesure de la *pression*. C'est sur ce principe qu'est fondée l'invention du manomètre, instrument servant à mesurer la *pression du vent*.

Les manomètres sont des instruments d'une absolue nécessité ; il est impossible de bien conduire un fourneau, si l'on ne connaît pas à tout moment la pression du vent lancé dans l'intérieur avec une vitesse qui doit être calculée. Voilà pourquoi la construction d'un manomètre doit être soigneuse-

ment surveillée, et pourquoi il est bon d'en placer deux à chaque fourneau ; l'un près du régulateur de la machine soufflante, et l'autre près de la tuyère.

Les manomètres se composent de tubes recourbés communiquant, d'un côté, avec l'atmosphère et, de l'autre, avec l'intérieur de la machine soufflante, ou de son régulateur, aussi près que possible de la buse. Un liquide est placé dans ce tube et s'établit de niveau dans les deux branches chaque fois que l'air extérieur et l'air intérieur font équilibre ; mais sitôt que le vent est comprimé, l'équilibre est rompu, et le liquide monte dans l'une des branches. Le manomètre est un tube en fer ou en verre fixé à la machine soufflante à l'aide de vis et d'écrous. Sur la colonne communiquant avec l'atmosphère surnage un bouchon de liège qui joue avec facilité et au-dessus duquel est placée une petite figure légère, dont le doigt marque sur l'échelle le degré de pression intérieure.

Le tableau inséré page suivante donne ces pressions jusqu'à la hauteur de 38 centimètres, ou une demi-atmosphère.

Il y a deux moyens de fournir le vent nécessaire à un fourneau, ou par un simple *tirage*, ou par des machines soufflantes.

Du tirage des fourneaux

La couche épaisse d'air atmosphérique qui pèse sur la surface de la terre, la presse dans tous les sens, et, comme elle est élastique, elle tend continuellement à se mettre en équilibre. Comprimées par le poids des couches supérieures, celles qui

Hauteurs de la colonne de mercure	Hauteur d'une colonne d'eau	Pression sur un centimètre carré	Pression sur un ponce carré français en livres françaises	Pression sur un ponce carré anglais en livres anglaises
centimètr.	centimètres	grammes	livres	livres
1	13.57	13.57	0.200	0.193
2	27.14	27.14	0.401	0.386
3	40.70	40.70	0.601	0.580
4	54.27	54.27	0.802	0.773
5	67.84	67.84	1.002	0.966
6	81.41	81.41	1.202	1.159
7	94.98	94.98	1.403	1.353
8	108.54	108.54	1.603	1.546
9	122.11	122.11	1.804	1.739
10	135.68	135.68	2.004	1.933
11	149.25	149.25	2.204	2.126
12	162.82	162.82	2.405	2.319
13	176.38	176.38	2.605	2.512
14	189.95	189.95	2.806	2.705
15	203.52	203.52	3.006	2.899
16	217.09	217.09	3.206	3.092
17	230.66	230.66	3.407	3.285
18	244.23	244.23	3.607	3.478
19	257.80	257.80	3.808	3.672
20	271.37	271.37	4.008	3.865
21	284.94	284.94	4.208	4.058
22	298.51	298.51	4.408	4.251
23	312.08	312.08	4.608	4.444
24	325.65	325.65	4.809	4.637
25	339.22	339.22	5.009	4.830
26	352.79	352.79	5.210	5.024
27	366.36	366.36	5.410	5.217
28	379.93	379.93	5.610	5.410
29	393.50	393.50	5.811	5.603
30	407.07	407.07	6.011	5.796
31	420.64	420.64	6.212	5.990
32	434.21	434.21	6.412	6.183
33	447.78	447.78	6.612	6.376
34	461.35	461.35	6.813	6.569
35	474.92	474.92	7.013	6.762
36	488.49	488.49	7.214	6.956
37	502.06	502.06	7.414	7.149
38	515.64	515.64	7.615	7.342

touchent le sol portent tout le poids de l'atmosphère, et cette compression diminuant à mesure qu'on s'élève, il s'ensuit que les densités de l'air décroissent suivant une loi constante, et que le fluide élastique est d'autant plus léger qu'on s'éloigne davantage du sol.

Si donc, dans un fourneau quelconque, on place un combustible enflammé, la chaleur se porte vers les parties supérieures, le conduit de la cheminée s'échauffe un peu, l'air intérieur se dilate, l'équilibre est rompu ; la colonne intérieure devient plus légère et s'élève dans l'atmosphère, tandis que celle extérieure s'introduit par une ouverture ménagée à dessein, perd tout son oxygène et augmente ainsi la chaleur, en même temps que la dilatation. Une nouvelle masse d'air se précipite sur le foyer et éprouve le sort de la première ; d'autres se succèdent, s'entraînent mutuellement et produisent, par cette décomposition et ce mouvement successifs, une action dynamique à laquelle on a donné le nom de *tirage*.

Dans les arts industriels, où il s'agit de brûler un combustible donné dans un temps fixé pour produire un maximum de chaleur, on arrive à ce résultat chaque fois qu'on fournit au combustible l'air qui lui est nécessaire pour convertir tout le carbone en acide carbonique. Mais il est presque impossible d'obtenir ce maximum d'effet, et de ne pas s'écarter de la limite que pose la théorie : si l'air n'est pas fourni par le tirage, assez vite et en assez grande quantité, il se forme de l'oxyde de carbone et il se produit moins de chaleur ; si, au contraire, le tirage est trop fort et que l'air arrive

trop abondamment, une grande portion s'échappe sans avoir servi à la combustion et emporte une partie de la chaleur produite. On rend le mouvement de l'air plus rapide, et, par conséquent, le tirage plus fort, par l'élévation de la cheminée du fourneau : la pression de l'air extérieur étant moins forte dans les hautes régions, celui intérieur qui remonte après la dilatation, éprouve d'autant moins de résistance que le conduit est plus élevé. On favorise encore le courant par le rétrécissement de la partie supérieure de la cheminée; mais ce moyen a des limites assez étroites.

II. DES MACHINES SOUFFLANTES

Toute machine à l'aide de laquelle on lance dans l'intérieur d'un fourneau de l'air recueilli au dehors, porte le nom de *machine soufflante*.

Les machines soufflantes ont, sur le tirage simple, l'avantage d'augmenter la densité de l'air et de donner au vent une vitesse calculée et variable à volonté, sans que cette vitesse soit soumise à des limites aussi étroites que celles mises à la puissance du tirage; mais elles ont aussi l'inconvénient d'exiger une machine motrice souvent très puissante. Néanmoins, chaque fois qu'il est nécessaire de se procurer une grande masse de vent, et qu'on doit brûler un combustible très charbonneux et qui exige un air très dense, les machines soufflantes sont les seuls instruments que les maîtres de forges aient à leur disposition et dont ils puissent obtenir cet effet.

Il existe bien des espèces de machines souff-

flantes : dans les unes, une surface inflexible comprime l'air en se rapprochant d'une autre surface également inflexible, à laquelle elle est réunie, à l'une de ses extrémités, par un axe ou charnière : ce sont les *soufflets ordinaires*. Dans les autres, les plans comprimants sont indépendants l'un de l'autre, et celui mobile est renfermé dans une caisse où il comprime l'air : ce sont les *machines à piston*. Dans les troisièmes, le piston mobile auquel on a donné un mouvement circulaire, chasse devant lui le vent et le force à s'échapper par une ouverture à ce destinée : ce sont les *ventilateurs*. Dans les quatrièmes, l'eau remplace le piston et chasse de même le vent devant soi : telles sont les *trompes* et les *machines à tonneau*. Dans les cinquièmes enfin, l'eau tient lieu du plan immobile contre lequel une surface inflexible et en mouvement vient comprimer l'air ; c'est ce qui a lieu dans les *caisses hydrauliques*, les *chapelets soufflants* et les *vis à vent d'Archimède*.

Quelle que soit la classe à laquelle il faille rapporter une machine soufflante, elle a toujours trois parties essentielles qui sont indépendantes de sa forme : le *corps* dans lequel l'air est introduit et comprimé, l'*ouverture* ou la *soupape* d'introduction de cet air, et la *buse* par laquelle il est forcé de s'échapper.

L'ouverture par laquelle l'air entre dans le corps de la machine doit être aussi grande que les circonstances le permettent dans la construction ; car, lorsque l'air a été entièrement chassé du corps, la surface mobile éprouve, pour reprendre sa première place, une résistance due à la pression

atmosphérique, et cette résistance est d'autant plus grande que la soupape de l'introduction de l'air est plus petite. Elle serait nulle, en effet, si cette ouverture était égale en surface au plan comprimant, et atteindrait son maximum, si, par un événement quelconque, la soupape venait à être complètement oblitérée. On trouve, par le calcul, que cette résistance est en raison inverse du carré de l'ouverture par laquelle l'air entre.

L'orifice d'introduction de l'air est quelquefois fermé par une soupape dont le poids vient encore augmenter la résistance que rencontre le plan comprimant. Cette soupape ne s'ouvre que lorsque l'air intérieur est assez raréfié pour qu'il y ait excès de ressort dans l'air extérieur, et que cet excès puisse vaincre la résistance qu'oppose la soupape. Elle a, en outre, l'inconvénient de diminuer l'ouverture d'introduction. Il convient alors d'augmenter l'ouverture et d'ajouter un contrepoids à la soupape.

La vitesse avec laquelle l'air condensé entre dans le vide, est la même à tous les degrés de condensation; elle est la même que celle de l'air atmosphérique dans les mêmes circonstances; mais celui-ci est un poids qu'il faut vaincre en sortant, aux dépens d'une partie de la vitesse; le vent ne pourra donc jamais atteindre une condensation intérieure telle, qu'il puisse entrer dans l'air ambiant avec une vitesse égale à celle avec laquelle celui-ci entrerait dans le vide.

La densité de l'air intérieur augmentera à mesure que l'orifice de la buse diminuera; il est clair que la masse du vent, forcée de sortir, dans un temps

donné, par un orifice quelconque, acquiert une vitesse d'autant plus grande que l'ouverture est plus petite; mais ici la densité nuit à la vitesse, car le volume étant diminué donne un moindre quotient en divisant par l'orifice de la buse.

Rien de si facile, au premier aspect, que de connaître la quantité d'air lancée dans une seconde par une machine soufflante; il suffit, pour cela, de multiplier le volume d'air intérieur par la vitesse du plan comprimant; mais on ne peut, par ce moyen, obtenir que le calcul du vent à la pression atmosphérique. Il faut donc, dans ce cas, ramener la pression à celle de l'atmosphère; c'est ce qu'on fait facilement à l'aide des tables que nous avons données.

Quelle que soit l'exactitude des machines soufflantes, le plan comprimant ne peut jamais s'appliquer exactement sur la surface immobile du soufflet; il reste toujours un espace rempli d'air qui porte le nom d'*espace nuisible*. Dans les évaluations il est nécessaire d'y avoir égard, si l'on ne veut s'exposer à des graves erreurs.

Des soufflets proprement dits

Le soufflet de cuir (fig. 17) se compose de deux plateaux trapéziens A B en bois, assujettis par leur côté le moins large à une pièce de bois C appelée *têtière*, à l'aide d'une charnière qui leur permet de se mouvoir indépendamment l'un de l'autre. Les deux plateaux sont joints par un cuir développable E, cloué sur les côtés de deux plans. Celui inférieur porte une soupape à clapets V, faite en cuir ou en bois léger et garnie de laine sur son

pourtour. La têtère est percée de manière à laisser sortir l'air dans la buse.

Lorsqu'on éloigne les deux plateaux l'un de l'autre, le cuir qui forme les parois sidérales se développe et s'étend; la soupape s'ouvre et laisse entrer l'air. Sitôt que les plateaux se rapprochent, la soupape se ferme, l'air intérieur se comprime et s'échappe par la buse, le cuir se plisse et forme des rides égales.

Dans les forts soufflets, tels que ceux employés

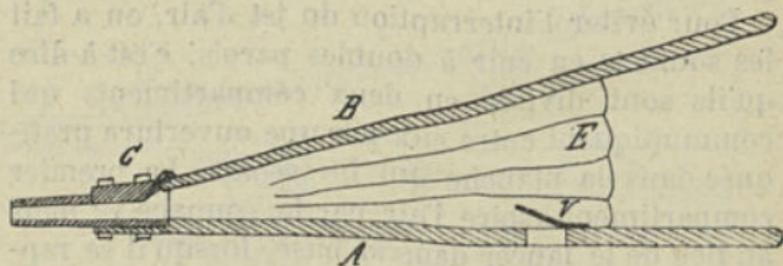


Fig. 17. Soufflet simple.

aux forges, le cuir doit présenter quelque résistance et quelque raideur; son épaisseur s'oppose à ce que les plis soient uniformes, et on est obligé alors d'ajouter des cadres qui permettent de régulariser les rides. Mais, quoi que l'on fasse, les plis gardent toujours une certaine quantité de vent et augmentent l'espace nuisible.

Un autre inconvénient de ces soufflets, c'est de ne donner qu'un vent intermittent; l'air, loin de sortir par la buse, lorsqu'on éloigne les plateaux, rentrerait, au contraire, dans le soufflet, s'il n'était raréfié à sa sortie et ne trouvait, dans le peu d'air

comprimé qui reste intérieurement, un obstacle à son retour.

Néanmoins, ces soufflets ont le grand avantage de se mouvoir avec facilité et de n'exiger que peu de force motrice. Assez généralement, ils sont munis de poignées qui servent à rapprocher les plateaux et sont destinées à des hommes. Dans les usines, on emploie des roues à cames qui font fléchir le plateau supérieur, tandis que l'autre est fixe et immobile. Un contrepoids le ramène à sa première position.

Pour éviter l'interruption du jet d'air, on a fait les soufflets en cuir à doubles parois, c'est-à-dire qu'ils sont divisés en deux compartiments qui communiquent entre eux par une ouverture pratiquée dans la planche qui les sépare. Le premier compartiment aspire l'air par la soupape V; mais au lieu de le lancer dans la buse, lorsqu'il se rapproche du diaphragme, il le force à passer par la soupape, dans le compartiment supérieur qui n'est, à proprement parler, qu'un réservoir d'air; un poids est placé sur le plateau supérieur et le force à descendre dès que celui supérieur s'éloigne; l'air comprimé s'échappe alors par la buse, et, comme il ne tarde pas à se renouveler, le mouvement de sortie est continu, ce qu'on ne peut obtenir dans le soufflet simple.

On augmente la vitesse du vent en augmentant la charge du plateau supérieur; mais il ne faut pas dépasser une certaine limite, car alors le poids étant trop fort, le plateau supérieur ne pourrait s'élever et l'air sortirait par la têtère, en passant avec rapidité par la soupape; l'intermittence

recommencerait, et le soufflet ne remplirait plus que l'office d'un soufflet simple. Une charge trop faible occasionnerait une perte de vent et ne pourrait maintenir au surplus l'uniformité du jet.

Soufflet Rabier. — M. Rabier a imaginé un soufflet triple en cuir, composé de trois compartiments disposés l'un sur l'autre; les deux inférieurs X, Y (fig. 18) puisent l'air par quatre sou-

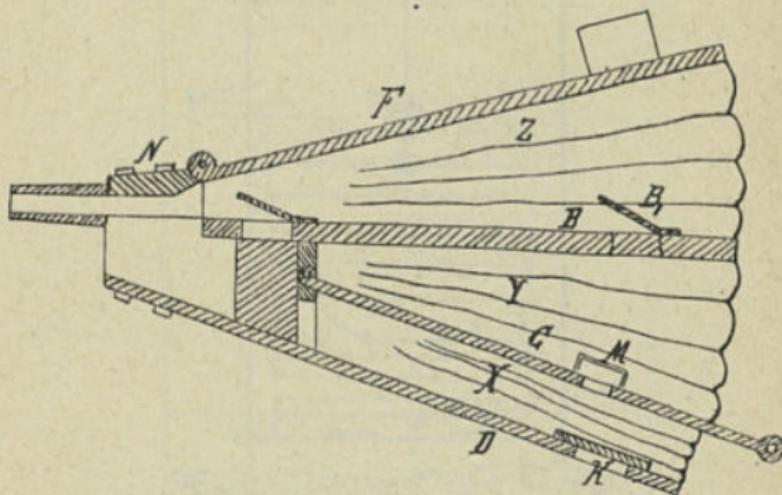


Fig. 18. Soufflet à double effet et à réservoir, Rabier.

papes et le versent par trois autres dans le réservoir Z, d'où il se rend dans la buse. Les deux plateaux B et D sont fixes; le diaphragme C est mobile; le plan supérieur F est chargé d'un poids. Ces différents plateaux sont assujettis à la tête N; l'air, introduit par K, dans le compartiment X, passe par M dans celui Y, lorsqu'on abaisse le plateau C; mais, lorsque celui-ci remonte, la partie X se rem-

plit d'air, le vent contenu en Y s'échappe par un tuyau et la soupape B₁, pour se rendre dans le réservoir Z. Ce mécanisme est facile à concevoir.

On fait des soufflets en cuir à base cylindrique

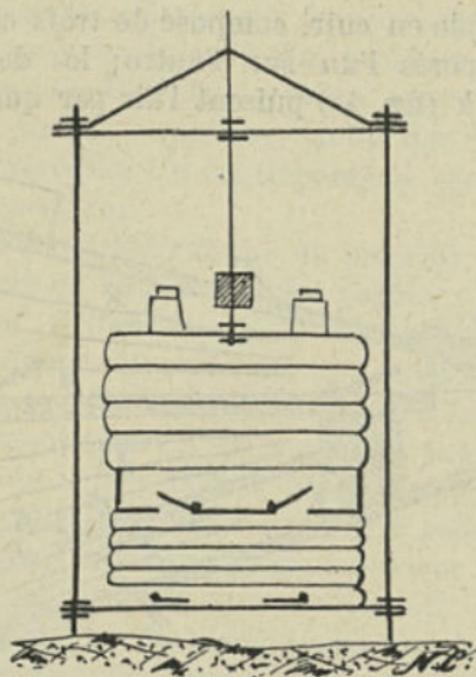


Fig. 19. Soufflet cylindrique à simple effet et à réservoir.

dont le plateau supérieur a la même forme. Ces soufflets sont à simple ou double effet (fig. 19 et 20).

Il existe beaucoup d'autres espèces de soufflets en cuir; mais ils ont tous le défaut d'être d'une construction dispendieuse et d'un entretien onéreux; cet inconvénient augmente encore si on veut leur donner de grandes dimensions et en faire

usage dans les usines. On ne peut donc guère s'en servir que dans les petites forges et les feux de

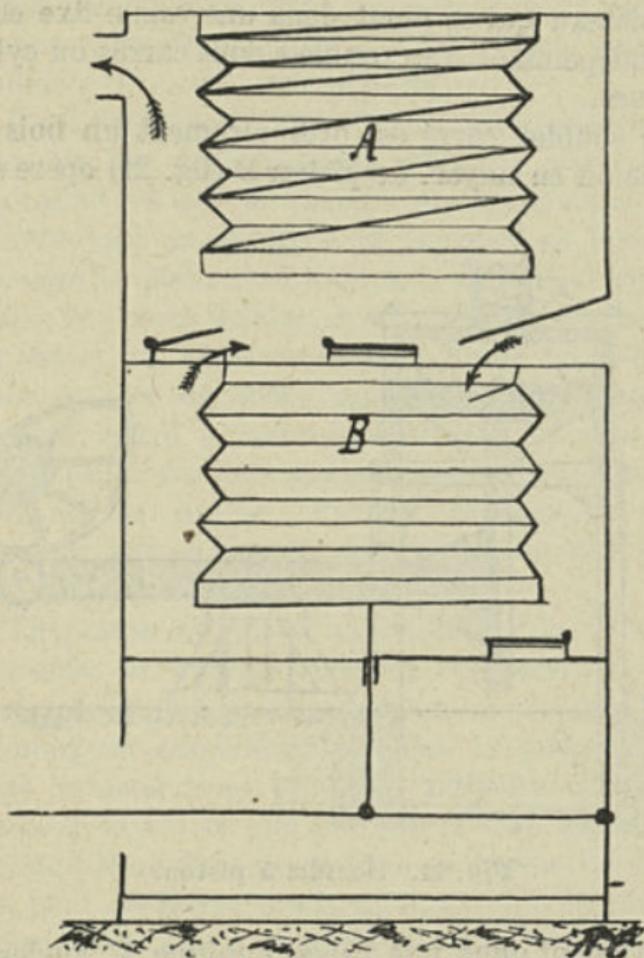


Fig. 20. Soufflet cylindrique à double effet et régulateur.

réchauffage qui n'exigent pas une grande puissance de vent. Dans les hauts fourneaux et dans les

orges d'affinage, on leur a substitué les soufflets à piston.

Soufflets à piston. — Dans ces soufflets, il y a un plateau qui se meut dans une caisse fixe et en est indépendant. Ces soufflets sont carrés ou cylindriques.

Le soufflet carré est ordinairement en bois de chêne ou en noyer. Le piston B (fig. 21) opère son

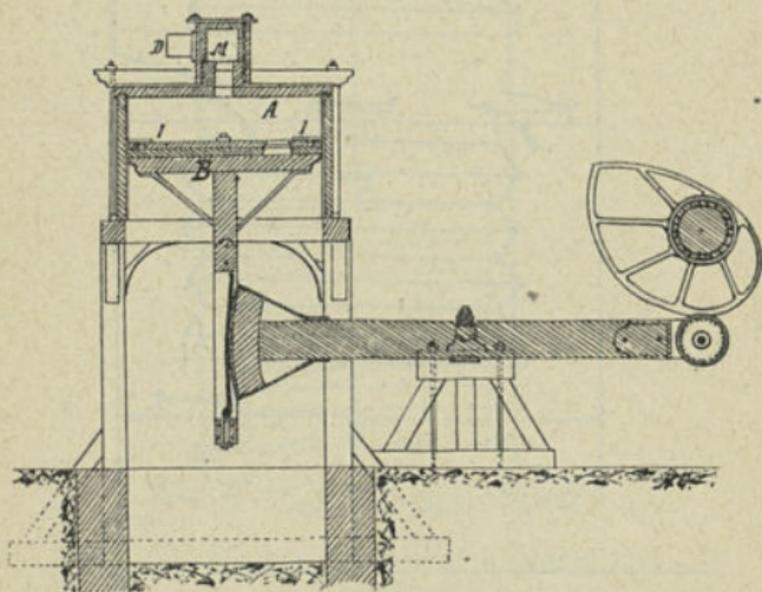


Fig. 21. Soufflet à piston.

mouvement dans une caisse cubique A, au-dessus de laquelle est placée une soupape de sortie M conduisant dans le porte-vent D; ce piston porte lui-même deux soupapes d'introduction I qui s'ouvrent lorsqu'il descend et qui se ferment dans le mouvement ascendant. Des liteaux à ressort sem-

blables à ceux des gîtes du soufflet à bois et appliqués sur le plateau mobile, empêchent la perte de vent. Ils ne sont pas néanmoins tellement combinés qu'ils ne laissent aussi un espace nuisible, moins considérable, à la vérité, que celui des soufflets dont nous avons parlé.

Il est évident que l'air du porte-vent est toujours dans un état de compression, tandis que celui de la caisse n'a que la densité atmosphérique. Il en résulte que la soupape M ne peut se lever que lorsque le piston, en montant, a remis l'équilibre entre les deux fluides, et donné même à celui de la caisse un excès de densité. Dans les usines où l'on se sert de deux soufflets, il est important d'avoir égard à cette irrégularité du vent et de faire jouer un des pistons avant que l'autre ait terminé sa course. Encore ne peut-on jamais obtenir, par ce moyen, une vitesse et une densité égales dans tous les instants.

Le piston est placé au-dessus de la caisse, au-dessous ou horizontalement. Ce dernier moyen présente le plus de désavantage, en ce que le frottement est considérable et que le piston ne peut être ramené à sa première position que par un moteur *ad hoc* et non par son propre poids; il en est de même dans les pistons en dessus; mais alors on peut les livrer à eux-mêmes pour la descente, en ajoutant sur la partie extérieure du plateau le poids nécessaire à la compression de l'air, poids qu'il faut toujours remonter aux dépens de la force motrice. C'est probablement tous ces inconvénients qui font donner généralement la préférence aux pistons en dessous : en effet, le moteur n'est em-

ployé qu'à comprimer l'air, en faisant remonter le piston et celui-ci redescend ensuite de lui-même.

On combine ces machines deux à deux, trois à trois, etc.

D'après les expériences faites par M. d'Aubusson sur les machines à piston du sud-ouest de la France, la perte d'air de ces soufflets est très considérable. Il a trouvé que pour 100 d'air aspiré, on n'obtenait à la buse, que 40 à 70 seulement.

Ainsi, les pertes de vent sont considérables : elles sont les deux tiers de l'air aspiré dans quelques machines et d'un tiers ou d'un quart dans les bonnes. Ces pertes proviennent d'une foule de causes : elles peuvent avoir lieu entre les bords du piston et les parois de la caisse, notamment aux angles, à la jonction du couvercle à la caisse et du porte-vent au couvercle ; elles peuvent être dues aux joints du porte-vent qui a quelquefois une longueur de plus de 30 mètres ; à la différence de densité de l'air aspiré et de l'atmosphère ; enfin, à l'espace nuisible.

Ces pertes sont bien moins sensibles dans les soufflets cylindriques à piston, ou machines soufflantes à piston.

Machines soufflantes à piston. — Ces machines sont en fonte, ainsi que leurs pistons ; ils sont parfaitement alésés, et le piston est garni de cuir, ou mieux de cuivre, de la même manière que dans les cylindres à vapeur. On donne ordinairement au cylindre qui forme le corps de la machine, un diamètre égal ou un peu inférieur à la course du piston.

Les soupapes d'aspiration offrent à l'air une

section qui varie entre un neuvième et un quinzième de la surface du piston; elles sont formées de clapets en tôle ou en bois, garnis en cuir; celles d'expiration sont faites de la même manière et avec des dimensions au moins égales. Elles s'ouvrent dans le porte-vent. Les clapets en tôle ne doivent présenter qu'un faible poids : voilà pourquoi on les fait souvent en bois, mais alors ils ne résistent pas à une forte pression.

L'air envoyé aux buses par un cylindre à vent n'a pas la même densité à tous les moments de la course du piston : elle est beaucoup plus grande au commencement de sa marche et décroît ensuite jusqu'à la fin de son mouvement. C'est pour cela qu'on adopte ordinairement à une même machine plusieurs cylindres soufflants; on régularise, par ce moyen, les conditions de la masse du vent projetée dans le fourneau, mais on y arrive bien plus sûrement par l'emploi de *régulateurs* dont nous allons parler bientôt.

Il existe une quantité infinie de modèles de machines soufflantes dont les plus importantes sont construites par les Sociétés du Creusot, de Cockerill, etc. Ce qui distingue les différents types d'entre eux, c'est la disposition des obturateurs d'aspiration et de refoulement.

III. DISPOSITION DES OBTURATEURS ET MODE DE LEUR CONSTRUCTION

Pour former les obturateurs on peut se servir soit des clapets en cuir ou métalliques, soit des soupapes.

Les clapets sont en cuir ou en tôle qu'on dispose sur siège incliné, de façon à se refermer de leur propre poids; on rencontre également des clapets en caoutchouc fixés par leur centre, s'ouvrant et se refermant par l'élasticité de la matière.

Les soupapes sont placées sur des sièges en

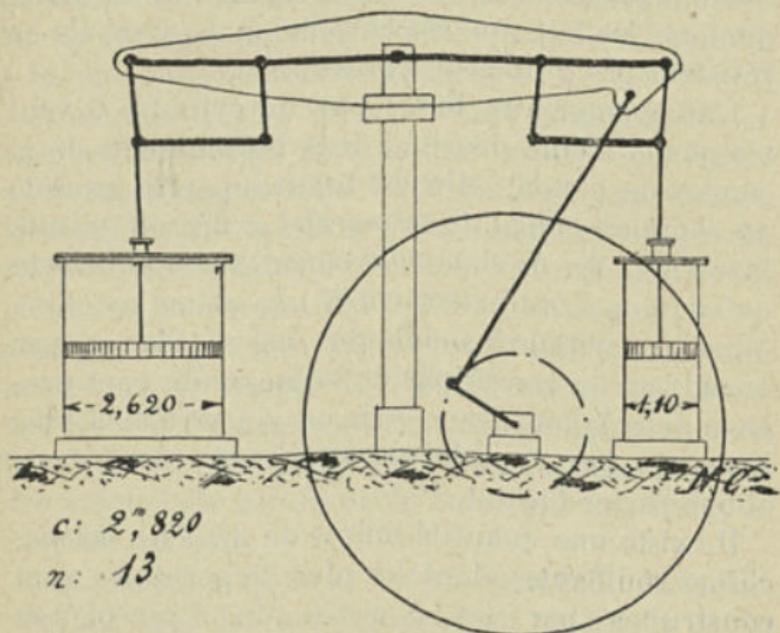


Fig. 22. Soufflerie à balancier avec bielle oblique intérieure, Duisbourg.

bronze et y sont constamment appliquées par l'action d'un ressort à boudin, ou encore par des articulations en parallélogramme.

Cette dernière disposition n'est pas recommandable à cause des arrêts et les réparations très fréquentes qu'elle exige.

Quel que soit le système d'obturateur adopté, on

peut les placer soit sur les fonds du cylindre qu'on partage en un certain nombre de segments, dont

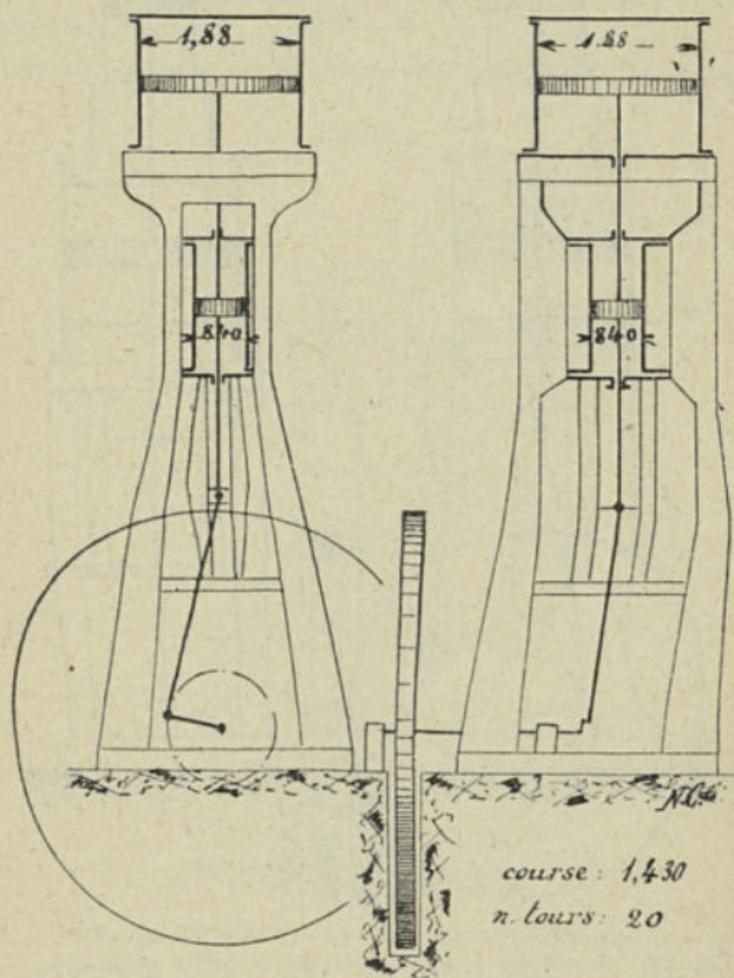


Fig. 23. Soufflerie à action directe et bielle pendante.
Type allemand.

une partie est réservée à l'aspiration et l'autre au refoulement ; soit sur le cylindre lui-même, en

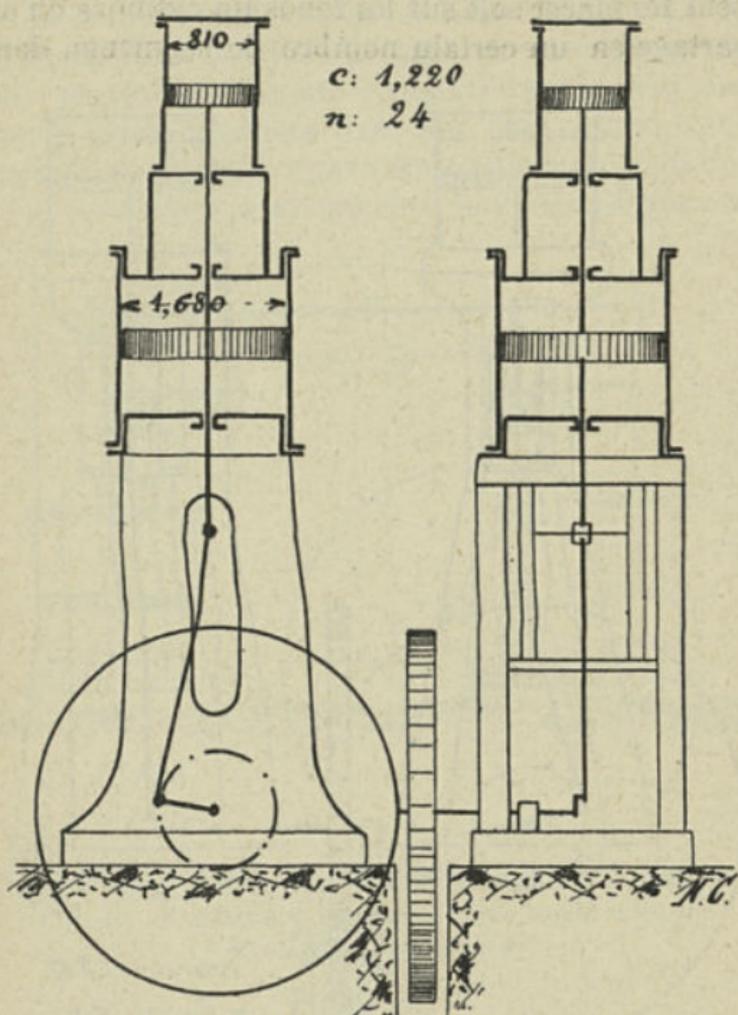


Fig. 24. Soufflerie à action directe et bielle pendante.
 Type anglais, Newport.

entourant les extrémités du dit cylindre de deux
 chambres à air; on peut encore placer le refoulement
 sur le cylindre et l'aspiration sur les fonds.

Nous donnons (fig. 22 à 29) un exemple de chacune de ces dispositions sans nous étendre davantage sur les détails de construction, qui nous conduiraient trop loin.

Les machines soufflantes sont soit verticales, soit

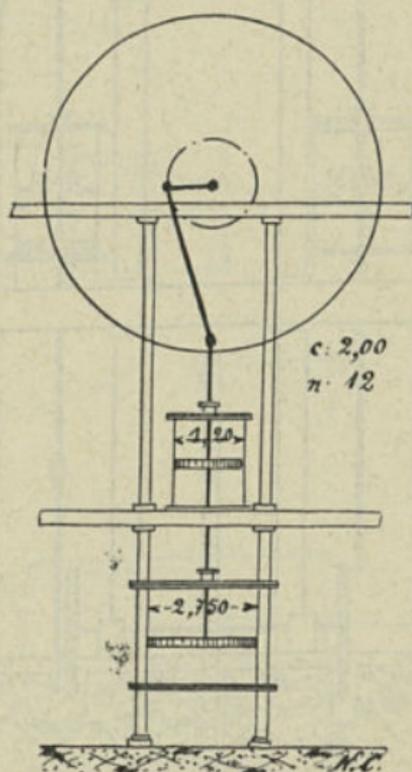


Fig. 25. Soufflerie à action directe. Creusot.

horizontales et peuvent être actionnées, soit par une roue hydraulique, soit par une machine à vapeur ou encore par un arbre de transmission recevant le mouvement d'un arbre moteur par engrenages.

Depuis un certain nombre d'années, on emploie

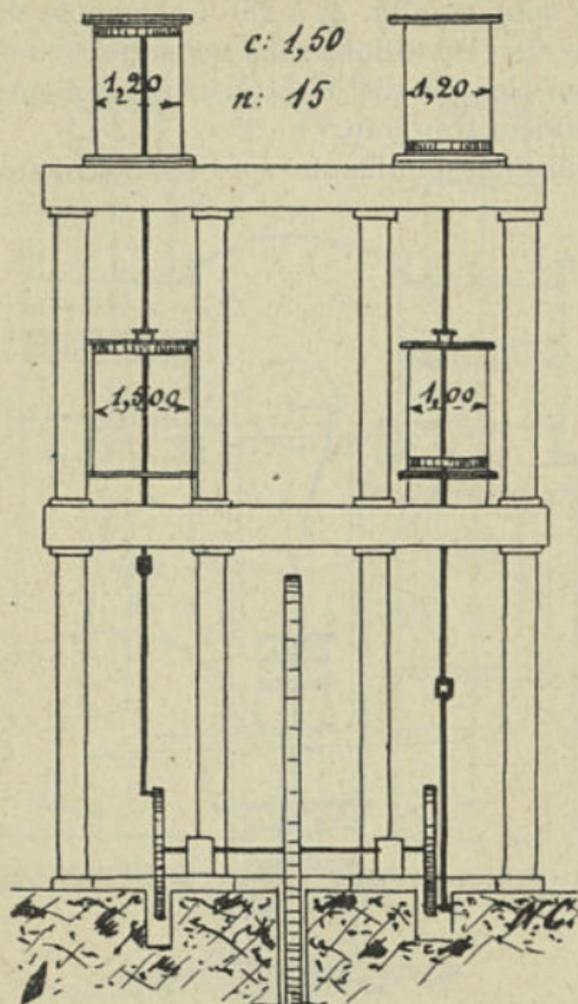


Fig. 26. Soufflerie Compound à action directe et bielle pendante. Cockerill.

des machines soufflantes qu'on a vu figurer pour la première fois à l'Exposition universelle de 1889, actionnées par des moteurs à gaz utilisant les gaz perdus des hauts fourneaux.

IV. DES RÉGULATEURS

Comme nous venons de le dire, les buses doivent fournir l'air à une pression aussi uniforme que

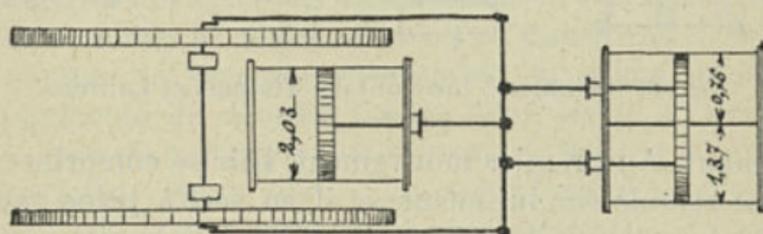
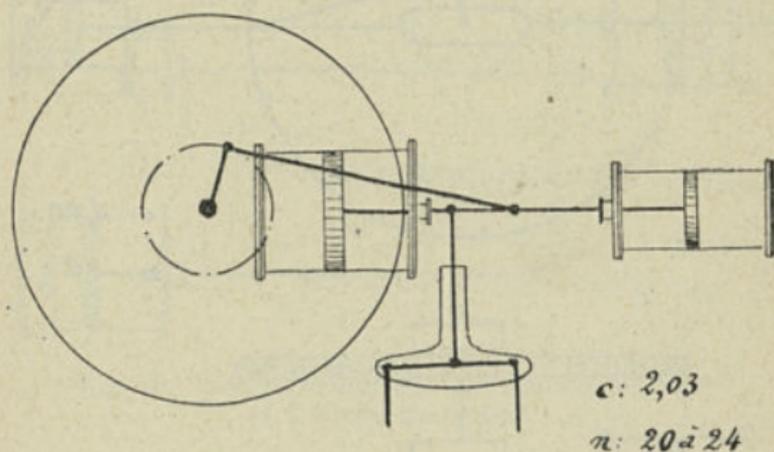


Fig. 27. Soufflerie horizontale à deux bielles, système Woolf (Etats-Unis).

possible. Les machines soufflantes ne peuvent donner un vent continu; elles ne peuvent donner non plus une densité et une vitesse égales dans tous les instants de la chute du plateau compri-

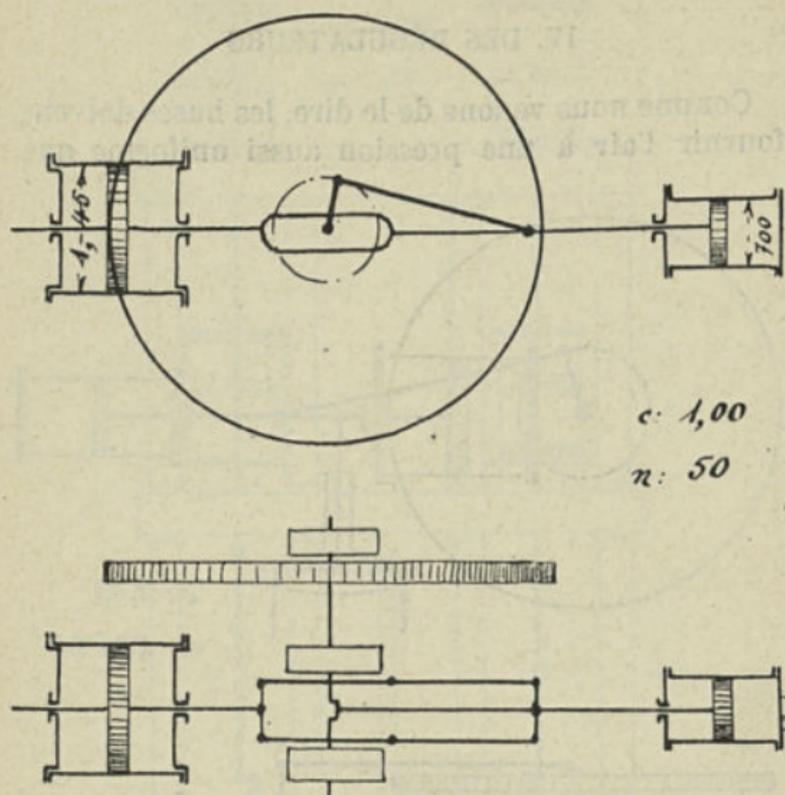


Fig. 28. Soufflerie horizontale, Thomas et Laurens.

mant. Au premier mouvement, l'air se comprime, se refoule sur lui-même, et il en sort à peine par la buse; vers le milieu de sa course, la vitesse a augmenté; mais c'est dans les derniers moments qu'elle a acquis son maximum, en raison de la densité alors plus grande du fluide élastique.

De toutes les machines soufflantes la plus irrégulière serait celle à un cylindre, car le piston n'a jamais une vitesse régulière.

Pour arriver à avoir une pression pour ainsi

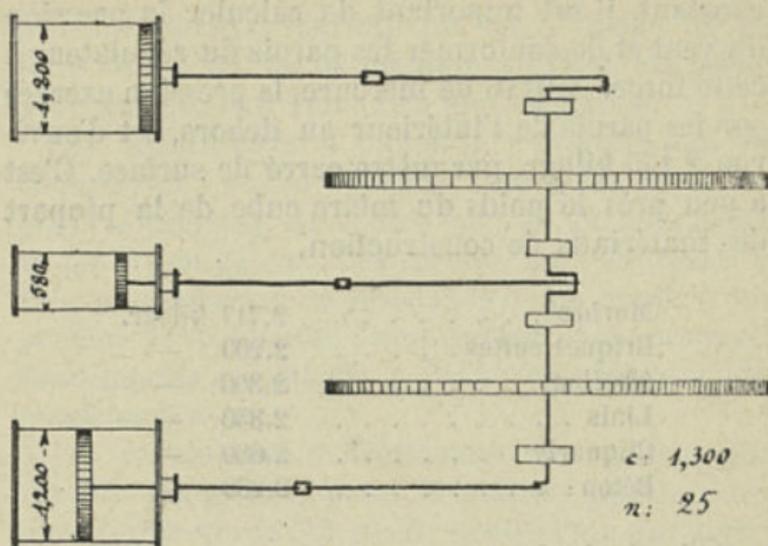


Fig. 29. Soufflerie horizontale à deux soufflets et à bielle de retour.

dire constante à la sortie des buses, on a donc imaginé des appareils dits *régulateurs*. On distingue deux sortes de régulateurs : l'un dans lequel l'air occupe un espace constamment le même, mais augmente de densité; l'autre dans lequel le vent est soumis à une pression étrangère, dans un espace variable, en un mot : les *régulateurs à capacité constante*; les *régulateurs à capacité variable*.

Les *régulateurs à capacité constante* sont de grandes chambres dans lesquelles on force l'air à entrer, et d'où il se rend à la buse avec une vitesse uniforme. Ces réservoirs étant fort considérables par rapport à la machine soufflante, les variations de vitesse et de densité sont insensibles.

Quand on construit les *régulateurs à volume*

constant, il est important de calculer la pression du vent et de conformer les parois du régulateur à cette force. A 0^m 16 de mercure, la pression exercée sur les parois de l'intérieur au dehors, est d'environ 2,175 kilogr. par mètre carré de surface. C'est à peu près le poids du mètre cube de la plupart des matériaux de construction.

Marbre	2,717 kilogr.
Briques cuites	2,200 —
Moëllons	2,300 —
Liais	2,350 —
Cliquart	2,600 —
Béton	2,200 —

Il faudrait donc, en employant ces matières, donner un mètre d'épaisseur au moins aux parois du régulateur.

Les régulateurs à volume constant sont construits de manière à contenir vingt fois plus d'air que le cylindre à vent d'une machine soufflante à petite vitesse. Un régulateur qui cube 137 mètres, suffit pour deux hauts fourneaux au coke, produisant 20,000 kilogr. de fonte chacun par vingt-quatre heures.

Lorsque le porte-vent est d'une certaine capacité, il peut quelquefois servir de régulateur. M. Culmann a observé que si deux feux sont activés par une machine soufflante qui n'a point de régulateur, c'est dans le feu le plus éloigné de la soufflerie que le travail de l'affinerie s'exécute avec le plus de facilité; c'est ce feu qui reçoit le vent le plus uniforme. D'après cela on devrait donner aux porte-vent la plus grande longueur

possible, lorsque surtout on est à même de les faire en métal, ou de manière à éviter les pertes d'air qui peuvent avoir lieu par les joints.

Les *régulateurs à capacité variable* sont de deux sortes : ou ce sont des réservoirs dans lesquels la pression est opérée par un piston chargé de poids ; ou ce sont des caisses dans lesquelles le vent doit éprouver la résistance d'une nappe d'eau portant le poids de l'atmosphère. Les premiers sont appelés *régulateurs à frottement* ; les seconds, *régulateurs à eau*.

Les régulateurs à frottement ressemblent aux machines à piston ; mais le plateau mobile porte une charge qui le fait réagir contre l'air qui arrive de la machine. Lorsque le vent afflue dans le régulateur, il force le piston à monter ; mais, sitôt que l'intermittence a lieu, le piston descend ; l'air éprouve alors une pression uniforme et s'échappe avec une vitesse constante.

Rien n'est plus propre à donner une idée des régulateurs à frottement, que la machine employée à Paimpont composée de deux caisses A (fig. 30), surmontées d'une troisième B soutenue par quatre colonnes E qui livrent passage au vent. Les pistons des caisses A, en remontant alternativement, forcent l'air à passer par les colonnes creuses et les soupapes G dans la caisse supérieure qui n'est, à proprement parler, qu'un réservoir ; le flotteur G' est chargé d'un poids de 600 kilogr. et comprime l'air qui s'échappe par le tuyau F.

Quelquefois ces régulateurs sont des cylindres de fonte bien alésés, et les pistons ressemblent à ceux des machines soufflantes. Ces cylindres ne

portent de soupape qu'à l'endroit qui communique avec la machine soufflante, afin d'empêcher l'air de rentrer. Ces soupapes doivent être aussi près

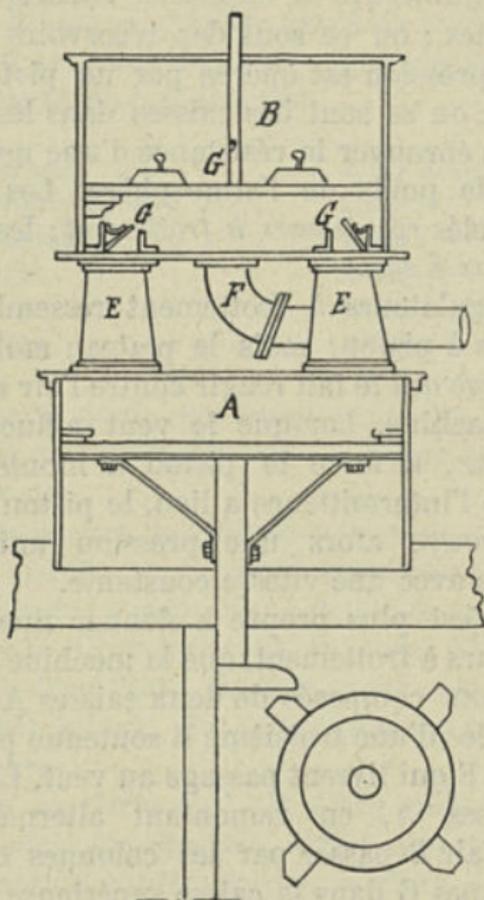


Fig. 30. Soufflerie de Paimpont ou régulateur à frottement.

que possible de la machine même; sans cette condition, elles augmenteraient l'espace nuisible.

La soupape oppose une résistance à l'entrée de

l'air dans le réservoir, et cette résistance est en raison de la densité du vent du régulateur. Le piston de la machine doit donc parcourir, dans le mouvement descendant, un certain espace avant que l'air ait acquis la puissance nécessaire pour soulever la soupape de communication. Si la densité de l'air qui entre dans le régulateur restait la même, la quantité de vent introduite par la soupape devrait être constante et égale à celle qui sortirait par la buse; mais l'air contenu dans le cylindre soufflant et comprimé par le piston, éprouve, à son entrée dans le régulateur, une compression continuelle. Le piston de la machine a donc à vaincre cette force dans son mouvement, et on est obligé d'augmenter alors sa puissance comprimante. C'est ce qu'on fait en donnant au régulateur une capacité beaucoup plus grande que celle du cylindre compresseur.

La différence de densité de l'air du cylindre et de celui du régulateur est en raison inverse de l'ouverture par laquelle l'air entre dans le régulateur. Il faut donc la faire de manière à rendre la résistance la plus petite possible. Elle doit avoir une soupape pesante qui ne s'ouvre qu'en partie, afin qu'elle se referme promptement et que l'air ne retourne pas du régulateur dans le cylindre. On doit alors considérer l'espace par lequel l'air sort, comme le quart de l'ouverture totale; et sans avoir égard à la valeur trouvée par le calcul, il faut que dans l'exécution cette ouverture soit quatre fois plus grande.

Le piston du régulateur doit être élevé, pendant l'entrée de l'air du cylindre, de toute la quantité

qui excède celle dépensée par la tuyère, et cette élévation doit être égale à l'abaissement qui a lieu pendant qu'il entre de nouvel air dans le cylindre, et que celui-ci cesse d'en envoyer dans le régulateur; abaissement occasionné par la continuation de la sortie de l'air du régulateur, qui est supposé avoir une densité et une vitesse uniformes. Il est nécessaire que l'élévation commence avant que le piston du régulateur soit descendu jusqu'au fond, pour que l'air sorte sans interruption. Il faut pour cela que la capacité du régulateur soit le double de celle du cylindre.

Le *régulateur à eau* se compose d'une caisse, plongée dans l'eau jusqu'à une certaine hauteur; l'air comprimé de ce réservoir réagit sur l'eau, et ne trouvant plus d'issue par la soupape d'entrée, est forcé de s'échapper par la buse. L'eau de la caisse est refoulée par le ressort du fluide élastique, et remonte dans la caisse extérieure où elle doit vaincre la pesanteur de l'atmosphère. La différence de pression est exprimée par la différence de niveau de l'eau intérieure avec celle extérieure. Le frottement dans les cylindres est peu considérable, si on le compare à celui que les ressorts occasionnent dans les soufflets de bois. Il est extrêmement difficile d'indiquer à l'avance la valeur de cette résistance, parce qu'elle dépend de l'exactitude de la construction et de la perfection de l'alésage. Cependant les Anglais estiment ce frottement, lorsque la machine est très bien faite, à une livre par chaque pouce anglais de diamètre. Il est plus exact de compter sur le double et même sur le triple. Cette résistance, dans une machine

mal faite, s'élèverait à 20 livres par pouce de diamètre.

V. AIR CHAUD

En 1822, E.-F. Leuchs proposa de chauffer l'air destiné aux foyers métallurgiques; ce n'est qu'en 1828 seulement que James B. Neilson imagina le premier appareil pour souffler de l'air chaud dans les hauts fourneaux de la Clyde, en Ecosse. Cette invention, malgré les imperfections des premiers appareils employés au chauffage de l'air, fit faire de tels pas à l'industrie du fer en Angleterre, que de 1839 à 1852, la production de la fonte a plus que doublé. L'intervalle de 1829 à 1839 fut employé en tâtonnements, pour amener le nouveau procédé à sa perfection, en essais de tous genres, à la suite desquels Neilson perfectionna ses appareils et peu de temps après tous les hauts fourneaux écossais marchaient à l'air chaud.

Aujourd'hui, la fabrication de la fonte à l'air froid est très réduite, surtout depuis qu'il a été reconnu qu'au moyen d'une certaine composition de la charge, on pouvait remédier à l'influence de l'air chaud sur la nature de la fonte. Le premier point qu'il n'avait pu fixer et que prudemment il avait laissé à l'expérience, était la quantité d'air à introduire dans le fourneau, en place d'une quantité connue d'air froid; le second regardait la pression sous laquelle l'air chaud devait être lancé; le troisième, le degré de chaleur auquel on devait l'élever avant de le projeter par la tuyère; toutes questions d'un haut intérêt, mais d'un grand embarras, dans un champ tout nouveau, où rien de

bien certain, dans le passé qu'on allait rayer d'un seul coup, ne pouvait servir de guide.

Le volume, la pression, la chaleur de l'air introduit dans les hauts fourneaux, ne peuvent pas être déterminés *à priori* : ils dépendent non seulement l'un de l'autre, mais encore de la nature du combustible employé. Au premier coup d'œil, il paraît évident qu'il n'est pas nécessaire de projeter tant de vent dans l'ouvrage du fourneau. Du moment que l'air introduit se brûle plus complètement lorsqu'il est chaud, tout le superflu de l'air froid devient inutile, et on peut, sans inconvénient, diminuer le volume de vent nécessaire à la production d'une quantité donnée de fonte. Dans la Haute-Saône, la hauteur du mercure pour l'air froid est de 0,035, et pour l'air chaud de 0,040.

D'après M. Dufrenoy, la quantité d'air froid lancé dans des fourneaux écossais, qui était de 3,500 pieds cubes par minute, fut diminuée jusqu'à 2,627 pieds cubes, quand il fut chauffé à 322 degrés centigrades.

Avec la haute température développée aujourd'hui dans les fourneaux, beaucoup de minerais qui semblaient réfractaires autrefois, se fondent avec une certaine facilité et donnent de bons résultats; mais, il faut, pour cela, que les fondants soient bien appliqués et que le dosage en soit bien fait. Sans cela, c'est toujours aux dépens d'une certaine quantité de fer que les laitiers se vitrifient. Là est le secret de ces laitiers fusibles, si chargés de fer, qui valent mieux que de riches minerais.

Le degré de température de l'air injecté par la tuyère a beaucoup d'influence sur le rendement

total du fourneau. Avant que les fourneaux de La Voulte fussent mis à l'air chaud, ils produisaient seulement chacun 7,000 kilogr. de fonte par vingt-quatre heures, et consommaient 275 kilogr. de coke pour 100 kilogr. de fonte. On introduisit du vent chauffé de 190° à 210° et le rendement fut de suite porté à 9,600 kilogr. de fonte, de meilleure qualité ; la consommation du coke fut réduite à 130 kilogr. Plus tard, l'air ayant acquis une chaleur de 300 degrés, la production s'éleva à 14,000 kilogr. par vingt-quatre heures, et la dépense de coke à 110 kilogr. pour 100 de fonte.

L'économie faite sur le combustible paraît être également en raison de l'élévation de température de l'air, et cela sans distinction d'espèce.

Le tableau suivant nous donne les chiffres d'augmentation de production et d'économie de combustible pour un certain nombre d'usines ayant introduit les premières le chauffage de l'air :

(Voir Tableau page suivante).

Noms des usines	Température de l'air en degrés centigrades	Economie de combustible pour cent	Augmentation de production pour cent	Espèce de combustible
Reden	87°	10	7	coke
Weding.	87	11	3.6	»
Malapane.	143	25	4	charbon
Calder	147	55	16	coke
Rioupéroux.	162	30	»	anthracite
Butterley.	182	100	»	houille
Codnorpark.	204	45	»	»
Wartez.	204	43	33	coke
Frederick.	206	61	39	charbon
La Clyde.	222	96	51	houille
La Voulte	230	72	28	coke
Vienne	300	40	27	»
Calder	322	102	25	houille

Rogers donne, comme moyennes approximatives, les résultats suivants en tonnes de fonte, de hauts fourneaux consommant du minerai d'une teneur de 40 pour 100, avec des fondants suffisamment appropriés et ne donnant point, en tout cas, un laitier noir et lourd :

Air fourni par minute	Tonnes de fonte produites par semaine			
	Air froid		Air chaud	
	Fonte grise	Fonte blanche	Fonte grise	Fonte blanche
1.000 pieds cubes. . .	20 à	25	28 à	35
2.000 — . . .	40 à	50	56 à	70
3.000 — . . .	60 à	75	84 à	105
4.000 — . . .	80 à	100	112 à	140
5.000 — . . .	100 à	125	140 à	175
6.000 — . . .	120 à	150	168 à	210
7.000 — . . .	140 à	175	196 à	245
8.000 — . . .	160 à	200	224 à	280

Quant à la consommation de coke, elle serait la même dans les deux cas pour un même temps donné. Il a trouvé :

Pour 1,000 pieds cubes d'air : 317 kilogr. en 1 heure, soit 3,800 kilogr. en 12 heures.

Pour 2,000 pieds cubes d'air : 634 kilogr. en 1 heure, soit 7,600 kilogr. en 12 heures.

Pour 3,000 pieds cubes d'air : 951 kilogr. en 1 heure, soit 11,400 kilogr. en 12 heures.

Pour 4,000 pieds cubes d'air : 1,268 kilogr. en 1 heure, soit 15,200 kilogr. en 12 heures.

Maitre de forges. — T. I.

9

Pour 5,000 pieds cubes d'air : 1,585 kilogr. en 1 heure, soit 19,000 kilogr. en 12 heures.

Pour 6,000 pieds cubes d'air : 1,902 kilogr. en 1 heure, soit 22,800 kilogr. en 12 heures.

Pour 7,000 pieds cubes d'air : 2,219 kilogr. en 1 heure, soit 26,600 kilogr. en 12 heures.

Pour 8,000 pieds cubes d'air : 2,536 kilogr. en 1 heure, soit 30,400 kilogr. en 12 heures.

Beaucoup de maîtres de forges pensaient qu'au delà d'une certaine température, 180 à 200 degrés par exemple, l'air ne produit que de la fonte impropre à donner de bon fer. Cependant à la même époque, à l'usine de Zuisviller (Bas-Rhin), on a trouvé une amélioration sensible dans la qualité du fer fait avec des fontes ainsi obtenues, lesquelles n'offraient d'ailleurs aucune difficulté particulière à l'affinage; au Creusot, la fonte à air chauffé, soumise au puddlage, donnait du fer nerveux, passant bien au laminoir; il en a été de même à Decazeville.

Quant à la fonte, il paraît qu'elle acquiert de la qualité pour le moulage : c'est ce qu'on a constaté dans les Vosges, à Attignéville, Vrécourt et Rebauvois, où l'air chauffé à 360 degrés économisa 20 0/0 de charbon; la fonte pour moulage est devenue plus homogène, plus grise, plus douce, les pièces moulées plus nettes, plus tenaces, se laissant tourner facilement; la même chose a été constatée au fourneau de Torteron, dans le Cher, et ailleurs.

Au surplus, l'analyse chimique ne démontre aucune différence sensible dans les fontes faites avec l'ancien et le nouveau procédé. Il est bon,

cependant, de faire remarquer que M. Mitchell a cru découvrir que le fer provenant de fonte faite à l'air chaud contenait, en général, plus de soufre que celui obtenu avec de la fonte à l'air froid.

Les expériences faites dans les affineries de la Haute-Silésie ont eu des résultats analogues. A l'air froid, 100 kilogr. de fer en barres ont été obtenus avec 139 kilogr. de fonte et 15,7 pieds cubes de charbon. Avec l'air chauffé de 120 à 150 degrés, la consommation de fonte ne s'est plus élevée qu'à 126 kilogr. ; mais la dépense de charbon a été de 16,7 pieds cubes. De 160 à 200 degrés, l'air chaud a donné pour résultat une production de 134 kilogr. de fonte et une consommation de 14,2 pieds cubes de charbon.

On faisait varier la température du vent suivant les différentes phases de l'affinage, et on lui donnait :

168	degrés	pendant	le soulèvement
172	—	—	l'avalement
184	—	—	l'attachement
205	—	—	le forgeage

Le tableau inséré page suivante résume les diverses circonstances du travail établies en mesures métriques.

On a remarqué qu'avec l'air chaud, l'opération était plus longue; qu'il y avait économie de matières; que la fonte était plus liquide dans le fourneau, l'allure plus crue; qu'enfin il fallait opérer, dans le même temps, trois soulèvements au lieu d'un.

En résumé, il est aujourd'hui bien reconnu que

Température de l'air	Diamètre des buses	Pression manométrique	Charbon consommé	Air consommé par minute	Un kilogramme de charbon pur a consommé
			brut	métr. cubes	
			sans cendres	kilogr.	
froide	0 ^m 042	0 ^m 036	3k41	17.40	7k50
150° C.	0.042	0.041	2.31	12.92	7.60
225° C.	0.046	0.041	2.29	13.32	7.60

l'air chaud porte plus de chaleur dans les parties basses du fourneau, en abaissant la température du gueulard; qu'il rend les matières plus fusibles et le travail plus facile; qu'il conserve mieux les parois et assure une allure plus régulière; qu'il donne une forte économie de combustible et augmente beaucoup la production journalière.

Dans les feux d'affinerie, l'allure devient plus crue et la durée de l'opération est plus grande; mais il y a plus de chaleur devant la tuyère et les parties du fourneau en contact avec le feu sont mieux conservées; les scories sont en moindre quantité, plus liquides et plus pauvres; il y a économie de combustible et diminution de déchet.

Le même effet est produit dans les cubilots; il y a augmentation de chaleur dans les parties inférieures et diminution au

haut de la cuve; la fonte acquiert plus de liquidité, reste plus grise et devient plus facile à mouler. On trouve également une économie de combustible, une diminution de déchet et une augmentation de production journalière, à quantité égale de vent.

Le peu d'essais faits dans les petites forges de maréchal permettent déjà de conclure qu'il y a aussi économie dans le temps employé au forgeage et dans le déchet donné par le fer forgé.

VI. APPAREILS A CHAUFFER L'AIR

Le nombre des appareils à chauffer l'air employés dans les usines métallurgiques est considérable, mais tous peuvent se ramener à deux types. Dans le premier le vent est chauffé par son passage à travers des tuyaux en fonte disposés dans une chambre en maçonnerie où ils sont extérieurement en contact avec les gaz chauds. Dans le deuxième type sont rangés les appareils composés de deux ou plusieurs chambres en briques réfractaires traversées alternativement par les gaz chauds ou par l'air à chauffer; pendant que l'air traverse une chambre en la dépouillant de la chaleur qui y était accumulée par le passage préalable des gaz chauds, l'autre chambre reçoit la chaleur des dits gaz.

Les appareils du premier type sont connus sous le nom d'*appareils* ou *tuyaux en fonte*; ceux du deuxième *appareils en briques* ou à régénérateurs.

Appareils en fonte

Il existe un très grand nombre d'appareils en fonte pour le chauffage du vent des hauts fourneaux, mais la plupart d'entre eux sont aujourd'hui abandonnés et on peut même dire que ce mode même de chauffage ne se rencontre plus que rarement, ayant laissé la place aux appareils en briques qui coûtent plus cher pour l'installation, mais par contre présentent de nombreux avantages, comme on le verra par la suite.

On distingue deux classes de *tuyaux en fonte* : les *tuyaux horizontaux* et les *tuyaux verticaux*.

Tuyaux horizontaux. Appareil Taylor. — Le premier de ces appareils fut l'*appareil Taylor*, composé de deux forts tuyaux horizontaux A (fig. 31), traversant un foyer à réverbère, construit en briques réfractaires. Sur ces deux tuyaux sont placées huit tubulures B, auxquelles s'adaptent des tuyaux mi-circulaires C, qui communiquent d'un tuyau principal à l'autre. Le foyer est voûté par une courbe parallèle aux tuyaux circulaires, et la flamme circule dans toute la longueur du foyer. Une pareille installation chauffe à 300° environ, 13 à 14 mètres cubes par minute.

Appareil Calder. — L'appareil Calder (fig. 32 et 33), employé d'abord au fourneau de ce nom, près de Glasgow, en Ecosse, est fondé exactement sur le même principe. La seule différence qui existe, c'est que les tuyaux courbes, adaptés aux neuf tubulures, au lieu d'être de portion de cercle, sont beaucoup plus allongés et s'élèvent dans le foyer en siphons. On peut y signaler quelques légers

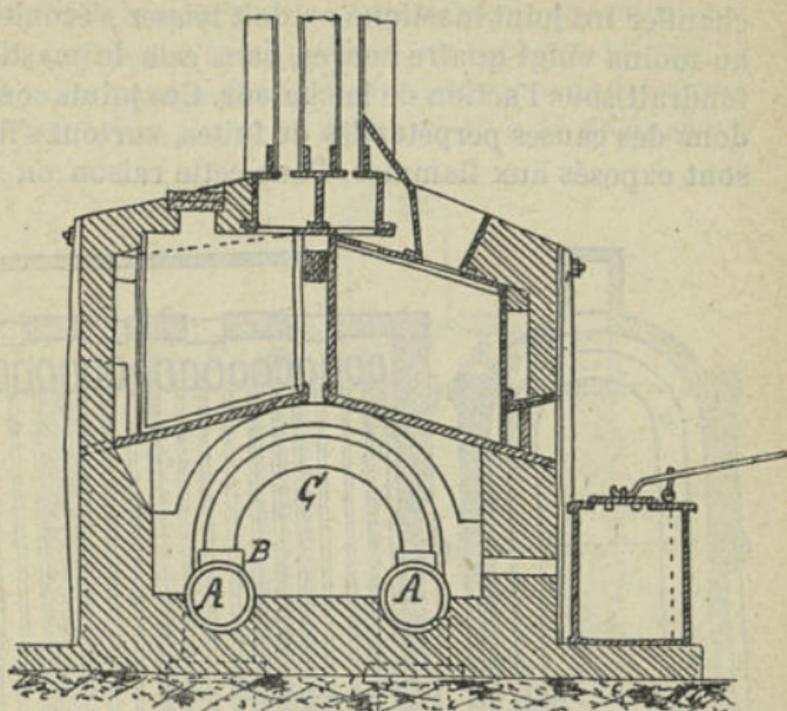


Fig. 31. Appareil Taylor.

changements dans les détails de construction du fourneau, entre autres la manière dont se fait le tirage qui s'opère par des ouvertures pratiquées dans la voûte; mais, en général, toutes les particularités des dispositions principales sont basées sur les mêmes théories.

Dans ces appareils l'assemblage des tuyaux se fait à l'aide de manchons à emboîtement et on garnit le joint avec du mastic de fonte composé de trente parties de limaille de fonte finement tamisée, d'une partie de sel ammoniac et une partie de fleur de soufre; le tout arrosé de vinaigre. Avant de

chauffer un joint mastiqué on doit laisser s'écouler au moins vingt-quatre heures, sans cela le mastic fondrait sous l'action de la chaleur. Ces joints sont donc des causes perpétuelles de fuites, surtout s'ils sont exposés aux flammes. Pour cette raison on a

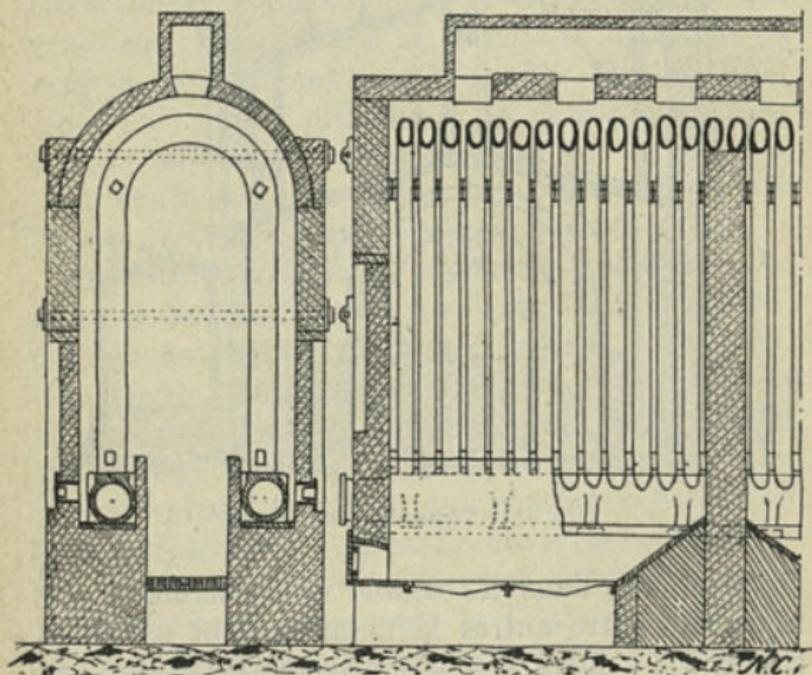


Fig. 32 et 33. Appareil à tuyaux de chauffe avec arcades en V, type Calder.

cherché à les maintenir en dehors de la chambre de chauffe, on inutilise ainsi une partie de la surface de chauffe et on augmente le poids de l'appareil par rapport à sa surface utile.

En employant des tuyaux en fonte à cloison intermédiaire comme on le voit à la figure 34, on

diminue le nombre de joints, mais en revanche, on augmente la résistance qu'éprouve le vent à circuler par ces changements brusques de direction.

Les tuyaux sont en fonte de 15 à 25 millimètres

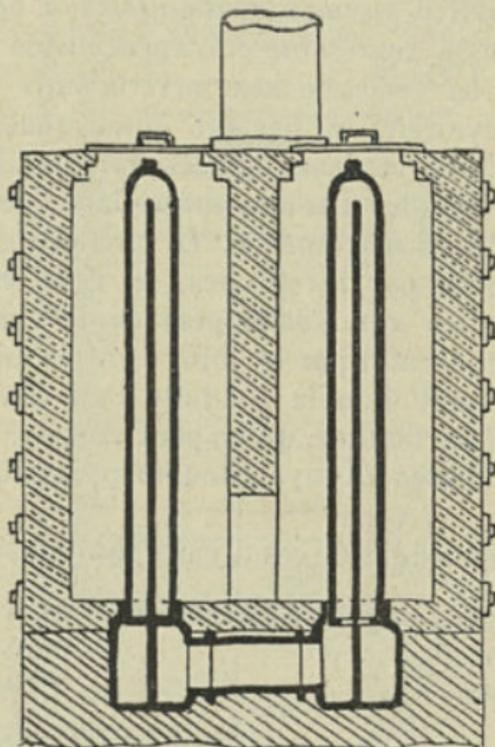


Fig. 34. Appareil à tuyaux horizontaux cloisonnés.
Usine de Bessèges.

d'épaisseur, et la nature de la fonte employée a une grande importance sur la durée de l'appareil; ainsi une fonte phosphoreuse doit être rejetée, car elle est susceptible de se rompre. Un excès de silicium rend également la fonte cassante. La manière

9.

dont les tuyaux ont été moulés et coulés a son importance sur la durée. Si l'épaisseur du tuyau n'est pas régulière, il y aura une partie qui se refroidira plus vite que l'autre et cela suffit pour provoquer des fissures.

Appareil à tuyaux horizontaux à cloison. — La figure 35 représente un appareil de ce genre appliqué en 1865. Le vent arrive dans l'appareil par le tuyau A, se partage entre quatre ou six tuyaux B, à cloisons, placés horizontalement et parallèlement les uns aux autres dans une chambre de chauffe en maçonnerie. La circulation du vent est indiquée par les flèches, le vent entrant au point où les gaz s'échappent de la chambre de chauffe et sortant par le point d'entrée desdits gaz. Là il se rend dans la conduite d'air chaud C. Un dispositif particulier, qu'on peut voir sur la figure, permet d'isoler un tuyau double quelconque en cas d'avarie.

Les dimensions de ces tuyaux sont les suivantes :

Longueur, compris les emboîtages.	2 ^m 50 à 3 ^m »
Largeur	0 ^m 20 à 0 ^m 30
Hauteur	0 ^m 60 à 0 ^m 70

Généralement on établit six à huit rangées horizontales et il est bien évident que plus on augmente leur nombre, mieux on utilise la chaleur, mais en même temps on augmente considérablement les résistances à la circulation.

Les tuyaux sont fixés par leur extrémité à emboîtement et posent librement sur des traverses métalliques par leur extrémité arrière qui porte à cet effet une patte venue de fonte P, afin de per-

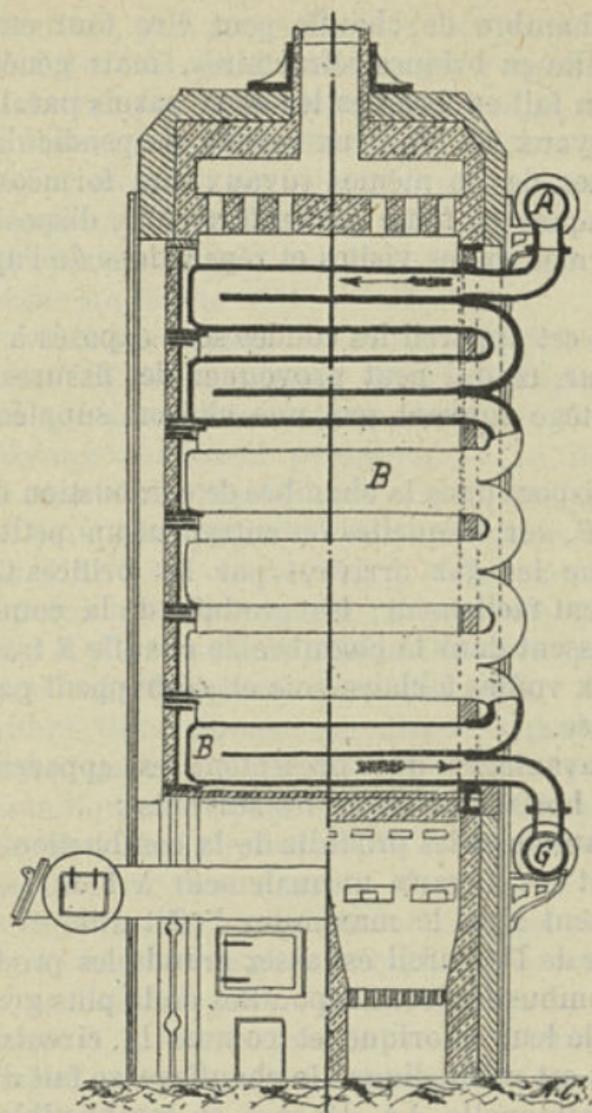


Fig. 35. Appareil à tuyaux horizontaux cloisonnés.

mettre la dilatation libre des tuyaux sous l'action de la chaleur.

La chambre de chauffe peut être tout entière construite en briques réfractaires, mais généralement on fait en briques les deux parois parallèles aux tuyaux et les deux parois perpendiculaires aux axes de ces mêmes tuyaux sont formées par des plaques en fonte ou en forte tôle, disposition qui permet toutes visites et réparations de l'appareil.

Dans cet appareil les coudes sont exposés à l'air extérieur, ce qui peut provoquer des fissures; on les protège souvent par une cloison supplémentaire.

On dispose dans la chambre de combustion deux grilles F, sur lesquelles on entretient un petit feu pour que les gaz arrivant par les orifices G, se rallument facilement; les produits de la combustion passent dans la chambre de chauffe à travers les deux voûtes à claire-voie et s'échappent par la cheminée.

Les avantages que présentent les appareils à tuyaux horizontaux sont les suivants :

La flamme et les produits de la combustion rencontrent les tuyaux normalement à leur axe et produisent ainsi le maximum d'effet utile et si la hauteur de l'appareil est assez grande les produits de la combustion sont dépouillés de la plus grande partie de leur calorique et comme la circulation du vent est méthodique, le chauffage se fait d'une façon rationnelle. La dépense en combustible est ainsi très faible.

Les inconvénients qu'on remarque dans ces appareils sont assez sérieux; aussi, depuis 1880, a-t-on à peu près abandonné ces appareils. En effet, on

ne pouvait pas augmenter la longueur de ces tuyaux au delà de 3 mètres, sans s'exposer à les voir se rompre sous leur propre poids; on s'est donc trouvé forcé de multiplier le nombre des rangées horizontales, par conséquent le nombre des changements de direction; d'où pertes énormes par frottement et augmentation de travail pour la machine soufflante.

Tuyaux verticaux. — Les tuyaux verticaux se divisent en deux classes bien distinctes : les *tuyaux pendants* et les *tuyaux débout*.

Tuyaux verticaux pendants. — La figure 36 nous montre la disposition qu'on adopte généralement pour les appareils à tuyaux verticaux pendants. Une série de tuyaux à cloison médiane A sont réunis à leur partie supérieure par des coudes B placés au-dessus de la chambre de chauffe et pendent librement dans l'intérieur de cette chambre. Généralement on dispose dans la même chambre quatre ou six séries identiques parallèles communiquant par des tubulures spéciales avec la conduite C, de l'air, venant de la soufflerie.

Les gaz arrivent dans la chambre de combustion D par le bas, et pénètrent par des orifices E dans la chambre de chauffe qu'ils parcourent dans toute sa hauteur pour s'échapper par des orifices latéraux O, ménagés dans les murs latéraux de la chambre, puis ils redescendent jusqu'au carneau de la cheminée.

En construisant ces appareils, on avait espéré diminuer les chances de rupture, ayant laissé toute facilité possible à la dilatation des tuyaux; mais, malheureusement, on a constaté que ces tuyaux

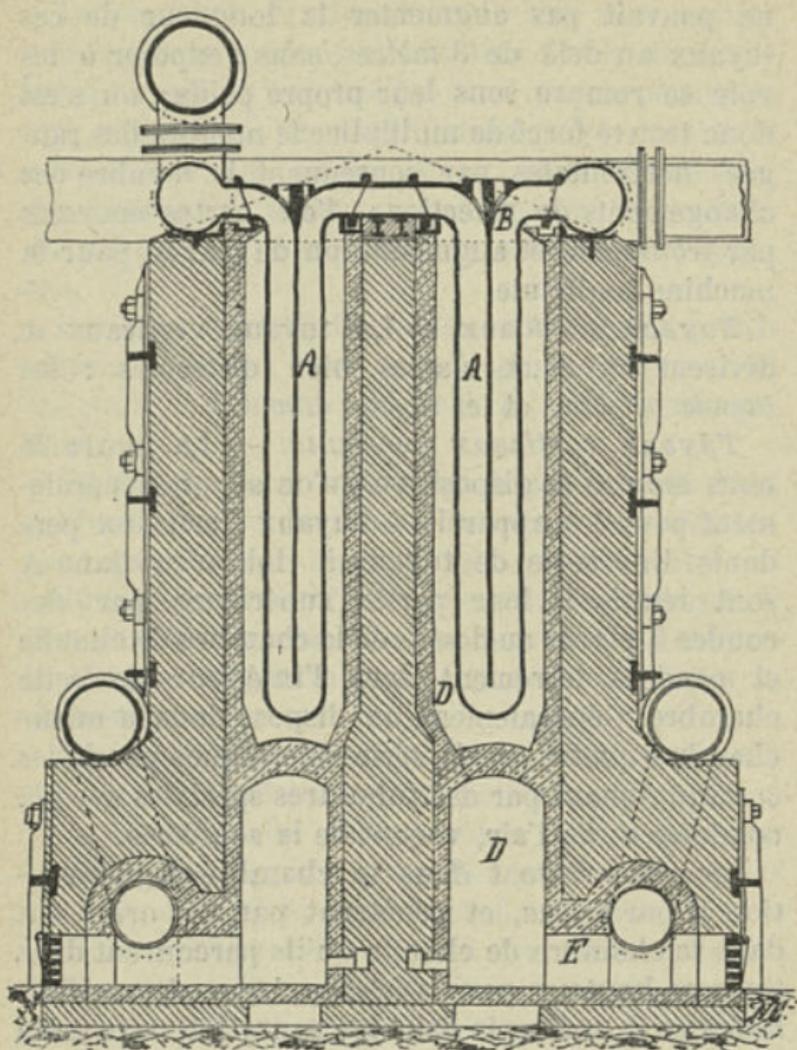


Fig. 36. Appareil à tuyaux verticaux pendants.

se fendillent par leur propre poids et ces fentes tendent toujours à s'ouvrir. En outre, les coudes de raccordement étant en dehors de la chambre de

chauffe ne sont pas utilisés comme surface de chauffe et ne font qu'augmenter le poids de l'appareil inutilement.

Tuyaux verticaux debout. — La figure 37 indique la disposition d'un appareil de ce genre

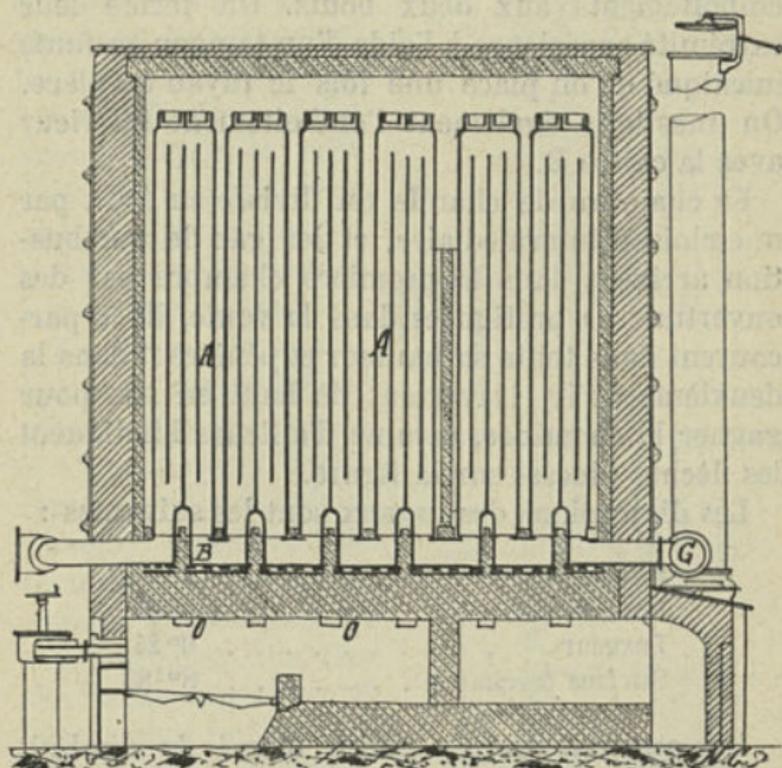


Fig. 37. Appareil à tuyaux verticaux debout.

employé dans les usines du Cleveland; il est composé d'un certain nombre de tuyaux à cloison A communiquant entre eux par l'intermédiaire d'une caisse B horizontale avec laquelle ils sont assemblés par emboîtement. Le vent arrivant

par la conduite C se partage en deux ou trois courants distincts qui parcourent chacun une série de tuyaux verticaux cloisonnés.

Ces tuyaux, pour la facilité du moulage, sont ouverts à leurs extrémités et terminés par des emboitements aux deux bouts. On ferme leur extrémité supérieure à l'aide d'un tampon en fonte mastiqué qu'on place une fois le tuyau en place. On mastique également l'emboîtement inférieur avec la caisse B.

La chambre de chauffe est divisée en deux par une cloison intermédiaire, et les gaz de combustion arrivent dans la première chambre par des ouvertures O pratiquées dans la voûte, ils la parcourent dans toute sa hauteur et pénètrent dans la deuxième qu'ils traversent de haut en bas pour gagner la cheminée, comme d'ailleurs l'indiquent les flèches placées sur la figure.

Les dimensions des tuyaux sont les suivantes :

Hauteur	5 ^m 65
Longueur	0 ^m 65
Largeur	0 ^m 24
Surface de chauffe	8 ^m 289

Un appareil de ce genre formé de dix-huit tuyaux pareils aura une surface de chauffe utile de 160^m2 environ.

On voit sur la figure des cloisons X ouvertes aux deux extrémités et qui n'ont d'autre but que de renforcer le tuyau.

Tuyaux verticaux à siphons. — Dans cette espèce d'appareil, on dispose une série de boîtes A (fig. 38) qu'on relie entre elles par des tubes B

verticaux formant siphons dans le sens longitudinal de l'appareil. En général, on place plusieurs séries de boîtes A dans le même massif, et le vent est amené par un collecteur sur lequel viennent se brancher les tuyaux en siphons.

Un collecteur d'air chaud réunit le vent de toutes les séries. Les gaz de combustion arrivent par le bas et sortent par le haut.

La figure 39 représente un appareil à siphons employé à l'usine d'Ayresome (Angleterre). On dispose dans chaque chambre de chauffe deux séries de caisses horizontales A réunies entre elles par des tubes verticaux B légèrement inclinés les uns contre les autres. L'air arrive par la conduite C et circule en sens contraire de celui

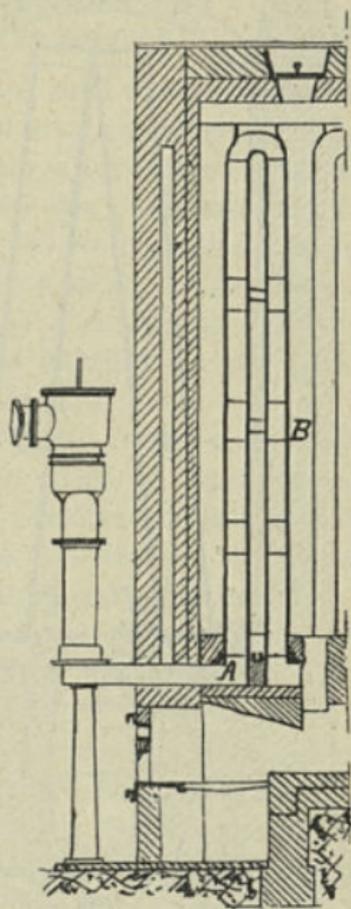


Fig. 38. Appareil à tuyaux verticaux à siphons.

des gaz de la combustion. Ces derniers passent dans la chambre de chauffe par des orifices D réservés dans la voûte et sortent par deux orifices latéraux E pour se rendre dans la cheminée.

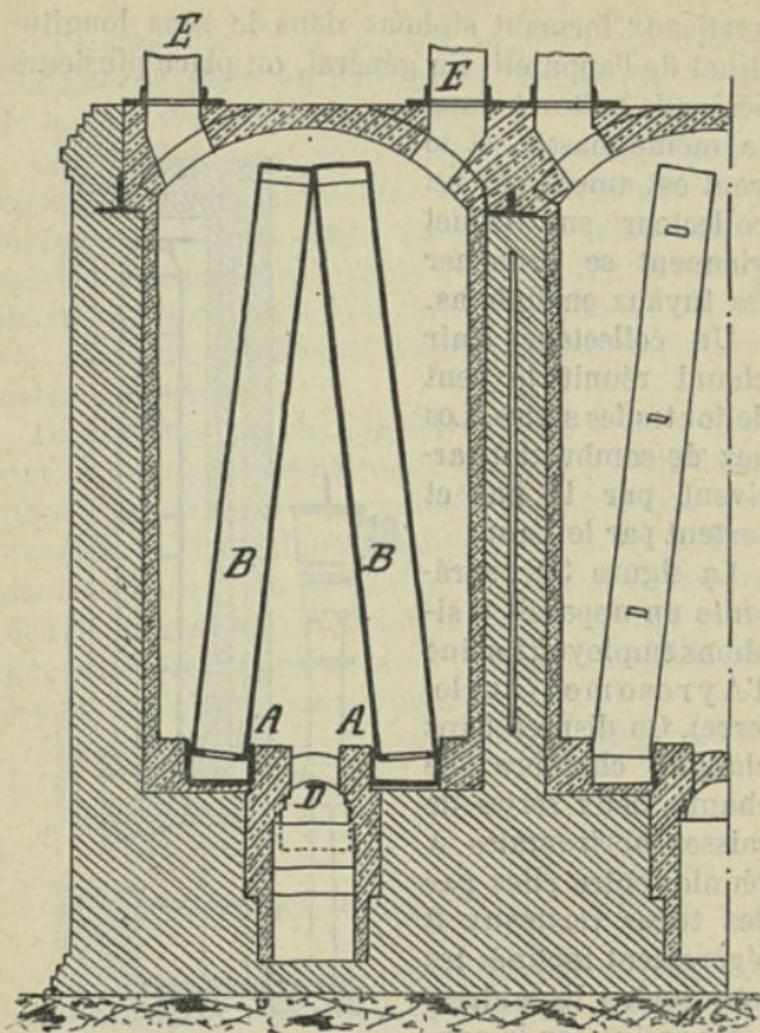


Fig. 39. Appareil à siphons de l'usine d'Ayresome.

De tous les appareils composés de tuyaux en fonte, le système à tuyaux verticaux et débout est celui qui est le plus employé. A surface de chauffe égale, il coûte moins cher que le type à tuyaux

horizontaux parce qu'il est à peu près complètement exposé à la chaleur. En outre, les tuyaux verticaux sont moins sujets à se courber.

Appareils en briques

Les appareils en briques sont composés de deux ou plusieurs chambres en briques réfractaires dans lesquelles le vent circule alternativement. Dans son passage à travers une des chambres, le vent reprend la chaleur qui a été emmagasinée, mais la température qu'il possède à sa sortie de l'appareil s'abaisse graduellement et d'autant plus vite que pour une même quantité de vent les dimensions de la chambre sont plus faibles.

Lorsqu'on veut éviter des grandes variations dans la température du vent, il faut changer d'appareils d'autant plus souvent que la dimension de ceux-ci est plus petite par rapport au volume du vent qui doit être chauffé par minute.

Appareil ou récupérateur Siemens. — Cet appareil (fig. 40 et 41) se compose de quatre chambres remplies de matériaux réfractaires ou empilages. Les briques sont rangées de manière à laisser autour d'elles de nombreux vides de faibles dimensions, dont l'ensemble doit fournir, dans chaque rangée, une section suffisante, pour le passage des fluides à chauffer ou à refroidir. En général, un four est pourvu de deux groupes d'accumulateurs désignés sous le nom de régénérateurs et composés chacun de deux chambres. Pendant que le premier groupe est employé à refroidir les gaz chauds qui vont du four à la cheminée de fumée, les chambres du second groupe servent,

l'une à chauffer les gaz combustibles froids et l'autre l'air affluent, qui circulent séparément et se réunissent avant d'entrer dans le four où s'effectue la combustion. Quand un groupe d'accumulateurs est porté à la température convenable,

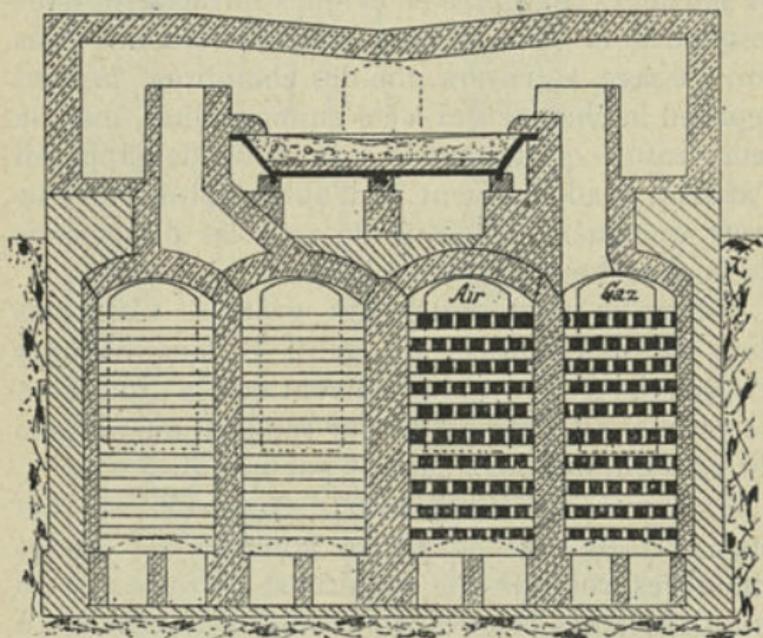


Fig. 40. Récupérateur Siemens (élévation).

on renverse les courants gazeux au moyen d'un jeu de valves. L'air et le gaz à chauffer passent séparément chacun dans une chambre de ce groupe, tandis que les gaz chauds qu'on veut refroidir descendent à la fois dans les deux chambres de l'autre groupe.

Le gaz et l'air allant au four arrivent d'abord

à la base des chambres à briques au contact des matériaux les moins chauffés, et à mesure que leur température s'élève, ils rencontrent des parois de plus en plus chaudes. Les gaz brûlés sortant du four à très haute température entrent à la partie haute des accumulateurs, descendent au

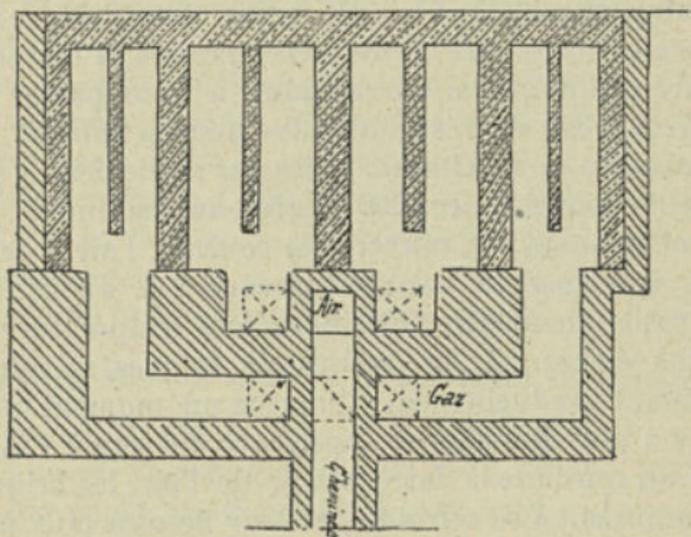


Fig. 41. Récupérateur Siemens (plan).

contact des massifs réfractaires et rencontrent des parois à température décroissante. Le chauffage et le refroidissement des fluides s'effectuent donc d'une manière méthodique.

En opérant le renversement des courants gazeux à des intervalles suffisamment rapprochés (une ou deux fois par heure), on obtient une très grande régularité de température dans le four. Dans ces accumulateurs, la manœuvre des registres est

assez compliquée, et chaque renversement entraîne une certaine perte de gaz et d'air chauds.

Examinons ce qui se passe dans un empilage à chicanes Siemens : supposons l'empilage à la température ordinaire, et que le gaz arrive du haut vers 1,500 degrés environ; les assises de briques s'échauffent graduellement, et la première finira par atteindre cette même température, en même temps que la dernière serait à la température ordinaire; si on continue à faire passer les gaz à 1,500 degrés, toutes les assises finiront par atteindre ce maximum, et les gaz sortiraient à une haute température, 300 degrés au maximum. Si, à ce moment, on renverse le courant, l'air entrant de bas vers le haut commencera à s'échauffer méthodiquement et atteindra une température la plus élevée, et les assises de briques se refroidissant graduellement; il arrive un moment où il n'y a plus que l'assise supérieure qui sera à 1,500°. Si on continue à faire passer de l'air, les briques continuent à se refroidir, et l'air ne sera plus à la température maximum. On peut donc conclure qu'il y a une limite de chauffage et de refroidissement des briques des assises; on s'arrête, par conséquent, quand les gaz chauds sortent à 300° et, pour l'air, quand la première assise se trouve à être seule à 1,500°. Il ne faut jamais attendre, pour renverser les courants, que les assises du haut s'assombrissent, pas plus que celles du bas rougissent.

La rapidité du chauffage et du refroidissement dépend de la surface exposée.

D'après Siemens, les produits de la combustion

complète de 1 kilogr. de houille ont une capacité calorifique égale à celle de 17 kilogr. de briques réfractaires, par conséquent le nombre M des kilogrammes de houille brûlée par heure sera égal à $M \times 17$ kilogr. de briques. En pratique, on admet qu'il y a le quart seulement des briques chauffées au maximum, par conséquent on introduit dans les chambres trois ou quatre fois plus de briques, soit 50 M ou 70 M.

Les chambres ont une capacité double de celle des briques empilées, et comme la densité de la brique varie de 1 à 2, un mètre cube de chambre contiendra 900 à 1,000 kilogr., ce qui donne 20 à 13 kilogr. de houille par mètre cube de chambre. Si on désigne par K le nombre de kilogrammes de houille brûlée dans le foyer servant au four, $\frac{K}{20}$ ou $\frac{K}{13}$ sera la capacité d'une paire de récupérateurs.

Appareil Cowper et ses dérivés. — En 1860, Cowper construisait à l'usine d'Ormesby, dans le Cleveland, le premier appareil en briques pour le chauffage du vent des hauts fourneaux. Mais cette première disposition était défectueuse, car les briques étaient placées en chicanes comme dans le régénérateur Siemens, ce qui obligeait à démonter complètement l'appareil pour le nettoyer; les soupapes et les registres, placés à l'entrée et à la sortie du vent, se déformaient sous l'action de la chaleur et ne fermaient plus hermétiquement; il se formait, en outre, un dépôt de poussières, qui rendait la manœuvre très difficile.

Aussi, en 1870, il présenta un appareil du

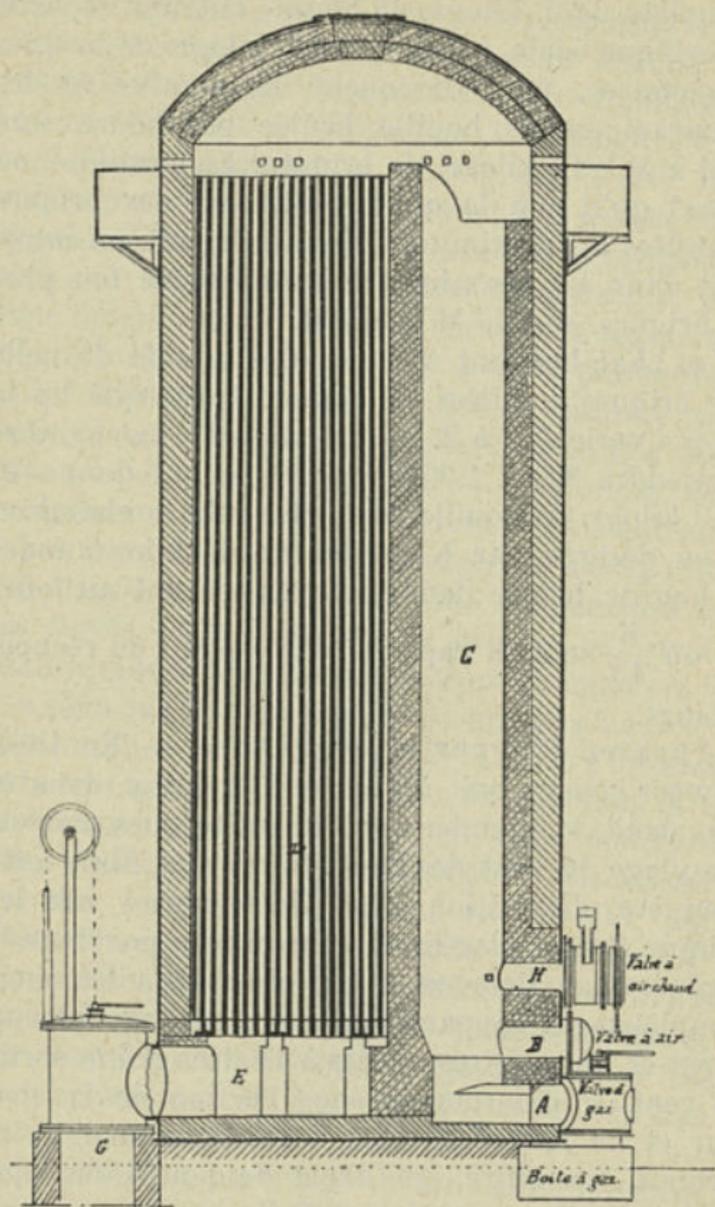


Fig. 42. Appareil Cowper (coupe verticale).

même genre, mais dans lequel on a remédié à tous ces inconvénients.

L'appareil se compose d'une grande enveloppe en tôle, servant à tenir la maçonnerie en briques réfractaires, et éviter ainsi toute fuite de vent. On laisse libre, entre la tôle et la maçonnerie, un espace de 4 à 5 centimètres, pour permettre la libre dilatation de la maçonnerie.

Dans cet appareil (fig. 42, 43), les gaz et l'air n'ont à parcourir l'appareil, dans toute sa hauteur,

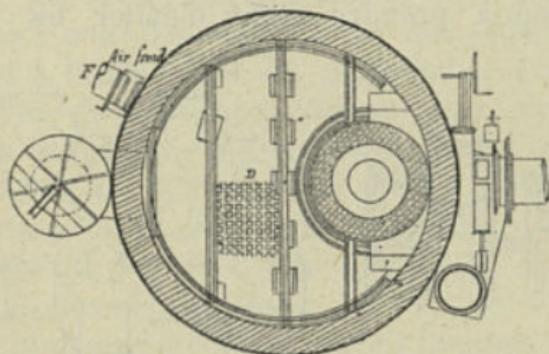


Fig. 43. Appareil Cowper (coupe horizontale).

que deux fois, l'une en montant et l'autre en descendant.

Les gaz combustibles arrivent par le tuyau A, et l'air froid destiné à les brûler par le tuyau B; la combustion s'opère dans la cheminée cylindrique C verticale, ayant 1^m50 à 1^m60 de diamètre et près de 18 mètres de hauteur; les gaz brûlés redescendent alors par les carneaux verticaux D, formés par les vides laissés par les briques réfractaires, se réunissent dans une chambre E, d'où

ils s'en vont vers la cheminée par l'ouverture G.

Le vent à chauffer arrive par l'ouverture F, parcourt de bas en haut les petits carneaux D de la chambre, et redescend par la cheminée C pour sortir de l'appareil par l'ouverture H.

Les briques, formant les petits carneaux D dont nous avons parlé, sont supportées par une grille en fonte, posée elle-même sur des colonnes également en fonte. La forme de ces carneaux est variable, on en a construit avec une section rectangulaire, ronde ou polygonale (fig. 44), la seule précaution à prendre étant d'éviter les angles

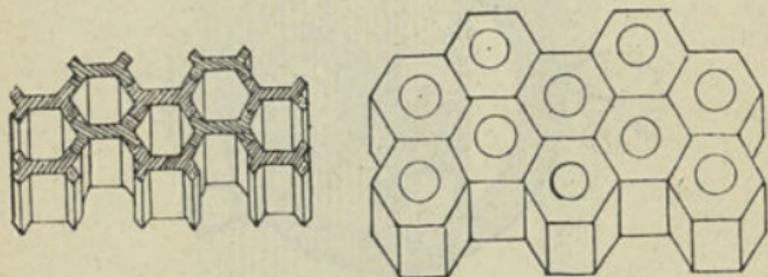


Fig. 44. Forme des briques.

reentrants, où la poussière pourrait s'accumuler et rendrait le nettoyage difficile.

Pour nettoyer l'appareil, on dispose à sa partie supérieure un trou d'homme, par où on rentre dans l'appareil une fois refroidi, c'est-à-dire après trois jours d'arrêt. L'ouvrier ramone ainsi tous les petits carneaux, en y faisant circuler, de bas en haut et réciproquement, une brosse en acier attachée à une chaîne portant une boule près du point d'attache, afin qu'elle puisse descendre jusqu'à la

partie basse des carneaux. On retire la poussière qui tombe ainsi dans la chambre E par des ouvertures spéciales, ou par l'ouverture G d'échappement des produits de la combustion, qui devient libre lorsqu'on enlève le tuyau de raccord.

Dans ces appareils, les gaz, aussi bien que le vent, ont une tendance à suivre le plus court chemin, c'est-à-dire à passer par les petits carneaux D les plus rapprochés, soit de la sortie des produits de la combustion, soit de l'entrée du vent froid, de sorte que les autres sont moins bien utilisés; pour remédier à cet inconvénient, on a donné à la cheminée de combustion une section en forme de demi-lune. Plus souvent, on adopte la forme elliptique, qui a l'avantage de consolider l'appareil; on y dispose en plus, à partir de 5^m 50 au-dessus de la sole de la chambre, une série de cloisons K (fig. 45), qui servent à soutenir la poussée des parois planes.

D'autres constructeurs, parmi lesquels nous pouvons citer Boecker, ont cherché à remédier à ce même inconvénient, tout en conservant la forme cylindrique à la cheminée de combustion; pour cela, ils ont rétréci la section des carneaux (fig. 46), qui se trouvent le plus près de cette cheminée.

Dans certaines usines, on bouche partiellement, à l'aide de briques réfractaires, les orifices des carneaux par lesquels les gaz sont plus disposés à passer.

Appareil Cowper perfectionné par M. Lencachez. — M. Lencachez a perfectionné les accumulateurs Cowper, dont il a augmenté la

surface utile par mètre cube. La chambre de combustion, située au-dessus du massif réfractaire, a de grandes dimensions, en vue d'obtenir la combustion complète des gaz; enfin, les ma-

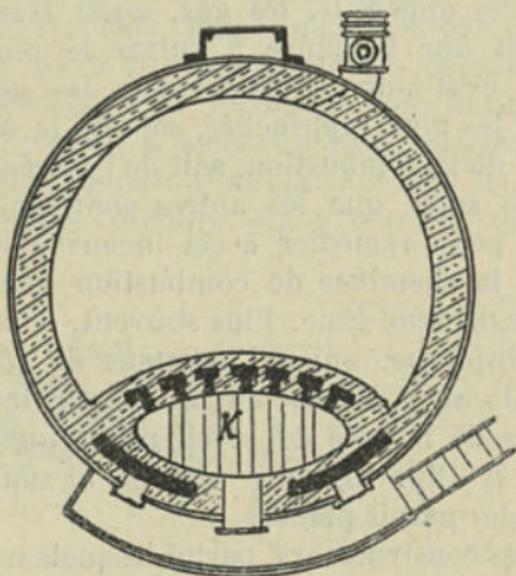


Fig. 45. Appareil Cowper, forme elliptique.

nœuvres des valves, à chaque renversement de flammes, ont été simplifiées.

Le massif de briques de l'accumulateur est porté par un plancher en fonte. Ce dernier, soutenu par des colonnes en fonte, repose en partie sur une couronne annulaire en tôle, que traverse le conduit pourvu d'un jeu de valves permettant, à volonté, d'évacuer la fumée ou d'introduire l'air froid. Lorsqu'on chauffe l'accumulateur, l'air froid pénètre dans la couronne par un trou, monte en

s'échauffant dans les conduits réservés dans l'enveloppe de l'appareil, passe dans le vide et entre par un orifice dans la chambre de combustion. Le

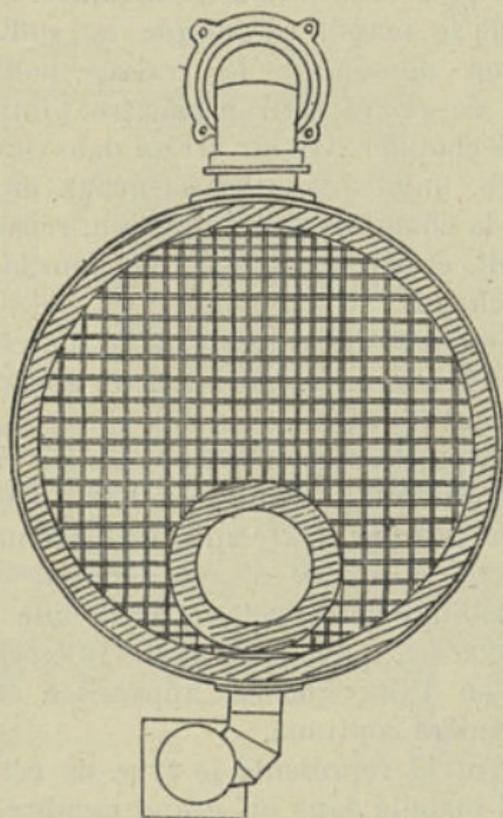


Fig. 46. Modification dans la section des carneaux.

gaz combustible sort par un autre tuyau, monte dans le conduit correspondant et vient se mélanger avec l'air. La combustion s'effectue dans la chambre, et les gaz produits descendent dans les

carneaux verticaux du massif, formé de briques placées sur champ. Ces gaz brûlés pénètrent ensuite dans la chambre inférieure, s'échappent par des orifices, et passent enfin dans le carneau de fumée pour se rendre à la cheminée.

Lorsque le massif céramique est suffisamment chaud, on manœuvre les valves pour arrêter l'arrivée de gaz et pour permettre l'introduction de l'air à chauffer. Cet air arrive dans la chambre inférieure, monte dans les carneaux en briques, traverse la chambre de combustion, redescend par le conduit, et par la gaine se rend dans la conduite de vent chaud.

La manœuvre des valves s'opère toutes les deux ou trois heures; on construit deux appareils pour chaque haut fourneau.

Cette disposition permet d'obtenir $37^m^2 40$ de surface utile par mille briques de $0,22 \times 0,11 \times 0,035$, et plus de 16^m^2 par mètre cube de maçonnerie.

Appareil Whitwell et ses dérivés. — La première installation de cet appareil date de 1869, mais ce n'est guère qu'après l'exposition de Vienne, en 1873, que cet appareil a été adopté d'une manière continue.

La figure 47 représente le type de cet appareil qui a été installé dans un grand nombre d'usines. Les gaz combustibles arrivent par la galerie B et pénètrent dans l'appareil à travers la soupape C quand on l'ouvre. L'air nécessaire à la combustion pénètre par l'ouverture T dans un canal X ménagé dans l'épaisseur du mur, circule en s'échauffant dans des petits carneaux D réservés dans la première cloison et débouche par des petites ouver-

tures horizontales dans le premier compartiment où il rencontre les gaz et les enflamme.

Des ouvertures analogues (on les voit sur la figure 47) sont aménagées dans la quatrième

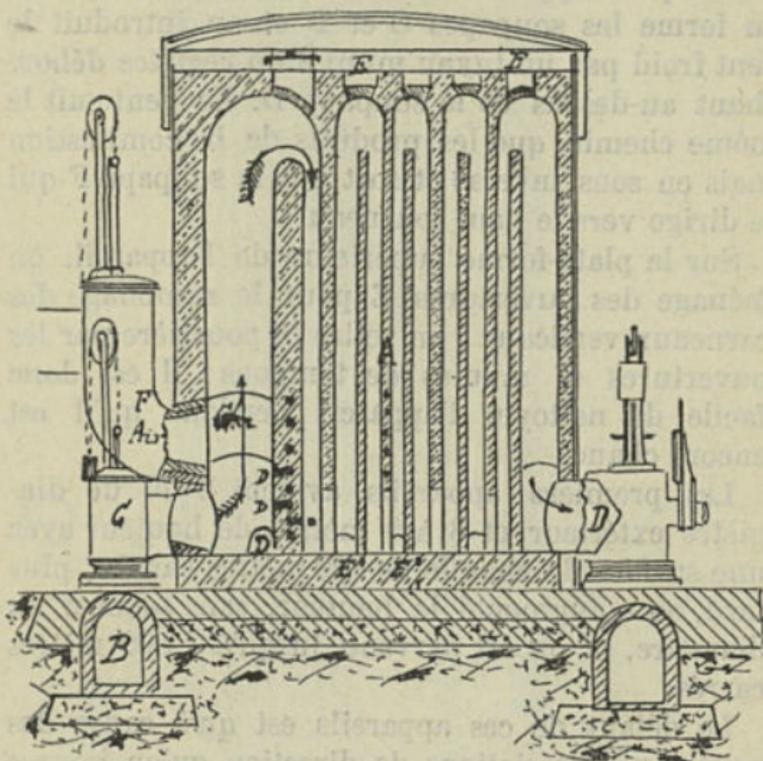


Fig. 47. Appareil Whitwell primitif.

cloison A pour une deuxième arrivée d'air. Les flammes et les produits de la combustion circulent entre les cloisons A, qui sont interrompues alternativement en haut et en bas et arrivent à la soupape D d'où ils passent dans la galerie qui les conduit à la cheminée. Trois cloisons verticales et

perpendiculaires aux premières A servent à consolider celles-ci et à augmenter la surface de chauffe ; elles sont percées de trous qui mettent en communication les divisions ainsi produites.

Lorsque l'appareil a été suffisamment chauffé, on ferme les soupapes C et D et on introduit le vent froid par un tuyau muni d'un registre débouchant au-dessus de la soupape D. Le vent suit le même chemin que les produits de la combustion mais en sens inverse et sort par la soupape F qui le dirige vers le haut fourneau.

Sur la plate-forme supérieure de l'appareil, on ménage des ouvertures E pour le ramonage des carneaux verticaux ; on retire la poussière par les ouvertures E' munies de tampons ; il est donc facile de nettoyer l'appareil pendant qu'il est encore chaud.

Les premiers appareils avaient 6^m70 de diamètre extérieur et 8 à 9 mètres de hauteur avec une surface de chauffe de 800 mètres carrés ; plus tard, on a augmenté la hauteur, sans toucher au diamètre, et on est parvenu jusqu'à 1,800 mètres carrés.

Le défaut de ces appareils est qu'à cause des nombreuses variations de direction qu'on impose aux produits de la combustion, on augmente les résistances à leur circulation et, par conséquent, il faut établir des cheminées relativement très hautes pour conserver à l'appareil une bonne marche. Le même inconvénient se produit au passage du vent, d'où perte de force à la machine.

Appareil Whitwell modifié. — Les gaz arrivent (fig. 48 et 49) par le tuyau A et pénètrent dans le

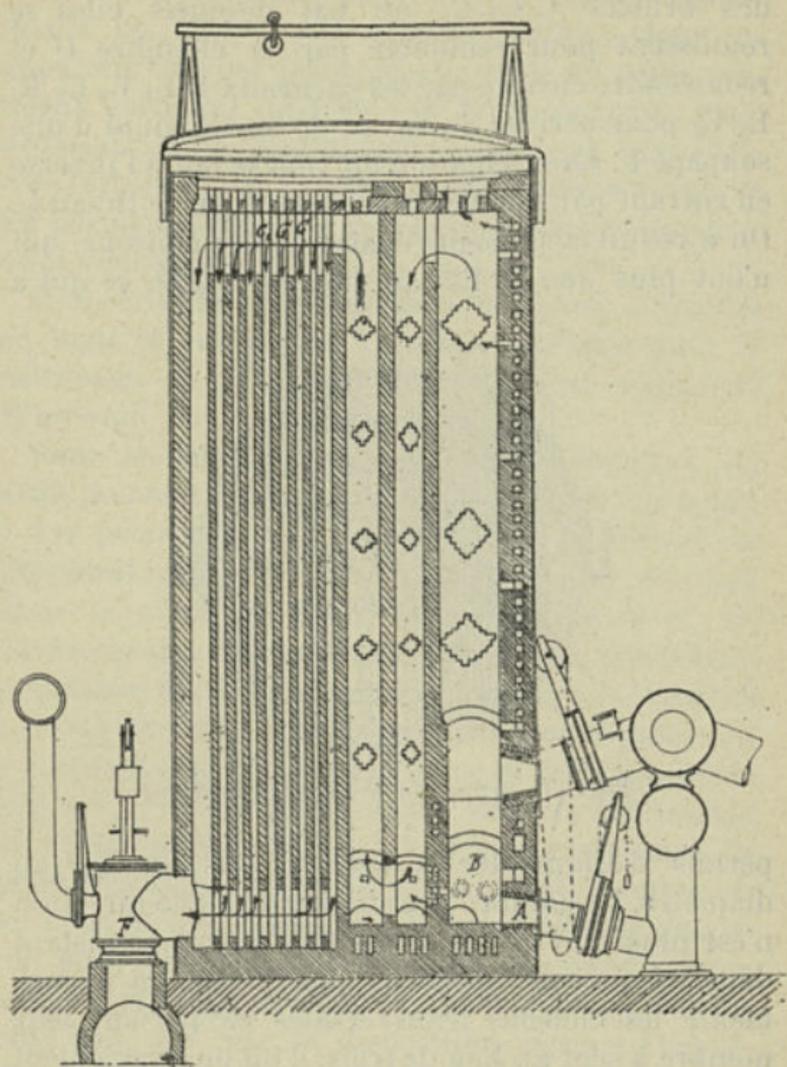


Fig. 48. Appareil Whitwell modifié.

compartiment B au bas duquel ils rencontrent l'air destiné à leur combustion; arrivés en haut de cette chambre, les flammes descendent à la fois par

des orifices C C₁ C₂ au bas desquels elles se réunissent pour remonter par la chambre D et redescendre ensuite par les carneaux E E₁ E₂ E₃ E₄ E₅ E₆ pour arriver au tuyau de sortie muni d'une soupape F. La circulation du vent se fait à l'inverse en entrant par l'orifice K et sortant par le tuyau L. On a réduit également l'épaisseur des cloisons, qui n'ont plus que 0^m130 au lieu de 0^m220, ce qui a

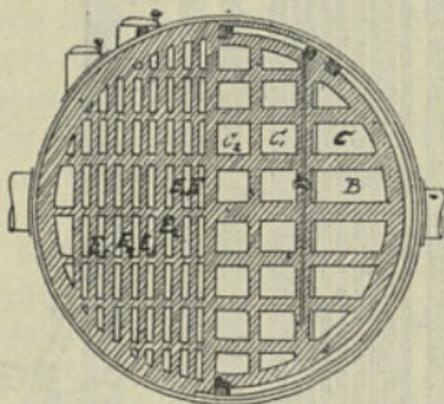


Fig. 49. Appareil Whitwell modifié.

permis d'augmenter la surface sans toucher au diamètre. Le nombre des changements de direction n'est plus que de trois, au lieu de neuf existant dans les anciens appareils. De même, on a augmenté les cloisons transversales en portant leur nombre à sept au lieu de trois, d'où un supplément de surface de chauffe. Ainsi un appareil ayant 6^m70 de diamètre extérieur et 19^m80 de hauteur donne 2,400 mètres carrés de surface utile.

Appareil Macco. — Dans l'appareil Macco, le vent a une circulation composée de deux montées

et de deux descentes alternatives. Les compartiments du centre sont disposés comme dans les appareils Cowper formant une série de petits carreaux verticaux de 0^m 15 à 0^m 20 de largeur. L'air nécessaire à la combustion arrive par une série d'ouvertures horizontales ménagées dans la sole et les parois latérales de la chambre de combustion où il s'échauffe.

Une série d'ouvertures avec tampons disposées en haut et en bas de l'appareil servent pour le nettoyage de l'appareil comme pour l'appareil Whitwell.

Pour le nettoyage des appareils à briques, on avait souvent recours, pour faire tomber les suies, à des pétards qu'on enflammait à l'intérieur de l'appareil, ou même on tirait des coups de fusil dans la chambre inférieure pour produire un mouvement oscillatoire qui aurait fait tomber les poussières d'un seul coup. Mais comme ces moyens ne s'appliquaient qu'à des intervalles espacés, les poussières prenaient consistance et il devenait très difficile de les détacher. Aussi, dans la fabrication de fontes manganésées, où il y a abondance de poussière, les chauffeuses devenaient très courtes et, au bout de quelques jours, il fallait arrêter l'appareil pour un nettoyage complet. Aujourd'hui, on emploie la soupape *Lister*, que nous allons décrire plus loin, qui, par sa disposition, permet l'expulsion automatique des poussières et le maintien de l'appareil en marche pour ainsi dire indéfinie.

Souppes et valves pour appareils à briques.

— Les soupapes et les valves employées dans les hauts fourneaux doivent remplir les conditions

suivantes : être d'une manœuvre facile, d'une résistance suffisante aux effets de la chaleur et d'une fermeture hermétique dans toutes les positions qu'elles doivent prendre. Au début, on s'était heurté à des grandes difficultés à cause de la grande accumulation de poussière sur les parties qui devaient venir en contact parfait et des grandes variations de température. Les sièges des soupapes présentaient un très grand développement ; la pression du vent est d'autant plus forte que la hauteur du fourneau est plus grande, il s'ensuit que si la soupape ferme mal, les pertes peuvent être considérables. C'est à ces différentes raisons que les premiers appareils Cowper ont dû leur insuccès.

Dans les appareils construits de 1870 à 1880, on a combiné les soupapes à circulation d'eau, notamment pour les appareils Whitwell. La soupape était en tôle et en forme de lentille creuse, la tige était formée de deux tubes dont l'extrémité inférieure pénétrait dans la lentille et à l'autre étaient adaptés des tubes en caoutchouc ; l'eau froide arrivait par l'un d'eux et, après avoir circulé dans la soupape, était évacuée par l'autre. La manœuvre de cette soupape se faisait au moyen d'une crémaillère et d'un pignon et elle était rendue très facile par un équilibrage calculé ; une circulation d'eau était également établie dans le siège de cette soupape, étant creux pour cette raison.

Les usines qui avaient adopté ce système de soupape au début l'ont conservé. Dans les nouveaux appareils, on a remplacé ces soupapes très coûteuses et lourdes par des registres en acier coulé, à

surface courbe, qui résistent mieux que ceux à surface plane; la garniture du presse-étoupe est faite soigneusement avec de l'amiante. Souvent, pour mieux assurer la fermeture complète et pour se mettre à l'abri de tout événement fâcheux, on établit deux registres l'un devant l'autre.

Soupape Burgers. — La soupape Burgers (fig. 50 et 50 bis) s'applique à l'entrée et à la sortie

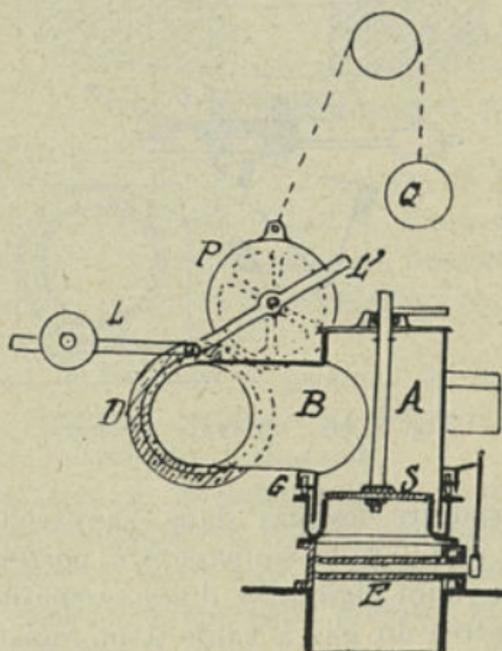


Fig. 50. Soupape Burgers.

des gaz de la combustion. Elle se compose d'un tuyau A placé verticalement et plongeant par son extrémité inférieure dans une rigole qu'on maintient toujours pleine d'eau et qui forme le point

terminus de la conduite des gaz venant du fourneau ; il est supporté par trois galets G situés extérieurement et qui lui permettent de tourner facilement autour de son axe. Il porte un coude B à ouverture horizontale dont l'extrémité est formée par un anneau en fonte bien dressé et pouvant s'appliquer exactement sur le cadre D, quand on

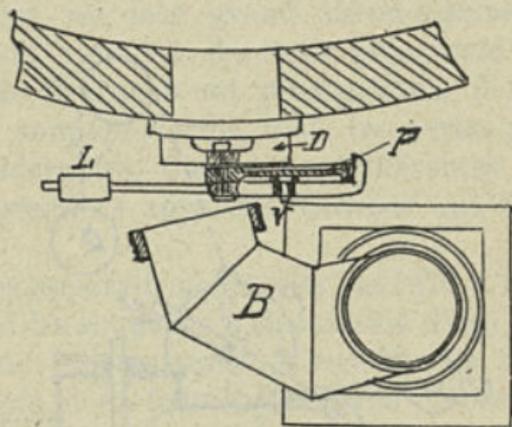


Fig. 50 bis. Soupape Burgers.

veut introduire les gaz dans l'appareil. En ce moment, on ouvre la soupape S à portée conique au moyen d'un pignon et d'une crémaillère et on règle l'entrée du gaz à l'aide d'un registre papillon E.

Si l'on veut supprimer l'introduction du gaz pour faire passer le vent à chauffer, on abaisse la soupape S, on tourne le tuyau A pour l'amener dans la position qu'on voit sur la figure 50 ; puis, au moyen d'un levier L, on amène le plateau P devant l'ouverture du châssis D et on assure une

fermeture absolument étanche à l'aide d'une vis de serrage V. La manœuvre inverse s'opère aussi rapidement et le plateau P est équilibré à l'aide d'un contrepoids Q, qui rend la manœuvre très rapide dès que la vis V est desserrée.

Le croquis 30 *bis* indique la position de la soupape au moment de l'introduction du vent dans l'appareil. Par cette disposition ingénieuse, on voit que la soupape ne sert plus qu'à empêcher l'échappement des gaz et n'a plus à résister à la pression du vent comme dans les autres dispositions; elle est en outre en dehors de la chaleur et peut être remplacée ou réparée.

Lunette de Schmidt. — La lunette de Schmidt consiste en un plateau en fonte A, venu de fonte avec un anneau B (fig. 31), dont le diamètre intérieur est égal à celui de la conduite; ce plateau tourne autour d'un axe D.

La figure 31 indique la position de la lunette quand elle ferme la conduite, c'est-à-dire pendant que le vent circule dans l'appareil.

Pour produire la fermeture de la conduite, il faut amener le plateau A contre une collerette C en fonte, dont les faces sont rabotées, fixée sur la conduite. Deux vis de serrage E pressent le plateau contre la collerette.

Lorsqu'on veut admettre les gaz dans l'appareil, on desserre les vis E et on fait tourner l'appareil de 180 degrés; la partie évidée prend la place du plateau A, on resserre les vis E et ouvre le clapet P. Ce même appareil peut être appliqué à la sortie des gaz de combustion, mais ses dimensions deviennent plus grandes.

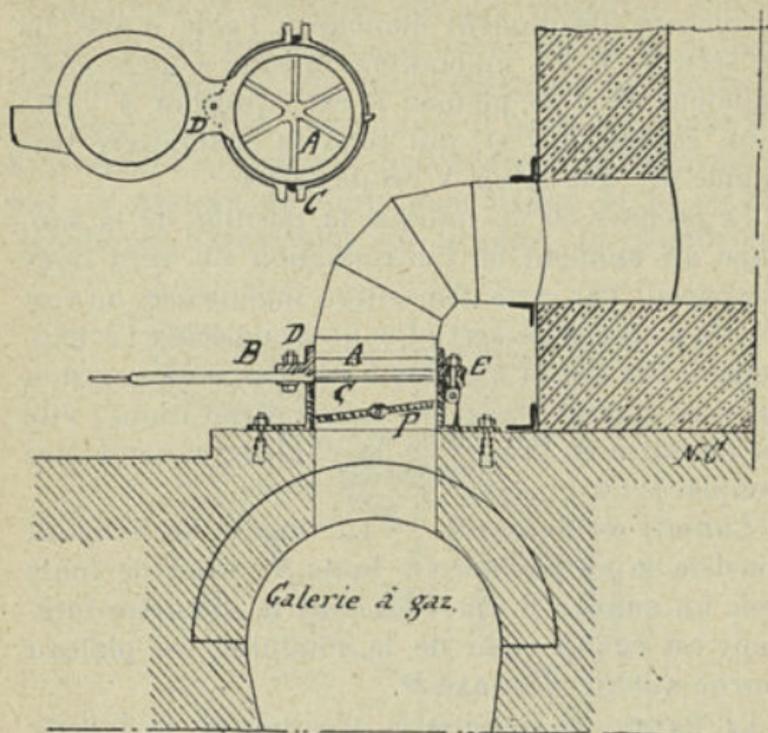


Fig. 51. Lunette Schmidt.

Avec la lunette Schmidt, la conduite restant en place, il faut se réserver des orifices spéciaux pour le nettoyage de l'appareil.

Soupape Lister. — Nous avons dit précédemment que le nettoyage des appareils à briques était souvent opéré par des détonations de pétards, ou des coups de fusil tirés à l'intérieur des dits appareils. La soupape Lister a pour but de supprimer ces détonations, et opérer le nettoyage automatique et régulier des appareils à air chaud.

Elle se compose (fig. 52) d'une tubulure en fonte A, fixée en un point de la chauffe, formant

le siège de la soupape B, qui porte un boulon prisonnier C, dont l'écrou D en bronze est vissé dans un renflement du levier E, mobile autour de l'axe F, et maintenu dans la position horizontale par l'étrier G, tournant autour de l'axe H. A un petit étrier I, porté par le levier E, est attachée

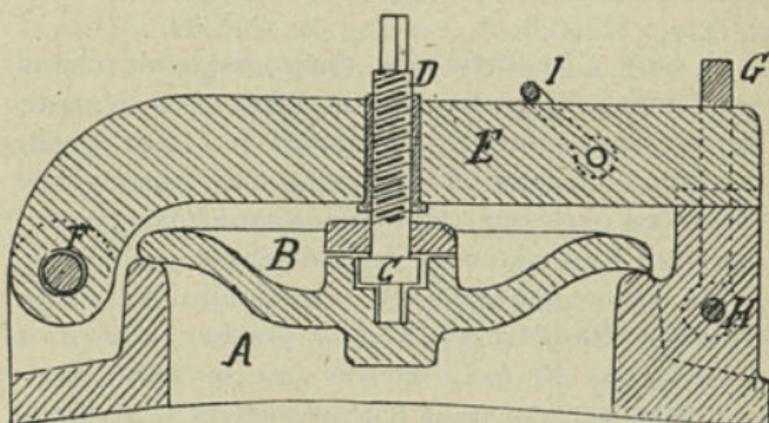


Fig. 52. Soupape de Lister.

une chaîne, qui doit limiter la levée de la soupape, et dont l'autre extrémité est reliée à un point fixe par l'intermédiaire d'une boucle et d'un ressort.

Si on donne un tour de clef au boulon C, on presse la soupape sur son siège et la fermeture est hermétique. A ce moment, si on veut admettre les gaz dans l'appareil, et avant d'ouvrir la soupape qui leur donne accès, les soupapes d'entrée et de sortie de l'air sous pression étant fermées, on donne un coup de ringard pour faire tomber l'étrier I, le vent enfermé dans l'appareil s'échappe alors avec violence par l'orifice qui lui est ménagé,

et entraîne les poussières déposées pendant l'opération de chauffe précédente.

Ces appareils sont très employés en Angleterre, et ont été déjà appliqués en assez grand nombre en France.

VII. CONDUITE ET DISTRIBUTION DU VENT

Le vent, à la sortie des appareils à air chaud, est réuni dans des tuyaux de conduite et de distribution, qui sont ordinairement en tôle et plus rarement en fonte. Plus leur diamètre est grand, moins les pertes par frottement sont fortes; on est pourtant limité à cause de la dépense.

On donne généralement aux conduites de vent froid un diamètre tel que la vitesse du vent ne dépasse pas 10 à 15 mètres par seconde; si ces conduites servent pour le transport du vent chaud, il faut tenir compte, dans le calcul du diamètre, de la dilatation du volume gazeux donnée par la formule :

$$V_1 = V (1 + 000366 t)$$

On entoure les conduites d'une enveloppe protectrice, afin d'éviter les pertes de chaleur. Si le vent a une température inférieure à 500 degrés, on se contente d'entourer les tuyaux d'une enveloppe de corps mauvais conducteurs, tels que la laine de laitier, la terre argileuse, etc., maintenus en place à l'aide de toiles et de ligatures en fil de fer.

Si la température dépasse 500 degrés, comme cela arrive avec les appareils en briques, on garnit

les tuyaux intérieurement d'une chemise réfractaire en briques maçonnées ou en pisé. Cette chemise préserve ainsi les conduites de l'influence de la haute température et de l'action de l'oxygène de l'air.

Dans l'établissement des conduites, il faut tenir également compte de la dilatation linéaire des tuyaux métalliques, qui est de 0,00111 pour un écart de température de 100 degrés. Ainsi, une conduite ayant 10 mètres de longueur, et laissant passer de l'air à 500 degrés, s'allongera de 0^m053. Pour éviter les ruptures, on doit donc laisser une liberté de mouvement aux tuyaux, ce qu'on obtient par l'emploi des *compensateurs*.

Le plus simple est indiqué figure 53; il est composé de deux petits tuyaux A et B, fixés à droite et à gauche de la conduite générale, et disposés de façon à entrer à frottement l'un dans l'autre sans laisser de jeu. On calcule la longueur de l'emboîtement CD d'après l'allongement probable de la conduite considérée.

Une autre disposition, généralement appliquée, consiste à fixer aux extrémités de la portion de conduite, en A et B (fig. 54), deux grandes collettes E, en tôle de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur, et que l'on réunit à leur circonférence C extérieure en les rivant sur un anneau intermédiaire D. Si la conduite se dilate, les tôles se rapprochent l'une de l'autre et, lorsqu'il y a contraction, l'élasticité des tôles les ramène à leur première position.

Un autre système consiste en l'emploi des presse-étoupes, dans lesquels on remplace le chanvre qui se carboniserait par de l'amianté; ce système n'est

guère appliqué qu'aux conduites en fonte, dont le diamètre ne dépasse pas 50 à 60 centimètres.

La conduite d'air chaud aboutit, d'une façon

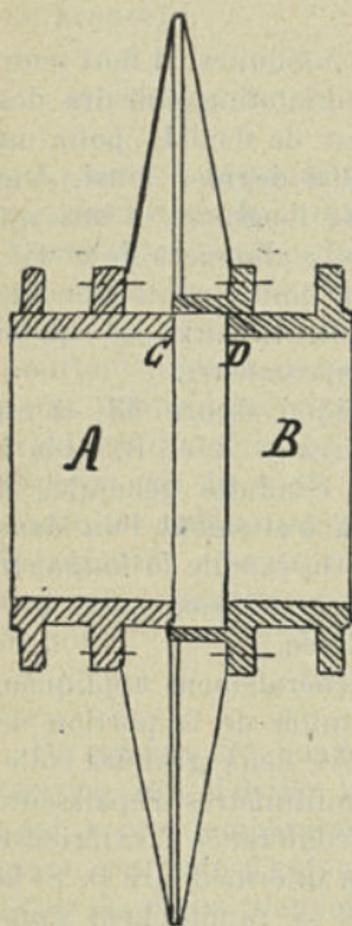


Fig. 53. Compensateur de dilatation.

générale, à une conduite circulaire enveloppant le haut fourneau, d'où partent les branchements particuliers aux tuyères. Dans les anciens hauts fourneaux, entourés de massifs épais en maçonnerie, on faisait passer la conduite principale dans une galerie souterraine; un branchement sortait de terre dans chaque embrasure et amenait le vent à la tuyère; dans les fourneaux modernes, portés par des colonnes, on fait porter, par ces mêmes colonnes, la conduite principale de vent qui entoure ainsi l'ouvrage du fourneau, et d'où partent les branchements allant aux tuyères. On verra, plus loin, les dispositions généralement employées

dans les usines. Il est bon pourtant de faire remarquer ici que, le diamètre de la conduite

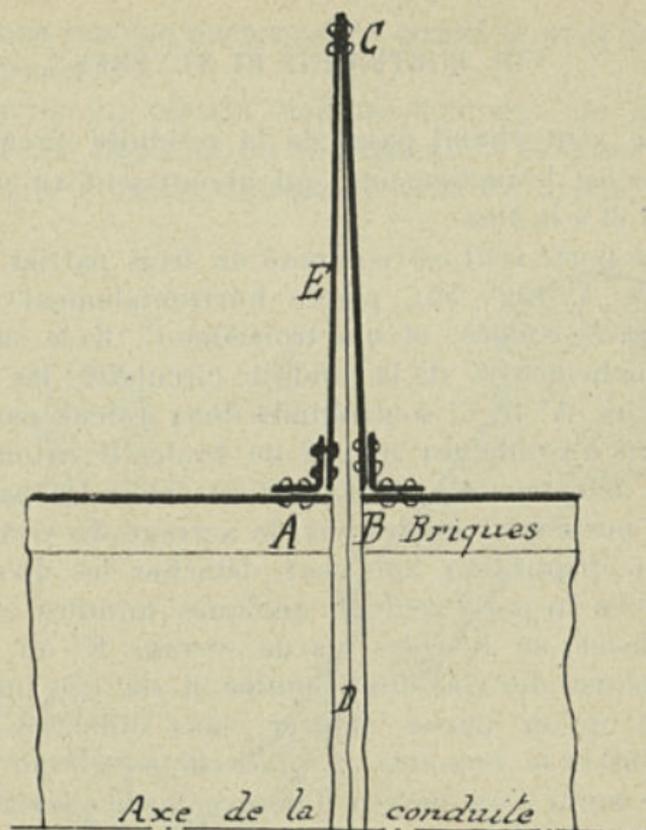


Fig. 54. Compensateur de dilatation.

augmentant avec la température, il faut laisser un vide entre les colonnes et la conduite, pour que celle-ci, en se dilatant, ne vienne pas déplacer les colonnes et diminuer la solidité de l'ensemble.

La conduite circulaire amenant le vent aux tuyères peut être construite avec un diamètre allant en décroissant, au fur et à mesure que le nombre des tuyères qu'elle alimente diminue, et cela pour la seule raison de la dépense,

VIII. PORTE-VENT ET TUYÈRES

Le vent chaud passe de la conduite circulaire dans les branchements, qui aboutissent au *porte-vent* et à la *buse*.

Le porte-vent est composé de trois parties, une pièce A (fig. 33), placée horizontalement, une autre B, coudée, et une troisième C, fixée sur le branchement C' de la conduite circulaire; les trois parties, A, B, C, sont réunies deux à deux par des joints à rotule, au moyen de brides D, entourant des manetons F, venus de fonte avec les parties du porte-vent et des vis de serrage E. Grâce à cette disposition, on peut détacher les diverses parties du porte-vent en quelques minutes et les replacer; au lieu des vis de serrage E, on peut employer des clavettes. Comme il est très important qu'on puisse enlever, sans difficulté, une tuyère et la remettre en place, le porte-vent doit être muni d'un moyen d'intercepter le passage du vent et éviter en même temps que, lorsque la soufflerie s'arrête, l'oxyde de carbone pénètre dans la conduite de vent et vienne former avec l'air un mélange détonant. Tant que le vent chaud circule dans les conduites, on n'a rien à craindre, mais si la soufflerie s'arrête, l'air qui reste dans les conduites se refroidit, et alors il se produit par les buses une aspiration des gaz du haut fourneau, ce qui occasionne souvent de terribles accidents. Ce moyen d'interruption consiste à placer dans le porte-vent un registre ou un simple clapet, que le vent maintient ouvert tant qu'il passe, et qui

retombe par son propre poids quand le vent cesse de circuler.

Depuis un certain nombre d'années, on supprime ce clapet et on se contente d'éloigner la buse de la tuyère lorsque le vent est arrêté, ou

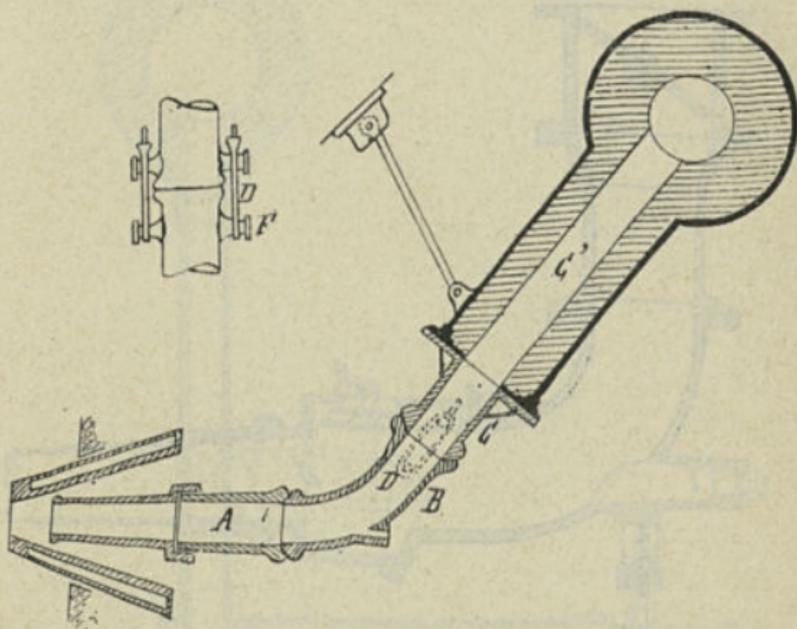


Fig. 55. Porte-vent.

bien on ouvre sur la conduite un orifice, qui permet à l'air extérieur de rentrer librement et de supprimer l'aspiration par les tuyères.

La figure 56 représente un porte-vent muni de ce clapet de sûreté et du papillon d'arrêt. Le clapet de sûreté est compris dans une boîte rectangulaire G, son axe de rotation est à la partie supérieure.

Dans les usines américaines, au-dessus du clapet se trouve un orifice O, que celui-ci bouche quand il est soulevé par le vent et qui, dans le cas contraire, donne issue aux gaz qui pourraient être refoulés par les tuyères. Certaines usines alle-

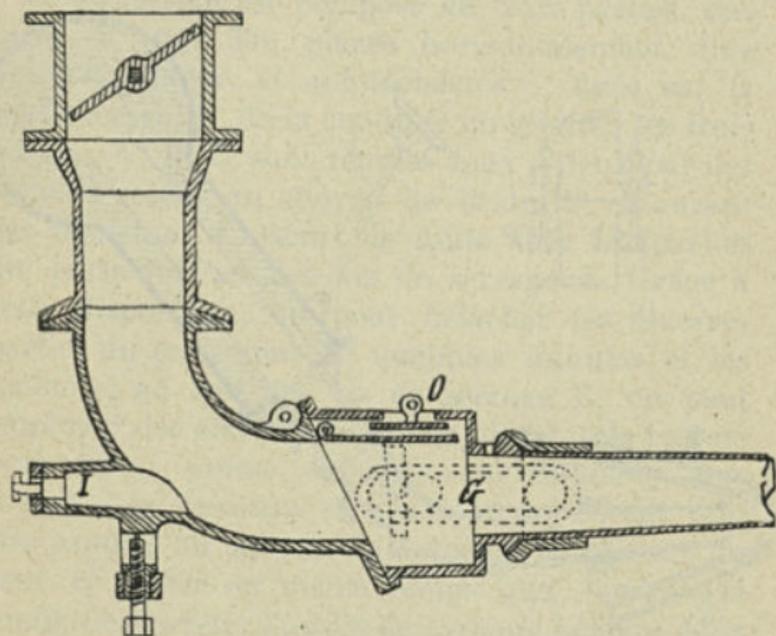


Fig. 56. Porte-vent avec registre et papillon de sûreté.

mandes emploient la même disposition. Ce porte-vent est suspendu à l'aide d'une tringle, soit à l'anneau qui supporte la cuve, soit à une colonne; un regard I, fermé par une feuille de mica, permet de voir dans l'intérieur du fourneau par la tuyère.

La figure 37 représente un autre type de porte-vent, composé d'un tuyau vertical garni de ma-

tières réfractaires, réuni à la conduite circulaire de distribution du vent par un joint sphérique, laissant un certain jeu pour être incliné plus ou moins; à son extrémité inférieure, s'assemble un

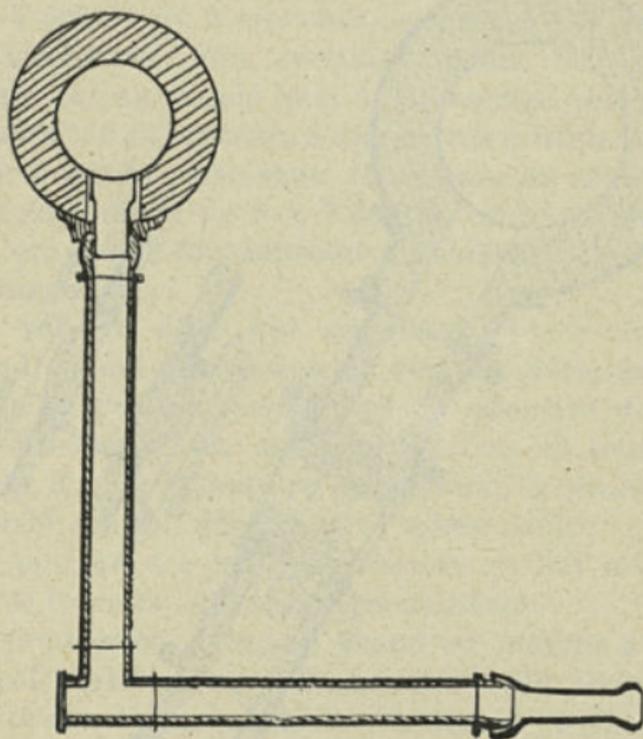


Fig. 57. Porte-vent à joint sphérique.

tuyau horizontal muni d'une valve et portant à l'une de ses extrémités une buse et à l'autre un regard fermé par une feuille de mica.

Dans certaines installations, on a remplacé les clapets ou les registres d'interception du vent par des robinets; telle est la disposition de M. Boeker

représentée par les figures 58 et 59. Le robinet est sphérique et garni de matières réfractaires; il tourne dans une cavité également sphérique; on le

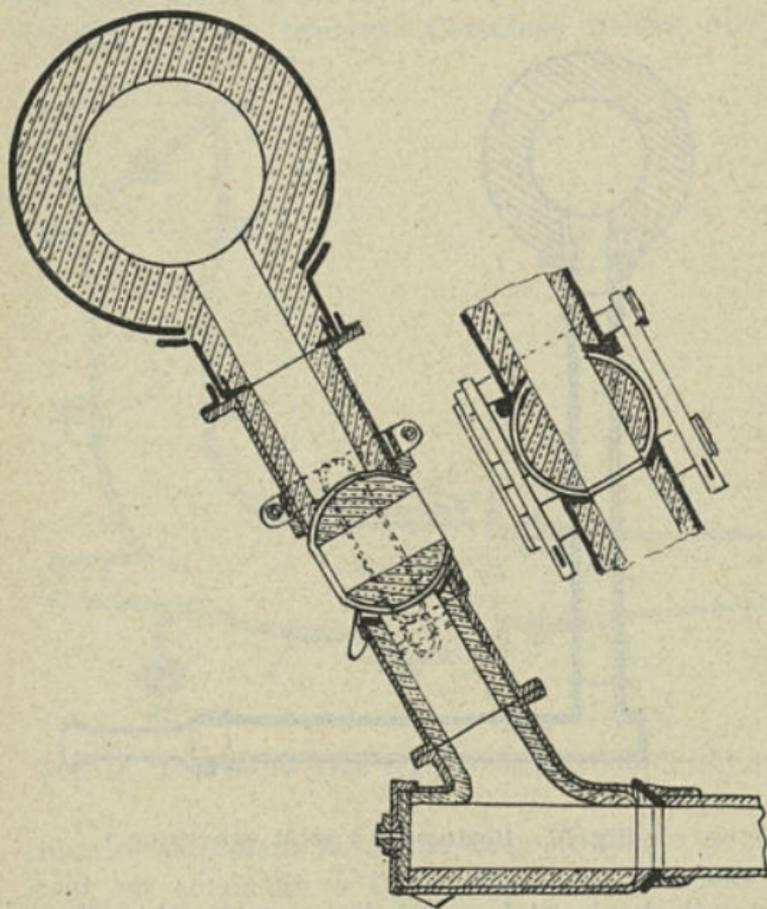


Fig. 58 et 59. Porte-vent avec robinet, Bøker.

manœuvre à l'aide d'une clef en desserrant d'abord les écrous ou clavettes qui maintiennent en contact les deux parties du porte-vent contre ce robinet;

une fois celui-ci dans la position voulue, on resserre le tout. Dans la figure 58 le robinet est fermé, tandis que dans la figure 59 il est ouvert.

La buse est un tube conique en fonte ou tôle, qu'on fixe à l'extrémité du porte-vent par des boulons à écrous ou à clavettes permettant un facile remplacement; dans certaines usines on l'emmanche par un simple joint à baïonnette; quelquefois aussi on se contente d'une entrée à frottement sur le bout du porte-vent. On donne au cône un angle au sommet de 6 à 7 degrés, cet angle étant celui qui donne le coefficient d'écoulement le plus avantageux.

Le volume d'air qui est lancé par la buse dépend, quand la pression du vent est fixée, de la section de l'orifice, c'est-à-dire du diamètre de la buse elle-même. Si, au contraire, on se fixe le volume d'air à introduire par minute, la pression à donner au vent dépend de ce même orifice.

La marche des hauts fourneaux se fait soit à tuyères fermées, soit à tuyères ouvertes.

Le premier cas s'impose quand on marche avec du vent chauffé à haute température. On bouche, dans ce cas, l'intervalle entre la buse et l'intérieur de la tuyère.

Avec le vent froid ou peu chauffé, on laisse cet intervalle ouvert; cette disposition permet de surveiller plus facilement l'état des tuyères que par un orifice placé à l'extrémité d'un porte-vent, et de plus, quand il y a coïncidence des axes de la tuyère et du porte-vent, il n'y a pas à craindre de refoulement. Par contre, le jet de vent peut entraîner une quantité considérable d'air froid, surtout quand

l'ouverture de la tuyère est grande par rapport au diamètre de la buse.

Dans les hauts fourneaux dont le vent est chauffé par des appareils en briques, on marche toujours à tuyères fermées que l'on surveille par le regard ménagé dans le coude du porte-vent. Il existe plusieurs dispositions de fermeture des tuyères. La buse peut porter à son extrémité un renflement qui, s'appuyant sur la surface intérieure de la tuyère, opère une fermeture étanche. Dans les dispositions où la buse est éloignée de l'œil de la tuyère, on y adapte un anneau de forme sphérique qui touche la tuyère à un point plus éloigné; on peut également terminer la buse elle-même par un renflement sphérique, comme on le voit figure 57; cette disposition permet une orientation quelconque de la buse tout en assurant l'étanchéité.

IX. PYROMÈTRES

Dans une installation moderne, on doit connaître la température du vent injecté afin d'avoir une conduite régulière; il est même utile de faire à ce sujet des observations assez fréquentes, tout changement appréciable dans le degré de chaleur du vent pouvant amener des modifications dans l'allure. On se sert, pour ces constatations, des instruments dits *pyromètres*.

Les pyromètres métalliques dont les indications sont basées sur la dilatation d'une tige métallique, ou sur celle de deux barres de métaux différents, donnent, au bout de peu de temps, des indications discordantes.

On a eu recours également à des alliages métalliques dont les points de fusion étaient connus et qu'on exposait à l'action du vent chaud par séries, mais l'opération était trop peu commode.

Le pyromètre Wiborgh, basé sur la pression de l'air enfermé dans un récipient, pression qui augmente avec la température, donne des résultats assez satisfaisants; mais sa fragilité et la dextérité qu'il exige dans son emploi, font qu'il est rarement employé.

Le plus souvent, maintenant, on se sert du pyromètre Siemens basé sur le principe du calorimètre Malher. Une boule de fer ou de platine est placée dans le courant du vent chaud, assez longtemps pour atteindre la température de ce dernier; on la plonge ensuite dans un calorimètre plein d'eau et disposé de manière à éviter les pertes par rayonnement et à amener la température de l'eau à être uniforme. On note alors, à l'aide d'un thermomètre au dixième, la température de l'eau avant et après. Connaissant ainsi la différence de température, le poids de l'eau et du calorimètre réduit en eau, celui de la boule et la chaleur spécifique du métal composant la boule, on calcule la température qu'elle possédait au moment de son immersion, c'est-à-dire celle du vent.

La chaleur spécifique du fer et du platine est déduite du tableau dressé par Weinhold, qui indique à diverses températures la chaleur contenue dans 1 kilogr. de fer.

M. Braubach a modifié la méthode, ce qui permet de lire immédiatement la température sans faire de calcul,

Depuis quelques années on se sert du pyromètre électrique de M. Le Chatelier. On expose à l'action du vent chaud, un couple formé d'un fil de platine et d'un fil de rhodium; il en résulte un courant qui traverse un galvanomètre soumis auparavant à des expériences pour marquer les températures qui correspondent aux déviations de l'aiguille aimantée. Lorsqu'on protège cet élément par une enveloppe de porcelaine ou d'asbeste, on peut le laisser en place, exposé à la chaleur, et lire à tout moment la température sans aucune manœuvre préalable.

CHAPITRE III

Combinaisons du fer avec certaines matières agissant plus ou moins directement sur ce métal et en modifiant les caractères naturels.

SOMMAIRE. — I. De la chaleur. — II. Du carbone. — III. De l'oxygène. — IV. De la silice. — V. De l'alumine. — VI. De la chaux. — VII. De la magnésie. — VIII. Du soufre. — IX. De l'eau. — X. Du phosphore. — XI. Du manganèse.

La chaleur, le carbone, l'oxygène, la silice, l'alumine, la chaux, la magnésie, le soufre, l'eau, le phosphore et le manganèse ont une influence particulière sur le fer et en modifient plus ou moins les propriétés. Nous allons examiner séparé-

ment chacune des circonstances qui résultent de l'union de quelques-unes de ces substances avec le métal ; mais nous n'entrerons dans des détails qu'à l'égard de celles qui ont lieu le plus souvent et qui peuvent être utiles au maître de forges.

Nous devons, avant tout, dire qu'il existe dans le fer et les substances qui s'associent avec, cinq sortes d'union : *la combinaison, l'alliage, la dissolution, la suspension et le mélange.*

La *combinaison* a lieu, en proportions définies, constantes et toujours exactes, entre des corps qui perdent leurs propriétés physiques et chimiques particulières pour former un composé qui en a de nouvelles plus ou moins différentes de celles individuelles primitives. Tels sont les *oxydes de fer*, provenant de la combinaison du fer avec l'oxygène.

L'*alliage* s'opère entre deux corps qui s'unissent en proportion définie et constante également, mais dont la pâte, à l'état de fusion, a la faculté d'admettre une plus grande quantité de l'un qu de l'autre de ses constituants en proportion indéfinie et susceptible de varier à volonté. Lorsqu'on veut faire revenir ces alliages de l'état solide à celui de fusion, le moment où l'alliage défini acquiert le point de liquidité est un point fixe et un degré de température déterminé ; mais il n'en est pas de même de l'alliage qui a admis un des constituants en dissolution dans sa pâte selon une proportion indéfinie : le degré de chaleur nécessaire pour sa fusion dépend de la quantité et de la nature du constituant surabondant. L'acier fondu, ou l'acier proprement dit, est un véritable alliage défini ; la

fonte est un acier auquel il a été ajouté du carbone en excès.

Cette dissémination d'une quantité indéfinie de carbone en dehors des limites définies de la saturation, constitue la *dissolution*. Le carbone introduit en surabondance est, en effet, comme dissous dans l'alliage, qui, pour le recevoir, a dû prendre l'état fusible. C'est ainsi que se forme la fonte grise : l'acier produit dans l'ouvrage, à peu de distance des tuyères, rencontre une atmosphère riche en carbone, en dissout une certaine quantité qui ajoute encore à sa liquidité, et passe ainsi en gouttelettes devant la tuyère, dont elle brave impunément le vent décarburant.

Mais si la dissolution, pour s'opérer, a besoin de l'état liquide d'un des constituants, au moins, il n'en est pas de même de la *suspension*. Il suffit pour cela qu'un d'eux soit à un état de dilatation qui lui permette d'introduire dans ses pores l'autre substance rendue mobile au moyen de la vaporisation, et qui vient se placer entre ses molécules d'une manière lente et en pénétrant de la surface de contact au centre. Ce qu'on appelle improprement *acier de cémentation*, n'est pas autre chose que du fer pénétré par des particules de carbone, qu'il retient en suspension ; lesquelles, lorsqu'elles sont en quantité suffisante, lui donnent les conditions nécessaires pour produire, au moyen de la fusion, l'alliage qui constitue le véritable acier.

Le *mélange*, enfin, n'est qu'une association mécanique de corps qui n'ont aucune affinité entre eux, ou ne peuvent l'exercer, et ne sont réunis que par leurs parties intégrantes, qui se séparent à l'aide

de la division et non de la décomposition. Les gangues des minerais, quelques oxydes terreux, sont le plus souvent à l'état de mélange. Il suffit alors, pour en débarrasser le minerai pur, de casages, de triages ou de lavages préliminaires.

Ces données ont sans doute quelque chose d'hypothétique en ce moment ; elles recevront une confirmation dans le courant de cet ouvrage. Nous allons nous occuper, avant tout, des matières qui s'unissent avec le fer, soit par affinité, soit par alliage, soit par dissolution, soit par suspension.

I. DE LA CHALEUR

La cause de la chaleur nous est encore inconnue, malgré les étonnants progrès faits par les sciences dans la première moitié et à la fin du siècle dernier.

Une expérience qu'on a faite sur le fer tend à faire revivre l'ancienne théorie du calorique qui voulait que ce fût un fluide très subtil, pouvant, comme l'oxygène, se combiner avec les corps, pénétrer dans leur intérieur, s'interposer entre leurs molécules et en déranger les dispositions.

Le fer a une grande capacité pour le calorique : il faut le chauffer beaucoup plus longtemps que les autres métaux pour l'amener à la même température ; à mesure que le calorique manifeste sa présence dans le métal, les molécules de celui-ci s'étendent, prennent de l'expansion en tous sens, augmentent les proportions du fer et produisent le phénomène qu'on appelle *dilatation*.

Si l'on frappe une barre de fer avec le marteau,

on élève sa température, qui peut être portée, par ce moyen, jusqu'au rouge ; mais on n'obtient une seconde fois le même phénomène qu'en chauffant le métal dans un four. La dilatation, dans le martelage, ne se manifeste point : le fer, au contraire, resserre ses pores et diminue ses dimensions.

On explique cette apparente anomalie à l'aide d'une hypothèse : la chaleur semble exister dans les corps à l'état latent ; elle est soumise, malgré sa ténuité, aux lois physiques des gaz dilatables. Aussitôt qu'on élève la température du fer, le calorique interposé se dilate lui-même, tend à séparer davantage les molécules solides, plus disposées, en cet état, à se mobiliser, et produit une augmentation de volume. L'effet contraire doit avoir lieu dans la percussion : le marteau resserre, rapproche violemment les pores du fer, il force le calorique latent à s'échapper vers la surface. Il en résulte une augmentation de température ; mais l'arrangement mécanique des molécules est changé : le fer fibreux et doux devient cristallin et cassant, il a diminué de grosseur, quoique une température plus élevée se soit manifestée.

Si cette hypothèse est exacte, le fer, une fois chauffé par la percussion, ne pourra plus être porté à la même température par le même moyen, attendu qu'une partie du calorique s'est dégagée ; l'incapacité pour la chaleur se manifestera d'autant plus que les chaudes mécaniques auront été plus répétées ; il devra arriver un terme où il deviendra impossible d'élever le métal d'un degré seulement.

C'est, en effet, ce qui arrive : le fer porté à la

chaleur rouge, par la percussion ne peut plus être rougi une seconde fois par le marteau, à moins qu'on ne l'introduise préalablement dans un feu où il pourra reprendre le calorique qu'il a perdu ; si cette introduction n'a pas lieu, sa capacité pour ce fluide diminue sensiblement à la seconde opération, et ainsi de suite pour les opérations subséquentes.

On n'est pas encore parvenu à calculer bien exactement les dilatations du fer à diverses températures ; on sait seulement qu'elles ne suivent pas une loi constante et qu'elles augmentent en raison du calorique rendu patent. Petit et Dulong ont trouvé qu'entre 0° et 100° le fer se dilatait de 0,000035 ou de $\frac{1}{28200}$, ce qui est complètement erroné. Des expériences modernes ont donné pour ce coefficient de dilatation linéaire les chiffres suivants (la dilatation cubique est sensiblement égale à trois fois la dilatation linéaire) :

Fer forgé de qualité tendre	$\frac{1}{819} = 0,00122$
Fer tiré à la filière.	$\frac{1}{812} = 0,001235$
Fonte	$\frac{1}{901} = 0,001109$
Acier non trempé.	$\frac{1}{927} = 0,001079$

Ces chiffres s'accroissent proportionnellement à l'élévation de la température jusqu'à 200 ou 300° environ ; mais l'allongement des métaux croît ensuite plus vite que la température.

La capacité calorifique du fer entre 0 et 100° est de 0,1138 ; celle de la fonte, à la même température, de 0,1298 ; entre 100 et 300°, elle est, pour le fer, de 0,1218.

Les pouvoirs conducteurs sont, pour le fer, 374,3 ; pour la fonte, 561,5.

Les différents points de fusion sont donnés par les chiffres suivants :

Fonte blanche très fusible.	1050	degrés centig.
— — peu fusible	1100	—
— grise très fusible	1100	—
— — seconde fusion.	1200	—
— manganésifère	1250	—
Acier très fusible.	1300	—
— le moins fusible	1400	—
Fer doux français.	1500	—
Fer martelé anglais.	1600	—

Comme on le voit, Karsten s'était fortement trompé en portant la chaleur blanche du fer à 12000° de Farenheit (6600 à 6700° C.) ; et Parkinson en calculant la température de la fusion du métal pur à 158° pyrométriques (11964° C.) ; MM. Clement et Désormes étaient bien plus près de la vérité, en la supposant de 1749° C.

Ces différences proviennent de l'insuffisance des instruments avec lesquels on mesure les hautes températures dans les fourneaux, et de l'incertitude de leurs résultats. M. Culman, dans son excellente traduction de Karsten, donne le calcul des différents degrés thermométriques et pyrométriques ; il en résulte que le zéro du pyromètre de Wedgwood correspond à 598° C., et que chaque degré est égal à 72 degrés de notre thermomètre. Il nous est

impossible d'admettre ce calcul : la dilatation du pyromètre, dans les hautes températures, est inégale et n'est point proportionnelle à la chaleur. On ne peut compter sur sa justesse mathématique au-dessus de 29 degrés, ainsi que l'a prouvé de Saussure.

Le fer prend des couleurs différentes à ses diverses températures. Ce phénomène paraît provenir de l'oxydation plus ou moins grande du métal; près d'arriver à la chaleur rouge, il est couvert d'une légère pellicule qui échappe à l'analyse par sa ténuité, mais qui se comporte dans les acides comme l'oxyde de fer. On a, jusqu'à présent, retiré peu d'utilité de ces diverses nuances du fer. Elles servent dans l'acier à juger du degré de carburation et décarburation. C'est ce qu'on appelle les *couleurs du recuit*.

D'après les anciennes observations, les différents degrés de température du fer et de l'acier, dans les diverses opérations auxquelles ils sont soumis, seraient marqués par les degrés suivants du pyromètre de Wedgwood :

Jaune paille.	}	au-dessous du zéro de Wedgwood.		
— d'or.				
Gorge-pigeon				
Violet.				
Bleu foncé	}	0 de Wedgwood.		
Rouge brun			39	—
Rouge cerise			49	—
Rouge vif.			58	—
Rouge clair.			67	—
Rouge rose.			76	—
Rouge blanc				

Blanc pur	80	de Wedgwood.
Premier blanc suant	92	—
Deuxième blanc suant	95	—
Troisième blanc suant	99	—
Fonte grise, fusion	120	—
Acier, fusion	130	—
Fer, agglutination	150	—
Fer, fusion	160	—

Mais ces données ne sont pas susceptibles d'application et ne le seront guère jusqu'à ce qu'on soit parvenu à donner au pyromètre une appréciation comparée, d'une manière exacte, avec nos instruments thermométriques.

Lorsque après la trempe, l'acier est exposé à une chaleur douce et régulière, on le voit bientôt se ternir peu à peu, changer de couleur et devenir d'un *jaune paille* ; en continuant à chauffer, le jaune se fonce et passe au *jaune d'or*, qui disparaît avec l'augmentation de la chaleur et fait place à la couleur *gorge de pigeon*, ou cuivre rouge. Celle-ci ne tarde pas à se foncer et à prendre un ton *violet*, qui, à son tour, passe au *bleu foncé*. A cette teinte, en continuant toujours la chaleur, succède le *bleu ciel* qui, enfin, est remplacé par le *vert d'eau*. Là cessent les nuances visibles du recuit, pour laisser l'acier rougir.

Ces teintes sont parfaitement distinctes et très vives ; elles sont les signes caractéristiques de degrés distincts de température et servent à l'ouvrier pour reconnaître le degré auquel il doit tremper son acier pour obtenir, d'une manière exacte, une dureté voulue. Elles répondent aux températures centigrades suivantes :

Jaune paille	220 à 230°
Jaune d'or	231 à 240°
Gorge de pigeon	241 à 270°
Violet	271 à 290°
Bleu foncé	291 à 300°
Bleu ciel	301 à 330°
Vert d'eau	331 à 400°

Dans les usines où on chauffe le vent avant de le projeter dans l'ouvrage des fourneaux, les tuyaux qui le conduisent passent à travers des foyers incandescents et prennent diverses couleurs au feu, lesquelles indiquent assez exactement, suivant M. Pouillet, les degrés de température auxquels la tôle est parvenue et conséquemment celui de l'air chauffé. D'après cela :

Le rouge naissant correspondrait à .	525 degrés centig.
Le rouge sombre	700 —
Le cerise naissant	800 —
Le cerise	900 —
Le cerise clair	1000 —
L'orange foncé	1100 —
L'orange clair	1200 —
Le blanc	1300 —
Le blanc éclatant	1400 —
Le blanc soudant	1500 à 1600 degr. C.

Pour se rendre compte de la valeur calorifique *théorique* des diverses substances combustibles qui jouent un rôle quelconque dans la métallurgie du fer, on a pris pour unité de chaleur, ou *calorie*, celle nécessaire pour élever de 1° centigrade la température de 1 kilogr. d'eau liquide.

C'est ainsi qu'on arrive aux résultats suivants :

Bois séché à l'air	2950 calories.
— — au feu	3666 —
Charbon de bois contenant 20 0/0 d'eau.	6000 —
Charbon de bois sec.	7050 —
Tourbe.	1500 à 3000 cal.
Charbon de tourbe	7000 calories.
Lignite.	2280 à 4200 cal.
Houille maigre.	5280 calories.
— sèche.	5460 —
— grasse	6000 —
Coke ordinaire	6345 —
— métallurgique	7050 —

Mais cette méthode donne le pouvoir calorifique théorique ou absolu des combustibles, lequel diffère beaucoup de l'effet utile obtenu ou du pouvoir calorifique trouvé.

Pour obtenir ce dernier, il faut admettre, avec M. Regnault, que la chaleur totale de la vapeur d'eau saturée à 112°,5 C. est de 640,8 calories. Il s'agit alors de savoir combien de kilogrammes d'eau prise à 0°, un kilogramme de combustible marchand peut vaporiser à 112°,5 (de 110 à 115°), ou sous la pression de 1 1/2 atmosphère, et multiplier le poids obtenu par 640,8 calories.

On trouve d'après cela :

	Eau vaporisée	Combustibles	
		Marchand	Séché
Bois.	3,20 à 4,21	2351	2939
Charbon de bois	6,40 à 7,13	4345	4864
Tourbe.	2,34 à 4,08	1986	3256
Charbon de tourbe . . .	6,43 à 7,24	4281	4550
Lignite	2,03 à 4,02	1933	3554
Houille maigre.	5,63 à 6,85	4149	4380

Heuille sèche.	5,58 à 8,18	4495	4548
— grasse	6,84 à 8,07	4926	5011
Coke ordinaire.	6,59 à 7,50	4582	4902
— métallurgique.	7,45 à 7,70	4857	5156

Si l'on prend, pour unité de comparaison, la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade un gramme d'eau liquide, on trouve que le développement de chaleur donnée par les gaz qui réagissent, ou sont le produit de la réaction de l'intérieur des hauts fourneaux, est pour un litre de gaz :

Hydrogène.	3106 unités.
Vapeur de carbone.	7856 —
Hydrogène protocarboné	9587 —
Oxyde de carbone	3130 —

Voici maintenant quelques données pratiques en dehors des théories de la chaleur, mais ramenées exactement à l'unité des calories.

Il faut, pour chasser l'eau de l'oxyde de fer hydraté dans le haut fourneau, 300° de chaleur.

Le puddlage de la fonte faite au charbon de bois exige 8480 calories.

Les gaz du haut fourneau pris à 4 mètres de profondeur au-dessous du gueulard donnent, en brûlant, 9484 calories.

La quantité de chaleur dégagée par minute au gueulard d'un haut fourneau qui produit, au charbon de bois, 3,000 kilogr. de fonte en vingt-quatre heures et qui consomme 122 de charbon pour 100 de fonte de sablerie, atteint, par la combustion des gaz qui s'échappent, une température

de 1100 calories. C'est une perte de chaleur énorme qui représente 26 chevaux-vapeur de force.

On a beaucoup exagéré, autrefois, les degrés de température employés dans les opérations métallurgiques : on sait aujourd'hui qu'ils ne dépassent guère 1200 à 1500°, suffisants dans la plupart des cas.

II. DU CARBONE

Le carbone n'est autre chose que le charbon dégagé de toute substance étrangère. Ce corps n'a encore été trouvé à l'état de pureté absolue que dans le diamant. C'est le principe des combustibles solides.

Le carbone, en se combinant avec l'oxygène, forme deux corps gazeux : l'un, le *gaz acide carbonique*, est composé d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène ; sa composition chimique est par conséquent :

Carbone.	27,27
Oxygène.	72,73
	<hr/>
	100,00

Sa chaleur spécifique est de 0,221.

L'autre, l'*oxyde de carbone*, est composé d'un atome de carbone avec un atome d'oxygène, soit :

Carbone.	42,86
Oxygène.	57,14
	<hr/>
	100,00

Sa chaleur spécifique est de 0,288.

Le carbone agit sous le triple rôle de comburant,

réductif et carburateur : d'abord, il donne la chaleur nécessaire à l'opération ; puis il enlève l'oxygène au minerai et, enfin, il change la nature du métal en le saturant.

Dans la métallurgie du fer, telle qu'elle est connue actuellement, les deux éléments qui se trouvent dès l'abord en contact, c'est le carbone solide et l'oxygène gazeux, soit que ce dernier provienne de l'oxyde de fer, soit qu'il soit produit par l'air de la soufflerie.

Ce contact donne lieu à de singulières réactions :

L'oxygène se porte sur le carbone solide et le gazéifie ; il en résulte de l'acide carbonique, d'abord ; puis, le carbone se trouvant de nouveau en contact avec de l'acide carbonique, transforme cet acide en oxyde de carbone, qui, à son tour, et sous l'influence d'une nouvelle dose d'oxygène emprunté au minerai, se constitue de nouveau à l'état d'acide carbonique.

Ces réactions successives, en présence du minerai de fer et du charbon dans le haut fourneau, donnent l'idée d'une partie de ce qui s'y opère :

L'oxyde de carbone a la propriété d'enlever l'oxygène au minerai ; l'acide carbonique, une fois constitué, n'a point d'action sur l'oxygène ; il en a, au contraire, une grande sur le charbon, qu'il dissout à l'aide de son oxygène. Il est facile de voir comment ces deux corps gazeux, tour à tour saturés d'oxygène et de carbone, et passant sans cesse de l'un à l'autre état, réduisent le minerai de fer à celui du fer pur, et produisent une grande chaleur en brûlant ou oxydant le charbon.

Mais, en même temps que la réduction de l'oxyde a lieu, le fer, se trouvant à nu devant le charbon, se sature de carbone, qui se trouve sous la forme de flocons ou de vapeur et pénètre dans le métal, pour lequel le combustible a une grande affinité (1).

Comment s'opère cette pénétration, ce mélange ou cette combinaison ? Est-ce à l'état de vapeur de carbone ? Est-ce à l'état de dissolution du carbone dans le métal liquide, comme l'annonçait Rogers, et comme Julien a essayé plus tard de le démontrer ? Est-ce à l'état de simple mélange mécanique, comme on serait tenté de le conjecturer à la vue d'un morceau de fonte truitée ?

Si l'on remarque que les dissolutions entre deux substances ne peuvent avoir lieu qu'à l'état liquide de l'une d'elles, il devient intéressant de savoir à quel moment le fer et le carbone peuvent se trouver en présence l'un de l'autre dans cette condition.

Ce n'est point lorsque du fer, chauffé au rouge ou au blanc, est trempé dans du charbon froid et s'y cimente légèrement à la surface. Ce n'est pas davantage lorsque des barres plates de fer, stratifiées dans du poussier de charbon, sont soumises, dans des caisses closes, à une température très élevée et ouvrent leurs pores, simplement dilatés,

(1) M. Engelhart a signalé depuis longtemps, dans les hauts fourneaux qu'on met hors pour être refaits, de petites masses tuberculeuses de charbon pur qui ont pénétré dans les fentes et les crevasses de la cuve, derrière les pierres de l'ouvrage, derrière les étalages, ou même quelquefois derrière les parois du gueulard.

au charbon qui s'y introduit peu à peu de la surface au centre.

Dans ces deux cas, tous les éléments sont à l'état solide, et ne peuvent former qu'un mélange ou un alliage mécanique. Ce n'est point non plus dans les parties supérieures du haut fourneau, où l'un des éléments seul est liquide (le fer), où l'autre est à l'état de vapeur tout au plus, au moment de la formation de l'alliage du fer et du carbone.

Mais ce peut fort bien être quelques instants après cette première formation, lorsque l'alliage mécanique entre en complète fusion dans les parties plus basses du fourneau, et que la saturation peut s'opérer entre les deux éléments et prendre des proportions définies, au delà desquelles tout le carbone en excès reste en dissolution dans la pâte.

Ce peut fort bien être encore dans les creusets de fusion de l'acier, où le fer cémenté, l'alliage mécanique du métal pur et du carbone, est porté à une haute température, qui liquéfie le tout et permet alors aux petites sphères atomiques de se mouvoir, et de neutraliser leurs électricités différentes en s'alliant, pour ainsi dire, chimiquement.

Que l'union de fer et de carbone, fonte ou acier, soit le résultat d'une combinaison chimique, c'est fort douteux; mais qu'il forme un alliage à proportion définie, par analogie à ce qui se passe dans l'union des métaux, c'est beaucoup plus probable. Il n'en est pas moins acquis que si les deux produits ont une composition définie, analogue en certains points, ils diffèrent assez en

certaines autres, pour qu'on puisse en former deux classes : l'*acier de fusion* et la *fonte*.

L'acier de fusion est le type de cet alliage; il tient le carbone, à l'état d'union intime, en proportion définie, et cette composition est constante. Cela tient à ce que sa fusion est tranquille, que le métal et le combustible ont tout le temps de s'amalgamer, sans être exposés à des transformations ou à des mouvements qui éloignent ou rapprochent sans cesse les éléments.

Il n'en est pas de même de la fonte, qui, grâce à l'ignorance qui préside à la conduite des hauts fourneaux dans tous les pays, n'est jamais soumise à une fusion régulière et à une température constante.

La réduction du minerai, c'est-à-dire sa désoxydation, a lieu à diverses hauteurs, sujettes à varier, selon l'allure et conséquemment la conduite du haut fourneau, et spécialement le bon ou mauvais dosage des fondants : il en résulte une fusion le plus souvent incomplète et pâteuse, un alliage des plus irréguliers, un produit en fonte de toutes les compositions.

On fait de l'acier avec de la fonte, en enlevant à celle-ci un peu de carbone; on fait de l'acier avec du fer, en donnant à ce dernier un peu de carbone; l'acier contient donc moins de carbone que la fonte, et plus de carbone que le fer; la conséquence est évidente, en tenant compte toutefois de la teneur de certaine fonte en carbone.

Néanmoins, le rôle que joue le carbone dans la production des prétendus carbures de fer n'est pas facile à expliquer : tantôt la fonte est blanche et

semble retenir le combustible à l'état latent; tantôt elle est faiblement grise, sans qu'elle en contienne davantage; parfois, le graphite s'est développé et la rend d'un gris foncé; ailleurs, elle est truitée et présente, ou des points de carbure gris dans une pâte blanche, ou des points de carbure blanc dans une pâte grise. L'acier, au commencement de sa cémentation, ressemble de près à la fonte truitée grise; lorsqu'il a été refondu, il a l'aspect d'une fonte mi-grise, à grains fins.

La mobilité du carbone paraît ici extrême, et il se présente sous trop d'aspects différents pour qu'il se trouve toujours dans le même état. Quelquefois, on est tenté de le croire combiné intimement avec le fer, comme dans l'acier de fusion à grains fins; souvent, il semble en suspens mécanique au milieu de la pâte du métal, comme dans la fonte truitée et certain acier de cémentation.

L'hypothèse des alliages métalliques explique assez bien ces diverses manières d'être. Dans le principe de la fusion, le fer et le carbone s'uniraient ensemble dans une proportion définie et constante, et formeraient certaine fonte mi-grise, à grains fins; le carbone, continuant à affluer, pénétrerait dans la masse du premier alliage défini, s'y allierait en proportions indéfinies et formerait un mélange mécanique plus ou moins coloré, plus ou moins homogène.

L'union intime et en proportion définie du fer et du carbone constituerait ce qu'on pourrait appeler un *alliage chimique*, qui resterait fluide et se refroidirait régulièrement et sans grumeaux,

jusqu'à la température de la solidification, qui serait un point fixe.

Le mélange qui contient le carbone en excès serait également très fluide, mais se refroidirait d'une manière plus irrégulière et presque grumeleuse.

Cette hypothèse, qui a le grand avantage de rentrer dans la loi générale des alliages métalliques, laisse le champ libre aux explications relatives à la couleur de la fonte plus ou moins carburée.

En effet, tant que la fonte est liquide, elle retient facilement le carbone disséminé dans sa masse; mais, à mesure qu'elle se refroidit, elle perd sa force d'affinité mécanique et ne peut plus retenir le combustible en dissolution. Dans les fontes surchargées de carbone, et qui se refroidissent lentement, tout celui qui est en excès et ne fait pas partie de l'alliage chimique, se dégage à l'état de graphite et se porte de préférence vers la surface : de là vient que certaines fontes, blanches au moment de la coulée, et qui seraient devenues grises par un refroidissement lent, restent blanches si on les refroidit subitement.

Karsten, dont l'opinion, si recommandable d'ailleurs, est venue renverser les croyances des métallurgistes pratiques, veut que la combinaison intime et chimique du fer et du carbone ait lieu dans la fonte blanche et l'acier trempé, notamment dans la fonte lamellaire; que la fonte grise et l'acier non trempé contiennent le carbone à l'état de polycarbure; que dans la fonte très grise le reste du carbone soit à l'état de graphite,

disséminé mécaniquement et développé par le refroidissement lent; qu'enfin le ou les carbures ne se forment qu'au moment de la congélation.

Jusqu'à là, tout va bien, et, soit à l'état d'union définie d'alliage métallique, soit à celui de combinaison chimique, les deux hypothèses sont parfaitement admissibles; mais il cite, à l'appui de son opinion, des analyses dans lesquelles la fonte blanche semble contenir plus de carbone que la fonte grise, et là il est en complète contradiction avec tous les praticiens qui ont cru jusqu'à ce jour et croient encore le contraire, savoir : que la fonte grise contient plus de carbone que la fonte blanche.

Cependant, malgré le désaccord apparent de la théorie et de la pratique qui se manifeste ici, il faut bien se rendre aux preuves apportées consciencieusement par Karsten, et convenir que la plupart des analyses, faites par lui ou par d'autres savants, viennent corroborer son opinion. Il y a là, bien certainement, quelque élément important d'appréciation qui manque à la science, pour satisfaire à tous les phénomènes observés et reconnus.

Un des premiers pas à faire dans ces ténèbres, c'était de rechercher les proportions définies du ou des carbures de fer, autour desquels se mobilise le graphite confondu dans la pâte métallique. Rogers, qui combattit avec force les conséquences de la théorie de Karsten, a donné de ces carbures une formation plausible, quoique présentée sous la forme d'une hypothèse :

Le protocarbure de fer, dit-il, en suivant l'échelle

Maître de forges. — T. I.

13

des équivalents de Wollaston, serait formé de 96,55 de fer, uni à 3,45 de carbone, ce qui répond à la formule FeC de la fonte blanche;

Le sesquicarbure aurait pour formule atomique Fe^2C^3 , et répondrait à la fonte truitée dans la proportion de 94,91 de fer et 5,09 de carbone;

Le percarbure, ou fonte grise, composé de 93,33 de fer et 6,67 de carbone, serait représenté par l'expression chimique FeC^2 .

Les expériences de David Mushet sont d'accord avec cette manière de voir; suivant lui, la proportion de carbone contenue dans le fer cru serait :

Fonte blanche. . .	96.00 de fer	4.00 de carbone	
Fonte truitée. . .	95.00 —	5.00 —	
Fonte grise. . . .	93.33 —	6.67 —	

Il est assez difficile de faire concorder cette théorie avec les analyses chimiques que nous possédons. D'après celles faites par Karsten et par Wrihston, le carbone combiné s'élèverait de 0,60 à 1,87 0/0 de fonte, et celui libre de 1,67 à 5,22, passant par toutes les proportions et n'affectant, l'une à l'égard de l'autre, aucun rapport, d'où l'on puisse extraire une raison mathématique.

On est donc forcé d'ajourner la question, d'arrêter sa pensée suspendue sur ce singulier état de choses; mais il ne faut pas se dissimuler que, ni l'opinion de Karsten, en complète contradiction avec la pratique, ni celle de Rogers, qui tend à y ramener les faits, ne sont d'accord avec les formules atomiques de la science moderne.

En effet, les carbures de fer, chimiquement reconnus et admis dans la science, sont : le *bicar-*

bure Fe C^2 , le *sesquicarbure* $\text{Fe}^2 \text{C}^3$, le *protocarbure* Fe C , le *dicarbure* $\text{Fe}^2 \text{C}$, et le *tétracarbure* $\text{Fe}^4 \text{C}$, dont les compositions sont :

	Bicarbure	Sesqui- carbure	Proto- carbure	Dicarbure	Tétra- carbure
Fer.	69.58	75.31	82.07	90.15	94.82
Carbone.	30.42	24.69	17.93	9.85	5.18
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

L'analyse d'un grand nombre de fontes a donné les résultats suivants :

Fonte grise

Creusot.	2.10
Hallefort.	2.20
Creusot.	2.40
Gadley.	2.80
Allevard.	3.00
Kœnigshütte.	3.14
id.	3.65
Seyner.	4.60
Widerstein.	4.65
Malupane	4.90

Fonte truitée

Saint-Gazeran.	0.21	
Saint-Berthier	0.55	
Saint-Gazeran	0.81	
Akerby.	1.30	
Forsmark	1.50	
Monmouth	3.10	
et		
Galles du Sud	air chaud	3.50
	air froid.	3.50
	4.00	
	4.50	

Fonte blanche

Sainte-Hélène.	1.00
Halleford.	1.00
Brattefors	1.20
Cwmbran	1.45
Darby-Castle.	1.65
Ebbew-Vale.	1.89
Creusot.	2.00
Gadley.	2.19
Aberdare.	2.42
Alleward.	3.00

Comme on le voit, il n'y a rien dans ces résultats qui réponde à la teneur chimique des carbures de fer à proportions définies. La différence des chiffres suffit d'ailleurs pour démontrer jusqu'à l'évidence, qu'il ne faut point avoir recours ici à des combinaisons pour expliquer la présence du carbone.

La quantité de carbone contenue dans la fonte ne suffit pas pour expliquer la cause de sa couleur : des fontes grises, obtenues au charbon de bois, douces, à gros grains, pénétrées même d'une multitude de paillettes de graphite, ont donné à l'analyse 3,50 pour 100 de carbone, proportion exactement égale à celle de fontes blanches, à grandes lames éclatantes, contenant un peu de manganèse.

Les fontes au coke, beaucoup plus grises, comme on le sait, que celles au charbon végétal, ne contiennent pas plus de carbone. Il y a même des fontes noires au coke, des fontes anglaises, par exemple, qui ne donnent à l'analyse que 2,2 0/0 de carbone, tandis qu'une fonte gris-clair passant

au truité, provenant de Firminy, a offert une teneur de 3 0/0. Une fonte du Janon de médiocre qualité a même donné jusqu'à 4,3 0/0.

L'acier est loin d'offrir une teneur en carbone aussi considérable : l'acier Hausmann, analysé par le moyen du brome et de l'iode, a donné un résultat de 1,33 0/0 de carbone; un *acier de cémentation* anglais destiné à la fabrication de l'acier fondu, 1,87 0/0; l'*acier Wootz* de l'Inde ne contient que 1,5 de carbone, et celui de fusion 1,65. Laisant de côté les aciers Hausmann et de cémentation qui n'ont point de dose définie et ne sauraient en avoir à cause de leur mode de fabrication, le véritable alliage chimique du fer et du carbone, serait :

Fer	98.50
Carbone	1.50
	<hr/>
	100.00

III. DE L'OXYGÈNE

Lorsqu'on chauffe une barre de fer ductile à une température élevée et à l'abri du contact de l'air, on ne s'aperçoit d'aucun changement dans le métal; mais si on expose à l'action de l'air cette barre chauffée au blanc, la surface change de couleur et la barre augmente de poids. La croûte qui enveloppe le métal, donne, à l'analyse, du fer et de l'oxygène. Or, aucune autre substance que l'air n'a pu lui céder cet élément; le fer, mis en contact avec l'air atmosphérique, s'empare donc d'une partie de son oxygène à une haute température. La même chose arriverait si le métal était exposé

longtemps à l'air et à la température ordinaire; mais ici l'oxydation serait plus lente.

Dans l'air humide, le fer s'approprie tout à la fois : l'oxygène de l'air et l'oxygène de l'eau; et l'oxydation est d'autant plus prompte que la température est plus élevée.

A la chaleur blanche, l'oxygène n'a aucune prise sur le métal pur : c'est le moment qu'on choisit ordinairement pour rapprocher deux morceaux de fer et les *souder*. On favorise ce rapprochement en frappant avec le marteau et aidant ainsi à la force de cohésion. La seule difficulté, dans la soudure, consiste à empêcher le fer de s'oxyder hors du feu. C'est pour cela que les forgerons poussent la chaleur à une si haute température, même à un degré voisin de la fusion, qu'on appelle *blanc soudant*.

La même répulsion du fer pour l'oxygène a lieu à une très basse température au-dessous du zéro. M. Weiss nous a raconté qu'ayant envoyé des barres d'acier au pôle nord, pendant une expédition à la recherche de Franklin, ces barres laissées sur le pont du navire, dans ces climats brumeux et froids, restèrent inoxydées tant qu'elles furent dans les régions polaires; tandis que l'oxydation se manifesta dès qu'on revint vers le sud. On n'a, malheureusement, tenu aucun compte ni du degré de latitude, ni du degré thermométrique.

A l'état de division extrême du métal pur, comme dans la partie métallique de l'éponge Chenot, si l'on enlève avec un couteau un léger copeau ou une tranche mince de métal, et qu'on en expose une extrémité quelconque à la flamme

d'une bougie, le fer s'enflamme instantanément et continue à brûler jusqu'à ce que toutes les parties du copeau aient été atteintes. La combustion est activée par le souffle. En pesant le copeau avant et après la combustion, on trouve qu'il a augmenté dans l'opération d'un peu moins du tiers.

L'oxydation successive et graduelle n'existe pas dans la nature; elle s'opère en degrés tranchés et par mesures toujours les mêmes. C'est cette faculté qui rend si simple la théorie atomique de la chimie inorganique. Dans le premier degré, ou minimum d'oxydation, un atome d'oxygène se combine avec un atome de fer, et forme le *protoxyde de fer*.

Or, un atome d'oxygène pesant . . .	100
L'atome de fer pèsera	350
	<hr/>
Poids moyen du protoxyde . . .	450

En poids :

Oxygène	22.22
Fer	77.78
	<hr/>
	100.00

Ce protoxyde est représenté par la formule Fe O , dans laquelle Fe est le signe du fer et O celui de l'oxygène.

Dans le second degré d'oxydation, ou oxydation au maximum, un atome de fer s'unit à un atome et demi d'oxygène, ce qui, pour être exprimé sans fraction, revient à la combinaison de deux atomes de fer avec trois d'oxygène, représentée par la formule $\text{Fe}^2 \text{O}^3$, ou *sesquioxyde*.

Or, deux atomes de fer pèsent.	700
Et trois atomes d'oxygène.	300
Ce qui donne pour le poids moyen de l'atome. . .	<u>1000</u>

D'où l'on tire en poids :

Oxygène.	30
Fer.	70
	<u>100</u>

Ces deux combinaisons forment, au minimum et au maximum, les deux seuls oxydes *sui generis*. Ils constituent la base des principaux minerais de fer.

Il existe cependant un minéral de fer dans lequel les proportions d'oxygène et de fer ci-dessus ne sont pas gardées, et qui donne à l'analyse :

Oxygène.	27.56
Fer	72.44
	<u>100.00</u>

Ces nombres, soumis à la synthèse, ne donnent point de formule simple et ne peuvent conséquemment constituer un troisième oxyde. On a donc été amené naturellement à les considérer comme un mélange des deux oxydes, dans la proportion de :

	Oxygène	Fer
Peroxyde de fer	69	19.02
Protoxyde de fer.	31	8.54
	<u>100</u>	<u>27.56</u>
		<u>72.44</u>

dont la formule chimique est $\text{FeO} + \text{Fe}^2\text{O}^3$, c'est-à-dire un atome de chaque oxyde.

Outre ces trois oxydes qui se rencontrent dans la nature, il s'en forme un quatrième distinct à la surface du fer en barres, rougi au feu et battu au marteau, ou laminé. Cet oxyde, qui porte le nom d'*oxyde des battitures*, est composé de :

Protoxyde de fer	72.92
Peroxyde	27.08
	<hr/>
	100.00

dont la formule atomique est $6 \text{ Fe O} + \text{Fe}^2 \text{ O}^3$.

Ainsi, le peroxyde de fer, en passant à l'état d'oxyde magnétique, perd $\frac{1}{9}$ de son oxygène, et, en passant à celui d'oxyde des battitures, $\frac{1}{4}$.

Ainsi, dans la théorie chimique, chacune des quatre combinaisons oxydées serait représentée par les formules et les poids ci-après :

Protoxyde, ou oxyde des sels, $\text{Fe O} = 459$;

Sesquioxyde ou *peroxyde*, ou oxyde métallique, $\text{Fe}^2 \text{ O}^3 = 1,000$;

Protoperoxyde, ou oxyde magnétique, $\text{Fe}^2 \text{ O}^3 + \text{Fe O} = 1,450$;

Oxyde des battitures, $\text{Fe}^2 \text{ O}^3 + 6 \text{ Fe O} = 3,700$.

Chacun de ces oxydes a un rôle spécial dans les combinaisons naturelles employées dans la métallurgie.

Dans les variétés de minerai de fer dits : *fer spatique* et *fer lithoïde*, le métal est à l'état de protoxyde qui, sur 100 d'oxyde, donne 77,78 de fer. Ce minimum d'oxydation est dû à la présence du carbone de l'acide qui sature le métal et le retient à l'état de sel ou de fer carbonaté.

A la calcination, le protoxyde de fer se charge

d'oxygène et se transforme en oxyde magnétique; s'il reste exposé quelque temps à l'air et à l'humidité, il se sature entièrement et passe à l'état de peroxyde.

L'oxyde de fer se dissout facilement dans les acides, à la température ordinaire, lorsqu'il n'a qu'un certain degré de cohésion; mais la solubilité cesse, si on le chauffe fortement. En ce dernier cas, sa densité augmente, et sa capacité pour la chaleur diminue.

Le carbone saturé d'oxygène, c'est-à-dire constitué en acide carbonique, n'a aucune influence sur l'oxygène libre; les deux gaz peuvent se trouver en contact à l'état de simple mélange mécanique; mais s'il survient une nouvelle dose de carbone, les réactions s'opèrent aux dépens de celui-ci, et il se forme à l'instant même du gaz *oxyde de carbone*, qui ne réagit plus sur du nouveau charbon, mais qui a la propriété de s'emparer d'un atome d'oxygène, s'il s'en trouve à sa portée, et de former de l'acide carbonique de nouveau. C'est sur ces actions et réactions alternatives qu'est fondée la théorie de la réduction du minerai.

L'oxygène de l'air atmosphérique, lancé par la tuyère dans le haut fourneau, est entièrement absorbé dans la formation de l'oxyde de carbone qui apparaît dès la hauteur de la tuyère, et de l'acide carbonique qui ne se montre en quantité notable que dans les régions supérieures de la voûte; l'azote devenu libre, dès l'abord, monte à travers les charges, et refroidit le fourneau en s'emparant d'une portion du calorique développé par les combustibles.

Lorsque l'oxygène se trouve à la fois en présence de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone, l'action de l'hydrogène est paralysée par l'oxyde de carbone, et celui-ci s'unit de préférence à l'oxygène.

C'est à cette loi d'affinité qu'on doit l'inertie de l'hydrogène dans le haut fourneau. Ce qui arrive pour l'oxyde de fer du minerai, a également lieu pour la silice, la chaux, l'alumine et les autres oxydes terreux qui accompagnent l'oxyde principal : ils sont réduits par l'oxyde de carbone ; mais, comme ils ne peuvent former de carbures, ils passent à l'état de métal pur dans la fonte, où ils sont protégés par le charbon contre une réoxydation.

Il peut être assez difficile de concevoir pourquoi le fer, qui, dans sa transformation en carbone, cède si facilement son oxygène, ne le reprend pas avec la même facilité pendant sa décarburation, ou lorsqu'on ramène, par l'affinage, la fonte à l'état de fer pur ; mais il faut remarquer que toutes ces opérations de réduction ont lieu pendant la fusion du métal ; que cette fusion est produite par un combustible charbonneux, et que, par conséquent, tant qu'il reste un atome de charbon, il se forme de l'acide carbonique ou de l'oxyde de carbone. Le fer n'est arraché à l'influence du carbone que pour être étiré. Alors, sa masse est compacte, l'oxygène ne peut plus en attaquer que la surface, et c'est ce qu'il fait en produisant des battitures, qui, sous les machines de compression, jaillissent de toutes parts.

L'oxydation, à la température ordinaire, gêne beaucoup dans les divers usages du fer : on a cherché, de tout temps, à la prévenir ; mais, en

raison de la grande affinité des deux corps, le problème devient très difficile. L'étain, qui est beaucoup plus mauvais conducteur pour l'électricité que le fer, en accélère l'oxydation; mais une légère couche de zinc s'y oppose. Les substances alcalines sont d'excellents préservatifs : il suffit de plonger le fer dans une dissolution de potasse saturée à la température ordinaire, étendue de 1,000 à 2,000 fois son poids d'eau; ou encore dans une solution saturée de carbonate de soude étendue de 45 à 54 fois son volume d'eau; ou enfin dans de l'eau de chaux, étendue de trois fois son volume d'eau.

Une couche de charbon en poudre délayé dans de l'huile de lin est encore un bon moyen de préserver le fer, si surtout on y ajoute un peu de résine de copal.

M. Zeni a proposé, en 1828, un enduit propre à préserver le fer de l'oxydation et notamment de celle due à l'action de l'eau de mer. Pendant deux ans, des serrures, recouvertes de deux couches de cet enduit, ont été exposées à l'air et arrosées journellement par l'eau salée, sans qu'il en soit résulté aucune altération sensible du métal. Voici la composition de cet enduit :

Brique pilée et passée au tamis de soie.	80 parties
Litharge	20 —

Le tout doit être broyé à la molette, avec de l'huile de lin, de manière à former une peinture épaisse, qu'on délaie avec de l'essence de térébenthine. Il est nécessaire que le fer soit décapé avant l'application,

IV. DE LA SILICE

Lorsqu'on traite une fonte à gros grains par l'acide chlorhydrique et qu'on met le résidu en ébullition avec de la potasse caustique bien lavée, il reste du graphite qui, par l'incinération, laisse un résidu blanc. Ce résidu est de la *silice*.

Si l'on analyse un morceau de fonte, on est surpris de trouver un excès de poids en réunissant les divers éléments de l'expérience. Cette circonstance ne peut être attribuée qu'à la combinaison de l'oxygène avec un métal au moment de l'opération chimique, à l'oxydation du silicium de la fonte et à la formation de la silice.

Le silicium est un corps brun, sans éclat métallique; son oxyde est une terre blanche, rude au toucher et difficilement attaquable. Sa pesanteur spécifique est de 2,66, et sa composition, d'après Berzelius, de :

Silicium	49.70
Oxygène	50.30
	<hr/>
	100.00

Ce célèbre chimiste, de concert avec Stromeyer, a montré que le silicium s'unissait au carbure de fer dans une proportion assez considérable. Les deux savants ont mélangé 300 parties de fer, 150 de silice et 66 de charbon de bois, ou pour cent :

Fer	58.14
Silicium	29.07
Carbone	12.79
	<hr/>
	100.00

Soumis à la température des hauts fourneaux, il en est résulté un alliage composé de :

Fer	90.70
Silicium	5.70
Carbone	3.60
	<hr/>
	100.00

lequel montre jusqu'à quelle dose le silicium peut entrer dans la formation de la fonte.

Le silicium ainsi uni au carbure de fer ne paraît pas nuire à la qualité de la fonte; mais lorsqu'il passe dans le fer ductile, il n'en est pas de même. Il y est alors à l'état de silice et rend le métal cassant à froid. Une forte dose de silice produit cet effet; mais une faible dose donne du corps au fer. En chassant de la fonte et du fer le silicium et les métalloïdes, on épure le fer, mais on le rend cassant à chaud; les métalloïdes, en petites quantités, s'opposent à ce défaut; mais, en fortes proportions, ils conduisent à l'excès contraire: la rupture à froid.

La silice pure est une terre blanche qui le devient encore davantage lorsqu'elle est calcinée; elle forme alors une masse légère et terreuse. Lorsqu'on la place sur un charbon avec un poids de soude égal au sien, elle donne, à la flamme du chalumeau, un verre transparent et incolore. Si on la fait bouillir dans du carbonate de soude, elle forme un liquide incolore et transparent, qui devient gélatineux en se refroidissant.

La silice existe dans les minerais sous deux formes différentes: à l'état mécanique et formant gangue, ou même, et c'est le plus souvent, unie à

l'oxyde de fer hydraté sans changer de nature; à l'état de combinaison chimique, avec le protoxyde de fer et formant un silicate. Un excès de silice donne au métal une tendance à casser à froid. La proportion de silice qui se trouve dans beaucoup de minerais, dans l'oxyde des houillères notamment, varie entre 15 et 30 0/0.

C'est à l'état d'oxyde de silicium que le minerai apporte la silice dans le haut fourneau. Si aucun rétroactif vitrifiant ne se trouve en contact avec, elle est bientôt désoxydée par l'oxyde de carbone et passe à l'état de silicium dans la fonte, d'où il faudra plus tard l'extraire si l'on veut obtenir du fer doux ou ductile. En attendant, le moment favorable pour s'en débarrasser est passé : nul réactif dans le haut fourneau ne peut plus avoir d'action sur le silicium; il faut, dans l'affinage, l'oxyder de nouveau pour qu'un réactif alcalin ait prise dessus.

Au moment de la réduction dans l'ouvrage, l'oxyde de carbone se porte de préférence sur le fer oxydé et se sature d'oxygène, avant de s'attaquer à la silice. Si cette terre se trouve alors en présence d'un alcali terreux, tel que la chaux, par exemple, les deux oxydes s'unissent, au lieu d'être réduits, se vitrifient et défilent, en cet état, l'action du carbone. Ils forment un laitier à part qui coule au milieu des gouttelettes de carbure de fer et les protège contre le vent des tuyères, mais qui s'en sépare dans le creuset, à cause de sa légèreté.

Si le dosage des terres est bien fait, et que toute la silice du minerai et des cendres du combustible soit saturée, il ne passe pas un atome de silicium

dans la fonte, et le fer qui en proviendra sera doux et de bonne qualité. Mais, presque toujours, ce dosage est mal fait. La fonte arrive donc à la coulée avec :

3 0/0 de carbone
4,5 0/0 de silicium

C'est la moyenne de nombreuses analyses. Dans cet état d'impureté, il est indispensable de la soumettre au mazéage.

Le mazéage a pour but d'oxyder le carbone et le silicium, et de se débarrasser du premier à l'état de gaz acide carbonique; du second, à l'état de silice.

Le carbone est facilement enlevé par le vent des tuyères, tant que dure l'alliage mécanique de la fonte; mais, une fois arrivé à l'alliage chimique, l'oxydation n'est plus si facile, le fer retient fortement le carbone, et quoique le *fineur* soulève souvent le métal carburé et l'expose à l'oxygène des soufflets à tout moment, l'alliage chimique persiste et le *fine métal* sort de la mazerie retenant encore la moitié environ du carbone qu'avait la fonte en y entrant.

Outre cette difficulté d'oxyder le fine métal, difficulté que, du reste, l'ouvrier ne cherche pas à vaincre, il est intéressant, pour la promptitude de l'affinage, que le métal arrive au fourneau à puddler avec une certaine quantité de carbone. Il paraît certain qu'en continuant l'opération du mazéage anglais pendant un certain temps encore, on parviendra à chasser tout le carbone : c'est ce qui arrive dans les affineries comtoises; mais qu'y

gagnerait-on? L'opération durerait trois heures, au lieu de durer une heure et demie.

Quant au silicium, ce qu'il en reste est si peu de chose, qu'il est évident qu'un léger travail de plus suffirait pour l'oxyder. Le fine métal ne contient plus que 0,30 0/0 de silicium; il s'est donc perdu dans l'opération 4,20, qui se sont emparés de 2,55 de fer pour constituer un silicate. Il est évident, d'après cela, que l'état liquide de la fonte au mazéage favorise la séparation du silicium, mais que son influence s'arrête à une certaine limite pour le carbone.

Nous avons dit qu'au point de vue métallurgique, il n'y avait que deux sortes de fer : celui cassant à froid, mais malléable à chaud; celui cassant à chaud, mais malléable à froid. Répétons ici que le défaut de casser à froid est plus particulièrement dû à la présence de la silice, et celui de casser à chaud est plus spécialement l'effet de la présence du soufre.

Le fer a une très grande tendance de s'unir à la silice et à former des silicates. Cette union a lieu généralement pendant l'affinage, au moment où il y a oxydation du fer et de la silice. Il se forme une combinaison, d'un côté, de trois atomes d'oxygène avec un atome de silice, et, de l'autre, d'un atome de fer avec un atome d'oxygène. Trois atomes de cette dernière combinaison, ou protoxyde de fer avec un seul atome de silice, sous la forme $(\text{FeO}^3) \text{SiO}^3$, forment le silicate tri-ferreux des chimistes, le silicate ordinaire des métallurgistes. D'après cela; le silicate de fer ordinaire serait composé de :

Protoxyde de fer	70.00
Silice	30.00
	<hr/>
	100.00

Son poids atomique serait 1927,78.

Il est très rare que les fontes obtenues au charbon de bois contiennent plus de 0,50 de silicium pur. Ce chiffre est même une limite maximum. Dans les fontes au coke cette limite s'élève jusqu'à 4,50 0/0 et ne descend pas au-dessous de 2,50. Il ne faut pas s'étonner de cette surabondance du métal terreux dans le carbure de fer, puisque les cendres du coke sont fortement chargées de silice, dont on a l'habitude malheureusement de ne tenir aucun compte dans le dosage des fondants.

Toutes les espèces d'acier renferment une petite quantité de silicium, mais en proportion si minime (0,10 à 0,60 0/0), qu'il n'est guère probable qu'elle influe sur la qualité de l'acier, ou du moins soit indispensable à la cémentation, comme on l'a prétendu jusqu'à présent. L'expérience de Mushet, qui a combiné du fer pur, tendre, doux et ductile, avec une petite quantité de carbone et qui a ainsi obtenu un métal dur, fort, résistant et élastique, semblable à de l'acier fondu, est un fait caractéristique et concluant.

V. DE L'ALUMINE

L'alumine joue un rôle important dans le fondage des hauts fourneaux, celui de neutraliser la propriété de la silice, qui tend à rendre le fer cassant à froid; elle rend au fer sa qualité nerveuse

et ductile, mais un léger excès de cette terre lui donne, d'un autre côté, une tendance à produire un fer cassant à chaud. La proportion qui paraît, d'après l'expérience, convenir le mieux pour la neutralisation des deux terres l'une par l'autre, est celle de 0,33 d'alumine pour 1 de silice ; encore faut-il que le minerai rende 50 0/0 de fer, pour que le métal obtenu soit doux et nerveux. Avec un minerai dont la teneur en fer ne serait que de 40 0/0, le métal affiné serait aigre, difficile à travailler ; l'allure du fourneau serait lente, et les laitiers épais et visqueux, mais exempts de protoxyde de fer.

Les hématites du Lancashire, du Cumberland, etc., où souvent il se rencontre autant d'alumine que de silice, sont mélangées, par les maîtres de forges, avec les minerais silicieux des houillères et produisent du fer fibreux de grande réputation.

Lorsque l'aluminium se trouve uni à l'acier, il communique au métal une grande dureté. Ce fait est appuyé par la dureté naturelle à l'alumine, qui se manifeste dans certaines roches de corindon ; il est corroboré par l'analyse de Faraday faite sur le wootz, l'un des aciers les plus durs, dans lequel il a trouvé une certaine quantité d'aluminium, triple de celle du silicium.

On a fondu ensemble une certaine quantité d'acier très carburé et une portion d'alumine. L'alliage qu'on a ainsi obtenu présentait une fracture blanche, granulaire, brillante ; il donnait à l'analyse 6,4 d'aluminium. En mélangeant 67 parties de cet alliage avec 500 parties d'acier, on a obtenu

un métal composé, contenant 0,8 d'aluminium, qui avait tous les caractères du meilleur wootz de Bombay.

VI. DE LA CHAUX

La chaux est indispensable à la parfaite fusion de la fonte. De la silice et de l'alumine seulement dans le fourneau ne peuvent former un laitier qu'à l'aide du protoxyde de fer ; laitier qui, le plus souvent, malgré son état pâteux et peu coulant, renferme de 20 à 30 0/0 de métal pur. En ce cas, la fonte reste sulfureuse, cassante et impropre à une foule d'usages ; le fer est de la plus mauvaise qualité, cassant tout à la fois à froid et à chaud, et ne pouvant servir qu'à faire des lests de navires.

Un léger excès de chaux dans les fondants paraît être nécessaire pour la production de la fonte grise destinée au moulage. Ce moyen ne réussit pas toujours ; mais cette sorte de fonte n'est obtenue qu'en l'employant. Le laitier qui en résulte présente alors des cristaux calcaires de toutes dimensions, qui apparaissent dans la partie centrale, c'est-à-dire entre celle qui touche la terre et est blanche et opaque, et celle qui forme le dessus et offre de la transparence dans les laitiers bien faits.

La chaux a un autre avantage lorsqu'elle est en excès : c'est d'être un très bon réactif qui enlève le soufre au minerai et au combustible. Nous en reparlerons dans le chapitre du soufre.

Le calcaire employé dans les hauts fourneaux comme fondant est ordinairement un carbonate de chaux qui, à l'état de pureté, contient :

Chaux.	56,11
Acide carbonique.	43,89
	<hr/>
	100,00

Mais cette roche est rarement d'une composition aussi simple. Rien n'est plus variable que les éléments terreux qui accompagnent le carbonate pur : la magnésie, le manganèse, la silice, l'alumine et l'eau s'y trouvent, tantôt ensemble, tantôt séparés.

La magnésie forme quelquefois 14 0/0 du carbonate, et cela aux dépens de la chaux ; la roche est alors d'une couleur fauve remarquable. Quoique dans certains cas elle soit employée avec avantage, nous conseillons de la rejeter jusqu'à ce que son usage et ses bons effets aient été plus généralement constatés.

Le calcaire d'un bleu noirâtre est celui qui contient le plus de silice. Ici, c'est aux dépens de l'acide carbonique, car elle ne saurait y être à l'état de carbonate. Les calcaires gris, bleu pâle, jaunes, fauves, en renferment également, mais en moindre quantité. La couleur noire indique l'alumine.

Quant à la quantité d'eau contenue dans le calcaire, elle y existe toujours, mais dans des proportions extrêmement variées, généralement de 1 à 60/0.

Le carbonate calcaire le plus pur, qui contient 96 à 98 0/0 de carbonate et 53 à 55 de chaux, est d'un blanc cristallin, d'un blanc mat homogène, d'un blanc légèrement corné.

Les parties constituantes des différentes roches calcaires qui peuvent être employées avec le plus d'avantage dans les hauts fourneaux, sont telles qu'il suit :

Nature des carbonates	Chaux	Acide carbonique	Peroxyde de fer	Silice	Alumine	Magnésie	Eau
Calcaire blanc cristallin. . .	54.8	43.2	0.0	0.5	0.5	0.0	1.0
— compact . . .	54.3	42.7	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0
— corné.	53.7	42.3	0.5	1.0	1.0	0.0	1.5
Moyenne.	54.2	42.8	0.1	0.9	0.8	0.0	1.2
Calcaire gris.	52.6	44.4	0.5	3.0	0.5	0.5	1.5
— bleu pâle.	51.5	40.5	1.0	4.0	1.0	0.5	1.5
— bleu foncé.	50.4	39.6	1.0	6.0	0.5	0.0	2.5
— jaune.	44.8	35.2	10.0	3.0	1.0	3.0	3.0
— fauve.	33.6	42.4	6.0	3.0	0.0	14.0	1.0
— rougeâtre.	44.3	43.2	3.0	2.0	1.0	5.0	1.5
— noir.	50.4	39.6	0.5	0.5	2.5	0.5	6.0

Le carbonate de chaux ne se décompose pas immédiatement dans la cuve ; il ne perd que peu à peu son acide carbonique. A 5 mètres de profondeur, il en conserve encore les deux tiers. Lors donc que la calcination de la chaux s'opère, l'acide, pour se développer, emprunte rapidement aux gaz qui s'élèvent dans le fourneau une grande quantité de calorique latent, à l'aide duquel il prend la forme gazeuse. Il s'opère, dans la zone où a lieu cette réaction, un abaissement de température ; les gaz réductifs perdent de leur énergie et s'associent une partie de l'acide carbonique ; la vitesse de réduction est sensiblement diminuée.

VII. DE LA MAGNÉSIE

La magnésie est une terre extrêmement réfractaire, et qui a la propriété d'enlever aux autres terres leur fusibilité en grande partie. Cependant, elle peut remplacer la chaux dans le dosage des fondants, lorsque le fourneau est porté à une haute température. David Mushet a trouvé qu'un mélange de silice, d'alumine et de magnésie fondaient en un verre parfaitement clair. Rogers cite un cas où, à Penturch, dans le Glamorganshire, on emploie du calcaire chargé de magnésie dans un haut fourneau qui produit néanmoins 90 tonnes par semaine (15 tonnes par jour) de fonte grise d'excellente qualité, très recherchée dans le pays.

Il faut dire cependant que la marche et le rendement de ce fourneau sont soumis à de grandes irrégularités ; que la quantité et la qualité produites n'offrent aucune certitude ; que cela tient à

ce que la castine dont on se sert est un calcaire magnésien, en veines entremêlées dans le carbonate calcaire, qui s'exploite sans beaucoup de soin, et dont on jette les morceaux dans le gueulard, suivant l'usage assez général des forges, sans prendre la peine de trier les différentes roches, de manière à ce que les charges aient de l'homogénéité.

Le magnésium s'allie très bien avec le fer, et forme un métal tenace, pas trop aigre ni trop cassant. Le meilleur fer pour acier est obtenu de fonte faite avec des minerais spathiques, qui renferment tous de la magnésie. Telles sont les fontes de Danemora, telles sont celles de la Styrie.

Cette circonstance, dont on n'a pas encore suffisamment tenu compte, a donné à Rogers l'occasion d'émettre un doute sur la cause de la composition et de la couleur de l'acier fondu. Une analyse qu'il a faite sur un échantillon de ce métal lui a dévoilé la présence du magnésium, métal d'un blanc d'argent, doux et très malléable. Ne serait-ce pas là un des éléments qui donnent au fer de Suède cette qualité si recherchée des fabricants d'acier ? Rogers pense que 0,002 suffiraient pour produire un résultat digne d'attention, et il s'appuie sur une analyse de Berzelius, faite sur une fonte provenant de Suède, que nous donnons ici :

Fer	90.80
Carbone	3.93
Silicium	0.50
Magnésium.	0.20
Manganèse.	4.57
	<hr/>
	100.00

Cette analyse ne prouve malheureusement rien, car la qualité de l'acier fait avec le fer qui proviendrait de cette fonte, pourrait être plus justement attribuée au silicium, qui s'y trouve en plus grande proportion.

La présence de la magnésie dans les laitiers des hauts fourneaux donne à ceux-ci une teinte verte plus ou moins prononcée. C'est au silicate de cette terre, uni à un silicate de chaux, que sont dus les beaux cristaux de pyroxène qu'on trouve quelquefois dans ces laitiers.

VIII. DU SOUFRE

Le soufre s'unit au fer dans diverses proportions et lui donne plus ou moins de fragilité. 0,00007 de soufre suffisent pour altérer les qualités du meilleur fer et le rendre impropre à certains usages, tels que la fabrication du fil de fer fin, la tôle fine, etc.

En suffisante quantité, il rend le fer liquide, au point de le faire dissoudre si la température du métal est assez élevée. La matière qui résulte de ce mélange, et qui est un sulfure de fer, est extrêmement fragile, car le fer qui contient du soufre, même en petite dose, est toujours cassant à froid.

Cette propriété du soufre de s'emparer du fer et de le liquéfier est instantanée; on s'en est servi pour percer des barres plates de ce métal et y former des trous pentagonaux, hexagonaux, etc. Pour cela, il n'y a qu'à tailler un morceau de soufre de la forme qu'on veut donner au trou, et chauffer au blanc soudant la barre à percer; le soufre, appliqué ensuite dessus bien perpendi-

culairement, fait, en peu de secondes, un trou dont la forme est exactement semblable à celle du bâton de soufre appliqué.

L'action du soufre en vapeur sulfureuse suffit pour corroder en peu de temps les chaudières en tôle. Ce phénomène s'est présenté lors des premières applications de l'asphalte à Paris et à l'étranger : la houille employée au chauffage de ces appareils dégageait beaucoup d'acide sulfureux qui, s'attachant au fond des chaudières, les perçait en quelques jours. Le fer a une telle affinité pour le soufre qu'il l'enlève à tous les autres métaux. C'est sur cette affinité qu'est fondé l'emploi du métal dans le traitement des sulfures métalliques, notamment des galènes ou sulfures de plomb au fourneau à manche.

Cette affinité est cause que, d'une part, le fer se charge très facilement de soufre; qu'il le retient avec d'autant plus de force que la proportion du métalloïde est moindre, et que la plus petite dose est suffisante pour rendre le fer aigre. J. Mitchell a prétendu que 0,00034 de soufre donnent du fer rouverin. Il est quelquefois bien difficile d'en trouver dans les essais du fer autre chose que des traces; à cet égard, nos moyens d'analyse sont le plus souvent impuissants.

Le soufre est combiné dans le fer dans deux proportions définies constantes; à l'état de persulfure et à celui de protosulfure, savoir :

	Soufre	Fer
Pyrite jaune, ou persulfure Fe S^2 . .	53.45	46.55
Pyrite blanche, ou protosulfure Fe S . .	36.47	63.53

L'origine du soufre dans la fonte et le fer provient d'abord des minerais qui, malgré la plus forte calcination, en conservent toujours plus ou moins, surtout à l'état de pyrite; tous les combustibles minéraux en renferment également, généralement sous la forme de protosulfure de fer, laquelle forme passe très probablement à celle de sous-protosulfure dans la fabrication du coke, sous l'influence d'une haute chaleur. La houille fraîchement abattue est remarquable par ses proportions de sulfure de fer. Il y a même des circonstances où le charbon de bois n'en est pas exempt. Cependant, jusqu'à un certain point, le carbone paraît exclure le soufre, s'il faut prendre surtout pour témoin la fonte qui contient, lorsqu'elle est blanche, moins de carbone et plus de soufre que la fonte grise.

Si l'on veut s'assurer simplement qu'une ou plusieurs fontes contiennent du soufre, on peut mettre à profit la propriété qu'a ce corps de changer l'acétate de plomb en plomb noir. Pour cela, on prépare une solution aqueuse d'acétate de plomb, dans laquelle on trempe un certain nombre de morceaux de papier, qu'on expose ensuite, pendant huit à dix secondes, à la vapeur d'ammoniaque fortement caustique.

D'un autre côté, on prend un flacon de huit onces et on y jette une quinzaine de grammes de limaille de fonte qu'il s'agit de soumettre à l'essai. On en fait autant avec les différentes variétés de fonte qu'on peut vouloir comparer, de manière que chaque variété ait son flacon particulier. On verse dans chaque flacon une once environ d'acide

chlorhydrique étendu, qui dissout la fonte et met en liberté beaucoup de gaz hydrogène, entraînant le soufre avec lui. Le gaz hydrogène sulfuré est, comme on le sait, remarquable par son odeur prononcée d'œufs pourris.

En exposant chacun des morceaux de papier préparés à la vapeur de chaque flacon qui renferme un spécimen différent de fonte, les papiers prennent une teinte différente : la fumée de l'échantillon le plus chargé de soufre changera la teinte en noir ou en brun foncé, et les teintes des autres seront d'autant plus claires que la proportion de soufre sera plus faible. La fonte très grise, par exemple, qui ne contient qu'une trace de soufre, altérera à peine la couleur du papier. Ce moyen empirique n'a rien d'exact, comme on le voit, et ne peut donner qu'une idée approximative de la teneur en soufre de la fonte. Nous avons cru devoir, néanmoins, le présenter ici, parce qu'il permet de s'assurer promptement de la qualité du carbure de fer.

La méthode empirique suivante peut avoir aussi son application dans le travail des hauts fourneaux au coke.

La formule du sulfure de fer dans les combustibles donne un moyen bien simple et suffisamment exact de connaître la quantité de soufre contenue dans leurs cendres : il faut, pour cela, connaître seulement la quantité de fer qu'elles donnent à l'analyse et en déduire le soufre par induction. Il suffit, dans la pratique, de savoir que chaque 10 grammes de peroxyde de fer Fe^2O^3 trouvés dans les cendres du coke, indiquent, dans

ce coke, la présence de 2 grammes de soufre, formant 9 grammes de sous-protosulfure de fer. Ceci, pour le coke fait en plein air ou dans des fours ouverts. Pour le coke fait en vase clos, 10 grammes de peroxyde, dans les mêmes cendres, indiquent 4 grammes de soufre, ou 11 grammes de protosulfure. Mais, 10 grammes de peroxyde de fer dans les cendres du coke, indiquent, dans la houille qui l'a produit, l'existence de 8 grammes de soufre, qui, combinés avec 7 grammes de fer, donnent 15 de persulfure.

Ainsi, en supposant que les cendres jaunes ou brunes de 1,000 kilogr. de houille contiennent 10 kilogr. de peroxyde ou sesquioxyde de fer $Fe^2 O^3$, ce qui est presque le double de la teneur des houilles anglaises, on aurait les trois résultats suivants, pour 1,000 kilogr. de houille :

Coke en meules : 9 kilogr. de sous-protosulfure contenant 2 de soufre ;

Coke en vase clos : 11 kilogr. de protosulfure contenant 4 de soufre ;

Houille brute : 15 kilogr. de persulfure contenant 8 de soufre.

Nous venons de montrer combien le soufre est nuisible à la bonne qualité du fer ; nous avons indiqué le moyen pour reconnaître sa présence dans la fonte et dans les combustibles. Pour compléter cet article, il faut indiquer comment on parvient à l'expulser. Malheureusement, les remèdes que nous allons proposer ne sont pas complets et décisifs.

D'abord, pour le minerai, il n'y a que deux

moyens d'enlever plus ou moins le soufre, lorsqu'il en contient :

1° Une longue exposition à l'air et à ses intempéries, à l'aide de laquelle on obtient la formation d'un sulfate de fer que l'eau dissout facilement ;

2° Une calcination très forte et prolongée, afin de volatiliser le plus possible de soufre d'acide gazeux.

Pour les combustibles minéraux, éviter d'employer des houilles sulfureuses, et, pour y parvenir, consulter les cendres produites dans la combustion : celles brunes, ou même jaunes, indiquent une houille chargée de soufre; les cendres rouges sont l'indice d'un maximum de ce métalloïde; celles blanches en sont exemptes, ou n'en renferment qu'un minimum. La couleur jaune, brune ou rouge, provient de la présence du fer, qui est un réceptacle pour le soufre. Le carbone pur, au contraire, n'en contient pas, et la houille non ferrugineuse en est exempte, car ce n'est qu'à l'état de pyrite de fer ou de fer sulfuré que se trouve le soufre.

Il est inutile de dire ici que, nécessairement, le coke participe de la bonne ou mauvaise qualité de la houille qui a servi à le fabriquer. Il est bon cependant de faire observer que le coke fait à haute température, longuement continuée, est moins susceptible d'être sulfureux : la combinaison *minima* du soufre et du fer, c'est-à-dire un atome du premier avec deux atomes du second, se réduit encore sous une grande chaleur et, en présence du carbone, devient un bicarbure de soufre volatil. La conséquence de tout cela, c'est

que plus la fonte est carburée, meilleur est le fer qui en provient. Il faut donc, pour avoir du fer de qualité supérieure, employer de préférence les fontes grises.

Dans les hauts fourneaux soumis à une énorme chaleur, un excès de chaux dans les fondants enlève à une grande partie du soufre la tendance à s'unir au fer, en formant dans le laitier un sulfure de calcium : le laitier alors, au lieu d'être un double silicate dans lequel l'oxygène de la base n'est que la moitié de celui de l'acide, devient un silicate dont l'oxygène est égal dans les deux parties. Il est, en conséquence, plus réfractaire, rend les scories plus fusibles et exige une plus grande chaleur.

En résumé, ne laissons pas pénétrer le soufre dans nos matières; car, une fois entré, on ne parvient jamais à le chasser entièrement. Cela s'entend spécialement de la fonte destinée à l'affinage et du fer marchand; il n'est pas bien prouvé encore que le soufre, lorsqu'il n'est pas en forte proportion, ait une influence fâcheuse sur la qualité de la fonte de moulage : en Suède, notamment à l'usine d'Aker, les minerais sont généralement sulfureux, et la fonte contient 0,98 0/0 de soufre; cependant, l'on fabrique dans cet établissement des canons d'une grande ténacité qui résistent souvent aux plus rudes épreuves.

IX. DE L'EAU

L'eau joue un très grand rôle dans la métallurgie du fer, soit à l'état de liquide, soit à celui de

vapeur : elle constitue une classe de minerais de fer nommés, à cause de sa présence, *hydrate* ou *hydroxyde de fer*, et sa vapeur produit des réactions diverses sur les matières qui accompagnent le fer et sur le fer lui-même.

L'eau se compose de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, lesquels trois atomes sont condensés en deux. Cette composition est représentée par la formule H^2O , et donne pour 100 parties :

Hydrogène	11.10
Oxygène	88.90
	<hr/>
	100.00

Elle est inscrite, dans la table des poids atomiques, pour 112,4786, provenant du calcul suivant :

2 atomes d'hydrogène à 6,2393. . .	12.4786
1 atome d'oxygène	100.0000
	<hr/>
	112.4786

Lorsque l'eau est amenée, par la chaleur, de l'état liquide à l'état de vapeur, l'affinité qui réunissait chimiquement les deux gaz diminue sensiblement, et l'oxygène se porte sur le fer qu'il oxyde. Si l'on fait passer un courant de vapeur d'eau dans un four, où il se trouve une certaine quantité de silice, tout ce qui est exposé au gaz aqueux se dissout, et une forte partie est entraînée et déposée sur les parois par où s'opère la sortie de la vapeur.

L'eau elle-même a la propriété de dissoudre la silice au moment de sa formation, c'est-à-dire lors

de l'oxydation du silicium. En considération de l'énorme quantité d'oxygène contenu dans l'eau et dans sa vapeur, on est tenté de penser qu'on pourrait, pour la production de la chaleur, tirer un excellent parti de la vapeur d'eau, lancée dans un haut fourneau, soit concurremment avec l'air, soit seule. La vapeur, en effet, renferme 81 0/0 du gaz combustible, tandis que l'air n'en contient que 28; elle semble donc plus propre à produire une grande chaleur que l'air, à donner une combustion plus rapide et à augmenter beaucoup la production de fonte d'un haut fourneau.

Cependant, ces avantages de la vapeur ne sont qu'apparents. Il est probable que ce gaz essentiellement oxydant opère, dans le fourneau, une double réaction, dont les résultats compensés finiraient par être désavantageux. La vapeur d'eau lancée dans le fourneau concurremment avec l'eau, se trouve en présence du combustible qu'il s'agit de brûler, et du fer qui vient se désoxyder pour se charger de carbone.

Or, en quelque petite quantité que se projette la vapeur, elle apporte dans l'opération du fondage une énorme quantité d'oxygène qui équivaut au moins au double de celle due au vent des machines soufflantes. Il y a bien vite surcharge de gaz comburant; une partie seulement sert à la combustion, car si le charbon demande à brûler avec une certaine vitesse, c'est dans des limites et avec des quantités d'oxygène strictement suffisantes. L'excès de gaz oxydant est cause que la partie qui n'a pas été employée à former de l'acide carbonique et de l'oxyde de carbone, rencontre, en s'échappant vers

la cuve, le fer pur au moment où il va se charger ou se charge déjà de carbone, l'oxyde ou le décarbure, et détruit par une réaction nouvelle la réaction favorable à la formation de la fonte. Pendant ce temps, l'air atmosphérique lancé par les tuyères ne reste pas oisif dans l'ouvrage : il s'occupe à saisir au passage les gouttelettes de fonte, il les décarbure, et le creuset ne reçoit plus que de la fonte blanche et pâteuse. Tout ceci semble bien peu certain ; mais c'est une manière d'expliquer le non-succès des expériences faites, il y a longtemps, dans les hauts fourneaux d'Angleterre avec de la vapeur d'eau.

Il est vrai que ces hauts fourneaux marchaient au coke. M. Zincken, dans le journal d'Erdmann, a rendu compte d'expériences faites dans le fourneau de Schierke (comté de Wernigerode) marchant au charbon de bois, lesquelles ont amené des résultats favorables, entièrement opposés à la théorie que nous venons de donner. Malheureusement, les détails les plus essentiels manquent, pour qu'on puisse bien apprécier la cause du résultat différent obtenu. Avant l'essai, le haut fourneau ne rendait que 228 quintaux de fonte par semaine ; on passait, en moyenne, 23 charges en vingt-quatre heures. L'introduction de la vapeur fut d'abord signalée par le ralentissement de la descente des charges : on n'obtenait que 23 charges en vingt-quatre heures ; mais bientôt l'allure changea d'une manière favorable : on vit descendre 36, 38, 39 et même 40 charges dans le même temps.

Les produits hebdomadaires augmentèrent chaque semaine : ils furent de 285 quintaux la pre-

mière semaine, de 315 quintaux la seconde, de 333 quintaux la troisième, de 352 quintaux dans la suite des essais; il est fâcheux que le rédacteur de la note qui rend compte de cette expérience, n'ait fait connaître ni la quantité, ni la tension de la vapeur introduite dans le haut fourneau, ni la quantité de la fonte obtenue, ni la quantité de charbon consommée : ces omissions très importantes ne permettant pas d'apprécier les résultats obtenus; elles sont d'autant plus à regretter, que le rapporteur, M. Zincken, a depuis fait lui-même des essais de projection de vapeur dans le haut fourneau de Maegdesprung, lesquels n'ont pas réussi, et qu'enfin ce procédé n'a pas été adopté en Allemagne.

L'action lente de l'eau sur la fonte et le fer peut quelquefois être mise à profit pour en améliorer la qualité. Plusieurs tonnes de fer puddlé ayant été exposées, pendant plusieurs mois, aux intempéries et à l'air atmosphérique, se couvrirent d'efflorescences de protosulfate de fer en aiguilles ou petits cristaux verdâtres. Rogers, qui rapporte ce fait, estime la quantité de couperose verte à 734 gr. par tonne, ce qui suppose l'infime quantité de 0,000084 de soufre, uniformément répandue dans la masse de 1,000 kilogrammes.

Les réactions successives qui étaient parvenues à produire ce résultat sont faciles à expliquer : le soufre contenu dans le fer s'était transformé en acide à l'aide de l'oxygène de l'air, dont l'humidité avait également constitué le protoxyde de fer, d'une part et, de l'autre, la quantité d'eau nécessaire à la formation du sel.

De cette curieuse épuration nous pouvons tirer deux enseignements : le premier, c'est qu'une longue exposition à l'air des matières employées dans la fabrication du fer, ou en résultant, telles que le coke, le minerai calciné, la fonte, le fine métal, ou le fer puddlé, leur enlève le soufre en formant un protosulfate; le second, c'est qu'on peut trouver ici l'explication des faits cités plus haut sur l'élimination du soufre.

Quant à la manière de se défaire du sulfate de fer, c'est ici que l'eau joue un rôle efficace. On sait, en effet, que ce sel, de même que les sulfates d'alumine et de magnésie qui peuvent se former de la même manière, sont solubles dans l'eau; il suffit donc d'arroser artificiellement ou de laisser exposées à la pluie, les efflorescences salines, pour qu'elles disparaissent complètement. Un long séjour dans l'eau ou dans une terre humide produira, sans aucun doute, le même effet et donnera de la qualité à la fonte, au fine métal, au fer puddlé, à l'acier et même au fer.

L'eau se trouve souvent en assez forte proportion dans les combustibles; elle est la cause de la décré-pitation de l'antracite dans le haut fourneau. Elle y existe à l'état organique et représente 1,5 0/0 du poids du combustible. Exposée à une grande chaleur, l'eau se réduit subitement en vapeur et produit de petites explosions qui rompent l'antracite et le projettent en morceaux de toutes parts.

Dans les autres combustibles, la proportion d'eau est encore beaucoup plus considérable. On a remarqué qu'elle formait une très forte partie des combustibles végétaux. Voici, en moyenne, la quantité

approximative que différents essais en ont fournie pour 100 parties :

Bois	12 à 22
Tourbe	24 à 38
Lignites séchés à l'air	23 à 28
— fraîchement extraits.	45 à 47
Houille anglaise	0,3 à 1,7
— de France	0,3 à 1,7
— de Saxe	0,6
— de Silésie	2,6 à 4,4
— de Saarbruck	0,5 à 5,1
— de Westphalie	1,4 à 1,7
— d'Eschweller	0,8
Charbon de pin	10,5
— de chêne	10,5
— de tourbe	5,4
Coke	4,9 à 5,9

L'air des tuyères entraîne toujours un peu de vapeur aqueuse, lorsque surtout l'atmosphère est humide. Cette vapeur se décompose et forme environ 1 0/0 de la masse aériforme qui va réagir, se transformer ou s'échapper à travers les étalages et la cuve. L'hydrogène qui en résulte passe à travers l'ouvrage et les étalages sans éprouver de changement; là son volume est augmenté par le produit de la vapeur aqueuse. A partir du ventre, la masse totale de ce fluide va sans cesse en augmentant, grâce à la décomposition continue des matières humides qui perdent leur eau; et, à la hauteur du gueulard, l'hydrogène forme 17 0/0 de la masse aériforme.

Maitre de forges. — T. I.

IRIS - LILLIAD - Université Lille 1



X. DU PHOSPHORE

Le phosphore se comporte envers la fonte d'une manière analogue au soufre ; il s'oppose à la formation de la fonte grise ; il augmente la fusibilité du métal, lui fait conserver plus ou moins sa liquidité, et la rend plus propre au moulage, mais plus mauvaise pour l'affinage.

Quant à son influence sur le fer métallique, elle a pour résultat de le rendre plus fusible, mais, en même temps, d'en altérer la qualité. Le fer qui contient du phosphore est facile à travailler à froid, mais il soutient difficilement le feu. Une petite quantité de phosphore de fer dissoute dans une grande quantité de fer métallique diminue la ténacité du métal à la température ordinaire et le rend cassant à froid, tandis qu'il reste ductile à la chaleur rouge.

Quelques minerais contiennent du phosphore, ainsi que nous l'avons déjà vu ; mais celui contenu dans la fonte provient souvent de la pierre à chaux, qui renferme toujours des phosphates. Aussi, plusieurs savants étaient d'avis de supprimer l'emploi de la castine. Nous ne savons, en vérité, ce qu'ils auraient pu mettre en place, et comment on pourrait, sans l'emploi de la chaux, neutraliser les effets nuisibles des autres métalloïdes.

Le phosphore a l'avantage de neutraliser en partie l'effet nuisible du soufre et d'empêcher, dans certains cas, la formation du fer rouverin. S'il se trouve en trop grande quantité dans les minerais, il facilite outre mesure la fusibilité de la fonte et tend à l'empêcher de se saturer de carbone.

XI. DU MANGANÈSE

L'oxyde de manganèse est un des agents les plus énergiques des réactions de hauts fourneaux ; il fournit abondamment de l'oxygène au silicium et aux métaux électropositifs, qui n'attendent que la présence de ce gaz pour s'oxyder et devenir terreux ; dans le puddlage, il enlève rapidement son carbone à la fonte, en facilitant la formation des silicates ; et, dans l'acier, il s'empare du carbone laissé en état de suspension mécanique dans la pâte de l'alliage défini ; il purifie ainsi celui-ci et ne saurait l'altérer, parce que son affinité pour le carbone peut balancer celle du carbone pour le fer. L'oxyde de manganèse facilite encore la fusion dans le haut fourneau, toutefois qu'il ne soit pas en excès. Il est bon de ne pas rejeter les minerais qui en contiennent, lorsque cet oxyde ne représente pas plus de 4 à 5 0/0 du poids du minerai.

La présence du manganèse dans le fer ôte au magnétisme une partie de sa puissance ; lorsque le métal en possède une forte dose, la vertu attractive disparaît entièrement. Mushet en tirait naturellement cette conséquence, que l'acier fait avec du fer de Suède ne pouvait tenir sa qualité du manganèse, et que l'acier de Suède n'en devait contenir que fort peu, attendu qu'il était très propre à la fabrication des plus forts aimants. Mais les expériences de son fils donnent un tout autre résultat.

M. Robert Musher, qui paraît avoir fait beaucoup d'expériences sur l'addition du manganèse au

fer et à l'acier, prétend que ce métal améliore beaucoup la qualité de l'acier, et qu'il suffit, sans la présence du carbone, pour convertir le fer en acier. Ces deux assertions sont en complète contradiction avec celles de Karsten, qui a trouvé que le manganèse n'avait aucune influence sur le fer et son carbure ; que du fer chargé de manganèse jusqu'à 1,85 0/0 ne présentait aucun des caractères de l'acier, et qu'enfin de l'acier de première qualité n'offrait aucune trace de manganèse. Nous expliquerons ces prétendues contradictions à l'article de l'acier au manganèse et du ferro-manganèse.

M. Heath prit, il y a déjà longtemps, en Angleterre, un brevet d'invention pour l'amélioration de l'acier au moyen du carbone et du manganèse qu'il mettait, avec le métal, dans les creusets de fusion. C'était à l'état de carbure de manganèse que l'alliage devait être ajouté à l'acier. Quoique ce procédé ait été beaucoup prôné et ait fait beaucoup de bruit, il ne paraît pas qu'il ait eu un grand succès. Il semble que, dans cet emploi, le manganèse ne devait produire d'autre effet que d'adoucir l'acier, c'est-à-dire lui enlever du carbone, et comment pouvait-il le faire s'il était à l'état de carbure ?

C'est là ce qui arrive dans les fontes manganésées, où le métalloïde empêche la dissémination du carbone non combiné dans la pâte du métal carburé et rend la fonte blanche, quoiqu'elle contienne autant de carbone que certaine fonte grise.

Beaucoup de maîtres de forges anglais pensent, néanmoins, que la présence du manganèse est nécessaire à la fabrication de l'acier fondu. Des

spécifications d'un grand nombre de brevets pris par Mushet Robert, en 1857, portent presque toutes sur l'addition de l'oxyde de manganèse à la fonte en partie décarburée, au moment où elle est encore liquide. Le procédé de M. Franz Uchatius, pour la production de l'acier, est également fondé sur l'addition de l'oxyde gris de manganèse à la fonte réduite en grains. En traitant de l'acier, nous essaierons de donner la raison de ces opinions.

Le manganèse, en présence du carbone, joue un rôle analogue à celui du fer : dans les proportions chimiques, les carbures de manganèse ont une complète analogie avec les carbures de fer, ainsi que le prouvent les analyses suivantes :

	Carbone	Manganèse
Bicarbure	30,62	69,38
Sesquicarbure	24,89	75,11
Protocarbure.	18,09	81,91
Dicarbure	9,95	90,05
Tétracarbure.	5,23	94,77

Les protoxydes, peroxydes et sesquioxydes des deux métaux offrent les mêmes proportions ; les sulfures se forment également, chez l'un et chez l'autre, à une haute température ; et le traitement du manganèse par le charbon, dans un four à manche, produit un résultat métallique qui a beaucoup de rapport avec la fonte et donne une sorte d'acier dur et cassant.

CHAPITRE IV

Des fondants et additions diverses

SOMMAIRE. — I. Calcul du lit de fusion. — II. Calcul stoechiométrique. — III. Méthode de Mrazek. — IV. Calcul des lits de fusion des hauts fourneaux par la méthode de Platz.

Nous avons vu précédemment que le minerai de fer a pour parties constituantes :

- 1° De l'oxyde de fer ;
- 2° Des terres.

Le plus souvent, l'oxyde de fer est mélangé intimement avec une, deux ou trois terres, tantôt avec une terre seulement, tantôt avec deux, quelquefois, mais rarement, avec trois. Ces terres sont la silice, l'alumine et la chaux.

Lorsque, dans un minerai, la silice domine, il est dit siliceux.

Lorsque la silice et l'alumine s'y trouvent abondamment, il reçoit la dénomination d'argileux.

Lorsque c'est la chaux qui accompagne l'oxyde de fer, on le désigne sous le nom de minerai calcaire.

Ces trois terres, prises une à une, sont infusibles.

L'ensemble des terres qui accompagnent une matière métallique s'appelle *gangue*. Il faut que cette gangue fonde dans le travail du haut fourneau, à moins que les matières métalliques se

volatilisent avant la température de fusion de la gangue.

La silice ne fond point à la chaleur la plus grande qu'on soit arrivé à produire dans les hauts fourneaux.

L'alumine reste intacte à la plus haute température que les hommes puissent obtenir dans les usines.

La chaux se calcine à peine, mais résiste à la fusion dans le feu le plus vif auquel les métallurgistes l'exposent. En sorte qu'un minerai de fer composé seulement d'oxyde pur et d'une des trois terres citées plus haut est essentiellement réfractaire, par la raison qu'il est mélangé avec une terre infusible.

Quand on veut l'employer seul dans un haut fourneau, voici ce qui arrive :

Le fer est un excellent vitrificateur. La terre, qui empêche la réduction du minerai, n'ayant point d'autre fondant, se vitrifie à l'aide du fer. De là résulte qu'un minerai qui contient 48 0/0 de fer, par exemple, ne rend, à la fusion, que 28 à 30 0/0 de fonte. En revanche, la scorie ou laitier qui résulte de la terre vitrifiée par le fer, contient jusqu'à 43 0/0 de métal.

Si le minerai contient deux terres et qu'on essaie de le fondre ainsi, il y a une espèce de porcelanisation spongieuse ou compacte de laitier, mais la vitrification n'est pas complète. La scorification ne s'opère encore qu'avec du fer emprunté au minerai. Celui-ci, qui aurait dû donner 48 0/0 de fonte, ne rend pas au delà de 36 0/0; le laitier contient encore de 25 à 30 0/0 de fer,

Enfin, si le minerai contient trois terres, la vitrification s'opère plus ou moins facilement; le verre obtenu coule plus ou moins liquide; et si ces trois terres sont dans de certaines proportions, le laitier est un verre clair, transparent, parfait, semblable au verre des bouteilles; il donne à peine trace de fer, et le minerai, qui contient 48 0/0 de fer, en rend 46 et plus de fonte.

Ces proportions sont :

Chaux.	30
Alumine	45
Silice.	55
	<hr/>
	100

dont la formule atomique est $(\text{Ca O}^3\text{Si O}^3)^2 + (\text{Al}^2\text{O}^3)\text{Si O}^3$, c'est-à-dire un silicate d'alumine uni à un silicate de chaux.

Si la gangue ne fond pas d'elle-même, on ajoute des fondants qu'on choisit de telle sorte que la composition de la scorie produite et sa température de fusion concourent à la bonne marche de l'opération métallurgique que l'on a en vue. Dans certains cas, on se propose seulement, en ajoutant des fondants, d'augmenter la quantité de scorie, lorsque celle-ci a un rôle à remplir dans l'opération elle-même. Le choix des fondants dépend donc non seulement du genre d'opération auquel on les applique, mais aussi et surtout de la composition des matières auxquelles ils sont ajoutés.

A un minerai riche en silice et en aluminium, par exemple, on devra ajouter des fondants calcaires ou magnésiens; c'est le cas le plus courant

qu'on rencontre dans les neuf dixièmes des usines métallurgiques. On y ajoute, dans ce cas, du fondant calcaire, quelquefois de la chaux vive ; on emploie la dolomie dans les pays où elle abonde ou quand on veut introduire dans le laitier une certaine quantité de magnésie.

Le calcaire est très répandu dans la nature et on peut se le procurer à très peu de frais et en quantité considérable dans presque tous les pays. Le rôle qu'il joue dans l'industrie du fer est très grand, puisque le plus grand nombre de minerais, pour être traités, exigent des additions plus ou moins considérables, jusqu'à 40 0/0 de leur poids. La valeur du calcaire est donc un facteur qui entre en ligne de compte pour le prix de revient du métal produit.

Le calcaire pur est un carbonate CaCO_3 se composant de 56 0/0 de chaux et de 44 0/0 d'acide carbonique. Il faut donc employer 178,6 de calcaire si l'on veut ajouter 100 parties de chaux. Le calcaire ajouté à un lit de fusion a pour but de scorifier la silice, par conséquent, il doit lui-même contenir le moins possible de silice. En effet, s'il est siliceux, il renferme moins de chaux, et une partie de cette chaux est neutralisée par sa propre silice et, par conséquent, détournée de son but. Il faut, en outre, s'assurer qu'il ne contient pas de phosphore, comme cela arrive avec les calcaires contenant des fossiles ; on les soumet, par conséquent, à une analyse préalable toutes les fois qu'on doit fabriquer des produits exempts de ce corps.

Un certain nombre de calcaires renferment des pyrites de fer et de cuivre, de la galène, de la

calamine et du gypse ; d'autres sont ferrugineux ; ces derniers, si leur composition le permet, sont employés comme intermédiaires entre les minerais et les fondants.

Le tuf est un calcaire peu propre comme fondant à cause de sa grande teneur en phosphore et de la silice qu'il renferme.

Le marbre est le calcaire le plus propre, le plus riche en chaux et le plus pur qu'on doit préférer toutes les fois qu'on pourra l'avoir à bas prix.

Dans certains pays, on utilise les calcaires oolithiques malgré leur teneur en phosphore ; la craie est plus rarement employée, parce qu'on ne la rencontre qu'en un petit nombre de localités, comme à Douvres, à Rugent, etc., ou encore parce qu'elle est associée à des quartz en rognons et à des bancs argileux. On expédie cependant de Douvres à plusieurs usines anglaises des calcaires du terrain crétacé très purs.

La dolomie est, ainsi que nous l'avons dit, employée dans certains cas particuliers ; c'est un mélange, en proportion variable, de carbonate de chaux et de carbonate de magnésie. La composition moyenne de la dolomie est de :

Chaux.	60
Magnésie	40
	<hr/>
	100

La dolomie est tantôt grenue, tantôt compacte. Certaines variétés renferment souvent de grandes quantités de silice, de la blende, de la pyrite de fer et arsenicale.

Composition de certains calcaires et dolomitiques

Chaux	51.85	52.58	33.64	33.21
Magnésie.	»	1.58	0.70	16.00
Fer	traces	0.51	16.32	0.77
Manganèse.	traces	»	2.82	»
Alumine	»	0.12	0.63	4.70
Silice	2.10	1.17	1.92	2.40
Phosphore	»	»	»	»
Soufre	traces	traces	»	»
Acide carbonique.	40.75	43.06	»	»

Souvent, on remplace en tout ou en partie le calcaire par du spath-fluor, qui a la propriété d'abaisser le point de fusion du laitier. Il peut donc être utilement employé dans certains cas particuliers, mais il ne convient pas de l'employer d'une manière continue parce que son prix est très élevé, et il a, en outre, une action corrosive sur les matières des parois du four.

Certains fers carbonatés spathiques renferment du spath-fluor, ils ont donc la propriété de former des laitiers fusibles et très fluides.

Lorsque, dans un lit de fusion, on se trouve avoir un excès de chaux par suite de l'insuffisance de silice et d'alumine, on ajoute comme fondants des schistes argileux qui fournissent les éléments nécessaires. La composition de ces schistes est la suivante :

Silice.	60
Alumine	19
Proto et sesquioxyde de fer.	8
Chaux et magnésie.	3
Alcalis et acide carbonique.	10
	<hr/> 100

On emploie également des roches telles que le *Gabbro*, la *diabase*, le *granit*, qui fournissent beau-

coup de silice avec peu d'alumine et dont la composition chimique est la suivante :

	Gabbro	Diabase	Granit
Silice	50	50	72
Alumine	15	16	16
Proto et sesquioxyde de fer . .	15	13	2
Magnésie et chaux	10	10	2
Alcalis, etc.	10	11	8

Aujourd'hui, les prix de transport par chemin de fer sont tellement réduits qu'on remplace avantageusement ces additions de matières siliceuses stériles par des minerais à gangue siliceuse, ce qui est beaucoup plus avantageux.

Avec un minerai réfractaire par lui-même, c'est-à-dire contenant seulement une ou deux terres, avec un dosage mal fait, il y a quatre inconvénients à redouter :

1° Il reste trop de silicium dans la fonte, et le fer qui en provient est le plus souvent dur, aigre et cassant à froid ;

2° La fusion des terres, pour s'opérer, emprunte du fer au minerai et diminue d'autant le rendement. Le silicate de fer, étant très fusible, aide à la formation et à la fusion des silicates de chaux et d'alumine ; le laitier devient très ferreux et entraîne souvent assez de fer pour être lui-même considéré comme un minerai de fer riche et traité en conséquence dans le fourneau ;

3° Les combinaisons fusibles se formant avec plus de peine entre matières réfractaires qui manquent de fondant, il est nécessaire de développer une plus grande chaleur pour les fondre, conséquemment d'augmenter la dépense de combustible ;

4° Les terres réfractaires seules complètent leur fusion, non seulement au moyen du fer du minéral, mais encore aux dépens des parois des fourneaux, généralement siliceuses. Cela a lieu surtout pour les minerais calcaires : l'ouvrage forcé de livrer les éléments nécessaires à la silicatisation des terres et à la formation du laitier, s'élargit vite, ne concentre plus assez de chaleur et force à mettre hors.

Ce dernier inconvénient, qui est le plus important, mérite d'être prouvé et les preuves appuyées par des calculs.

Choisissons pour exemple un haut fourneau marchant au coke et allant chercher au loin les minerais qui l'alimentent, et voyons ce qui se passe en se rapportant à la composition des charges et des fondants.

Les matières qui entrent dans chaque charge sont :

Provenance des matières	Poids total	Composition des matières (abstraction faite des substances volatiles)			
		Silice	Chaux	Alu- mine	Peroxyde de fer
Minerais :					
de Villebois . . .	50	15.00	5.00	2.00	17.00
de Bourgogne . . .	50	22.00	0.00	7.25	15.35
des houillères . . .	25	3.07	0.05	0.08	10.45
de Latour	25	0.85	0.08	0.40	10.45
Scories	100	23.25	20.00	0.50	52.50
Castine	75	9.52	29.83	2.94	2.90
Coke	100	12.54	0.04	7.44	2.60
Totaux	425	86.23	55.00	20.61	114.25

La composition du fondant est donc telle qu'il suit :

	Poids total	Sur 100 parties
Silice.	86.23	53.29
Alumine	55.00	12.73
Chaux	20.61	33.98
	<u>161.84</u>	<u>100.00</u>

En prenant pour base la chaux, on devrait avoir :

Silice.	62.29
Alumine	16.99
Chaux	33.98

Il manque, par conséquent, 9 de silice et 4,24 d'alumine.

Les 9 kilogr. de silice qui manquent au fondant pour compléter la charge et pour former le laitier sont empruntés par celui-ci aux parois du fourneau qui sont généralement d'un grès très siliceux. Il en résulte une dégradation intérieure dont on ne se rend bien compte que lorsqu'on est forcé de mettre hors. Voici un calcul approximatif qui permet d'apprécier à peu près l'étendue du mal qui s'opère.

Au bout de vingt-quatre heures, il y aura donc 216 kilogr. de silice que les parois de l'ouvrage et du creuset doivent fournir au laitier. C'est, au bout de six mois, 38,000 à 39,000 kilogr. arrachés aux pierres intérieures du fourneau. Or, comme la pesanteur spécifique des grès qui constituent ces pierres est de 2,80, il en résulte un vide de près de 14 mètres cubes qui s'est formé dans la partie

inférieure de l'ouvrage et à la tuyère. C'est certes plus qu'il n'en faut pour mettre hors.

Le dosage des terres est donc de la plus haute importance. Aucun de ceux qui ont jadis écrit sur le fondage des fourneaux et sur la formation des laitiers ne s'est donné la peine ou n'a été à même d'examiner la question sous toutes ses faces et a glissé trop légèrement sur son importance : M. Walter de Saint-Ange l'a passé sous silence ; M. Flachet a donné des proportions d'une telle marge qu'elles laissent du doute dans l'esprit du praticien ; Karsten, Valérius, Lampadius, Guettier, etc., en reconnaissant la nécessité des fondants, ne donnent aucune règle mathématiquement calculée pour les composer. Presque tous s'accordent à admettre que les laitiers des fourneaux au charbon de bois doivent différer de ceux des fourneaux au coke et que les premiers doivent être des bisilicates, tandis que les seconds sont des silicates simples.

Cette assertion n'a d'exact que l'apparence : il est certain qu'il est nécessaire, dans le calcul des fondants, de faire entrer la forte teneur en silice des cendres du coke, et alors le fondant artificiel en peut contenir moins, ou, ce qui est la même chose, il faut augmenter la dose de chaux en raison de la proportion de silice contenue dans le combustible.

Les cendres du coke sont d'une grande importance et influent beaucoup sur le plus ou moins de liquidité des laitiers et, par conséquent, sur la bonne allure du fourneau.

Un simple calcul servira à faire comprendre

cette remarque. Une tonne de coke bien sec donne assez généralement une moyenne de 96 kilogr. de cendres. C'est, comme on le voit, bien près du dixième. Ces cendres sont composées de :

Silice.	67.830	ou pour cent	70.66
Alumine.	11.360	—	11.83
Magnésie.	5.060	—	5.27
Chaux	5.875	—	6.12
Peroxyde de fer. . . .	5.875	—	6.12
	<u>96.000</u>		<u>100.00</u>

Cette proportion de terre n'est pas sans doute réfractaire à un haut degré; mais elle a deux inconvénients : 1° elle tend à rendre le laitier visqueux et à engorger l'ouvrage; 2° elle donne du soufre à la fonte.

En effet, il manque ici 34 kilogr. de chaux, ou 60 kilogr. de carbonate calcaire pour ôter à ces cendres leur disposition à la viscosité.

D'un autre côté, 5,875 de peroxyde de fer supposent 4,11 de fer pur; lesquels annoncent la présence de 1,17 de soufre à l'état de sous-sulfure.

Il faut donc, de toute façon, ajouter 6 kilogr. de carbonate de chaux pur par chaque quintal métrique de coke jeté dans la cuve du haut fourneau, et même en mettre 7, afin d'avoir un excès pour former un sulfure de calcium et débarrasser la fonte du soufre, qui s'y logerait inévitablement.

Les deux analyses ci-après du laitier sorti de deux hauts fourneaux en bonne allure, l'un marchant au bois, l'autre allant au coke, prouvent que les formules des deux sortes de laitiers doivent être exactement les mêmes :

Silice	49	49.6
Chaux	30	30.0
Alumine	15	15.0
Peroxyde de fer	3	3.0
Oxyde de manganèse	1	0.0
	<u>98</u>	<u>97.6</u>

L'influence du bon dosage des terres se fait même remarquer dans le travail du fer à la mode catalane, qui, comme nous l'avons dit, n'est qu'une production de fonte, décarburée presque aussitôt. Dans les analyses que nous donnerons, à l'article des *scories* d'affinage, on n'a obtenu, dans le même foyer, que 33,11 de fer, à cause du mauvais assortiment du fondant; tandis qu'avec un meilleur dosage, le produit s'est élevé à 54,10.

Examinons un moment d'où peut provenir la supériorité de qualité qu'a, au su de tous les métallurgistes, le fer fait avec de la fonte produite au charbon de bois. Admettons que pour faire 1,000 kilogr. de fonte, il faille 1,200 kilogr. de charbon de bois. Ces 1,200 kilogr. donnent à l'essai :

Carbone	1.137 kilogr.
Cendres	<u>63</u> —
	1.200

laissant de côté quelque élément sans importance.

Or, 63 kilogr. de cendres renferment :

Silice	32 kilogr.
Alumine	13 —
Carbonate de chaux	5 —
Carbonate de magnésie	3 —
Carbonate de potasse	<u>10</u> —
	63

outre un peu de peroxyde de fer et quelquefois des traces de soufre que nous négligeons pour plus de clarté.

Voilà donc 10 kilogr. de carbonate de potasse dans le combustible nécessaire pour faire 1,000 kilogr. de fonte, et l'on sait que cet alcali a la propriété, à un haut degré, de fondre la silice et les autres matières terreuses et de faire avec elles un verre transparent, qui prend une légère couleur verte, s'il entre quelques parcelles de fer dans le mélange, ou violacée, si le minerai contient du manganèse.

Le fer est alors mis à l'état de liberté et exposé à la réaction du carbone, qui le protège contre celle du soufre et en fait un fer de bonne qualité, doux, fibreux, ductile, contenant peut-être un peu de potasse, mais exempt certainement de silice; cette terre donne au fer fait avec de la fonte au coke du corps, c'est-à-dire de la dureté et de la force, mais en même temps de l'aigreur.

Quant aux terres qui accompagnent le carbonate dans les cendres, un seul examen suffit pour voir que l'alumine est en excès. En effet, les proportions données par l'analyse précédente sont :

Silice	kilogr.	32.00
Alumine.	—	13.00
Carbonate de chaux.	—	2.80

tandis qu'elles devraient être pour une parfaite vitrification :

Silice.	47 kilogr.
Alumine.	13 —
Chaux.	24 —

il en résulte donc que pour chaque 1,000 kilogr. de charbon de bois entré dans le fourneau, il faudra ajouter en charge :

Silice	kilogr. 15.00
Chaux	— 21.20

représentés par 37 environ de carbonate de chaux ou pierre calcaire, si l'on veut laisser la potasse agir par elle-même sur les fondants et les terres du minerai.

Telles qu'elles sont cependant, les cendres du charbon de bois présentent d'excellents éléments pour un laitier transparent, léger, n'entraînant point de fer ou fort peu de fer dans sa formation, enlevant le silicium à la fonte et laissant au charbon toute son énergie pour se traduire en un bicarbonate de soufre volatil.

Le laitier qui résulte du traitement du minerai au charbon de bois est un double silicate de chaux et d'alumine qui, lorsque le dosage des fondants est bien fait, contient à peine des traces de fer, et dans lequel l'oxygène de l'acide est juste le double de celui des bases.

L'air chaud influe également sur la fusion des terres, mais il ne faut pas croire qu'il tende à diminuer ou à modifier le dosage des fondants.

C'est une erreur de croire que le minerai fondu par ce procédé avait besoin de moins de terre pour se réduire en fonte. C'est toujours aux dépens du métal que ces heureuses améliorations s'opèrent.

Voici un exemple :
 A la Clyde (Ecosse), où l'air chaud fut d'abord essayé, les charges à vent froid étant de ;

Coke.	250 kilogr.
Minerai	147 —
Castine.	44 —

Avec l'air chaud à 260 degrés, elles furent portées à :

Coke.	250 kilogr.
Minerai.	250 —
Castine.	62.6

En suivant les proportions admises pour l'air froid, la charge de castine aurait dû peser 72^k5; il y avait donc une diminution réelle de 11 kilogr., qu'on considérait comme une économie. L'analyse du laitier donnait :

Silice.	32 kilogr.
Alumine.	10 —
Chaux.	25 —
Magnésie.	2 —
Fer	31 —
	<hr/>
	100

d'où l'on peut conclure que le dosage n'était pas exactement fait, la fusion s'opérant aux dépens du fer, sous l'influence de la haute température de l'air.

I. CALCUL DU LIT DE FUSION

Nous avons dit plus haut que la composition des charges doit être faite avec un grand soin, pour assurer au haut fourneau une marche satisfaisante; il faut former un laitier dont le degré de fusibilité convienne à la nature de la fonte que l'on veut obtenir; donc, il faut mélanger le mine-

rai avec les fondants d'une façon aussi rigoureuse que possible. Un autre point assez important est que le rapport entre le poids de ce laitier et de la fonte produite se maintienne entre certaines limites.

Plusieurs moyens empiriques conduisent à ces résultats, et c'est ainsi qu'on procédait autrefois; on essayait différents lits de fusion, et on s'arrêtait à celui qui convenait le mieux au but qu'on se proposait. Le calcul conduit plus promptement au but et ce calcul porte le nom de calcul stoechiométrique (στοιχειών élément, μέτρον mesure).

II. CALCUL STOECHIMÉTRIQUE

Pour employer cette méthode, il faut avoir une connaissance complète de la composition chimique du laitier qui est le plus favorable à la production de la qualité de la fonte que l'on veut obtenir, étant données la nature du combustible employé et la température à laquelle il faudra porter le vent.

On prend pour base des analyses de laitiers obtenus dans des conditions analogues, et nous avons déjà donné ceux qui conviennent le mieux aux diverses sortes de fontes.

Mais la difficulté d'arriver à obtenir un silicate identique au type choisi est très grande dans la plupart des cas, à cause du grand nombre des corps qui peuvent entrer dans la composition du laitier, et de la nature très variée des lits de fusion avec les minerais et les fondants dont on dispose; dans ces cas, on se contente de chercher une

combinaison qui permette de s'en rapprocher le plus possible dans son degré de fusibilité.

Ce qu'il importe de considérer avant tout, c'est le rapport entre la silice et l'alumine d'une part, et les bases fortes, chaux et magnésie d'autre part; il faut également tenir compte de la proportion entre la chaux et la magnésie, qui a son influence, car nous savons qu'une forte dose de magnésie rend le laitier réfractaire, et qu'une faible quantité, au contraire, augmente la fusibilité.

La quantité de laitier qui se produit par tonne de fonte n'est pas indifférente; en effet, si la proportion en est très forte, la quantité de chaleur dépensée pour le fondre sera plus grande, ce qui se traduit par une plus forte consommation de combustible. Si, au contraire, il se forme peu de laitier, le moindre changement dans l'allure fait varier sa composition, et la marche du fourneau passe vite à l'allure froide. On a remarqué que quand il se forme peu de laitier, il est très difficile d'obtenir des fontes grises, mais il ne faut pas croire pour cela qu'il faut ajouter aux lits de fusion des matières stériles, pour la simple raison de former du laitier.

Voici un exemple d'un haut fourneau donnant très peu de laitier :

Le haut fourneau de Bilbao, marchant avec des minerais de pays et avec un lit de fusion renfermant 47,5 0/0 de fer, et donnant 51,5 0/0 de fonte, donne un laitier dont la proportion à celle de la fonte ne dépasse pas 0,37.

En Styrie et en Carinthie, où l'on fabrique de la fonte blanche avec du minerai facile à réduire et

du charbon de bois comme combustible, cette proportion est de 0,6. Une plus grande proportion amènerait une telle dépense de combustible que la fabrication ne serait pas rémunératrice.

III. MÉTHODE DE MRAZEK

C'est lui qui, le premier, a trouvé une méthode générale pour déterminer aussi rapidement que possible les proportions du mélange.

Cette méthode est très compliquée et pour cela rarement employée ; mais son application est et devient facile quand on établit d'avance les données qui doivent servir de base aux calculs, dans tous les cas qui peuvent se présenter.

Mrazek a admis que les éléments du laitier et surtout la silice et les bases formaient des combinaisons chimiques réelles et que les bases pouvaient se substituer les unes aux autres dans les proportions de leurs équivalents. Partant de ce principe, il analysait exactement les minerais, les fondants et les cendres du combustible et, avec les résultats obtenus, il dressait un tableau semblable à celui que nous donnons ci-après, pages 282-283.

Les cinq premières colonnes contiennent les quantités des divers éléments qui se trouvent dans l'unité de poids des minerais et des fondants et qui doivent passer dans les laitiers. Il ne faut pas cependant oublier qu'une partie de ces éléments peut être réduite et passer dans la fonte comme, par exemple, la silice et le manganèse. Il faut donc en tenir compte ; d'habitude, on admet que la moitié du manganèse passe dans le métal. Pour la

silice, on suppose qu'il y a 2 0/0 dans le métal, ce qui correspond à peu près au vingt-cinquième du poids de fer contenu dans le minerai. Si la fonte obtenue est blanche, on néglige la quantité de silice réduite.

Lorsque la proportion de laitier, par rapport à la fonte, est considérable, on néglige complètement la quantité de silice nécessaire au silicium de la fonte, car le calcul ne tient pas compte de la volatilisation de certains éléments sous forme de chlorures, sulfures, etc., pas plus que de la petite quantité de fer retenue en état d'oxyde dans le laitier. En raison de ces omissions, on est souvent obligé, dans la pratique, de rectifier les chiffres obtenus.

Dans la 6^e colonne sont contenus les totaux des éléments scorifiables, dans la 7^e la quantité de fer qu'on devra augmenter de celle du manganèse si ce métal joue un rôle important dans la composition de la fonte. Ces deux colonnes donnent rapidement la proportion de laitier et de fonte que donnera un mélange déterminé et le rendement en fonte.

Les colonnes suivantes de 8 à 13 indiquent les quantités d'oxygène que renferment les poids des divers éléments qui figurent dans les colonnes 1 à 5. Nous désignons par la lettre B la quantité totale d'oxygène contenu dans les bases et celle de la silice par la lettre S.

Le rapport $\frac{B}{S}$ déterminera le type du silicate obtenu avec le minerai, les fondants et les cendres du coke.

Les colonnes suivantes 14, 15, 16 et 17, qu'on obtient au moyen des précédentes, représentent l'excès d'oxygène sur celui qui est nécessaire pour la formation du silicate choisi et apporté soit par les bases, soit par la silice de chacune des matières premières.

Pour établir le tableau des pages 282-283, on a pris deux types de silicate, le protosilicate et le bisilicate; on aurait pu prendre également un silicate quelconque.

Examinons maintenant les minerais compris dans ce tableau; le minerai oolithique contient, d'après la colonne 12, 0 kg. 0321 d'oxygène venant des bases et 0 kg. 0832 venant de la silice, pour former un protosilicate dans lequel les quantités d'oxygène sont égales de part et d'autre, le minerai contient un excès de cet élément dans la silice $0,0832 - 0,0321 = 0$ kg. 0511; c'est cet excès d'oxygène 0 kg. 0511 qui figure dans la 15^e colonne.

Si c'est un bisilicate que l'on désire avoir, à $0^k 0321$ dans les bases devra correspondre dans la silice $0^k 0642$, l'excès sera $0^k 0642 - 0^k 0321 = 0^k 0190$ qu'on inscrit dans la colonne 17.

En désignant les chiffres de la colonne 12 par B, ceux de la colonne 13 par S, ceux des 14^e et 16^e par β et ceux des 15^e et 17^e par σ , nous aurons pour les divers silicates :

$$\text{Pour un silicate (2/3).} \left\{ \begin{array}{l} \beta = B - \frac{S}{2} \\ \sigma = S - \frac{2B}{3} \end{array} \right.$$

$$\text{Pour un protosilicate (1)} \left\{ \begin{array}{l} \beta = B - S \\ \sigma = S - B \end{array} \right.$$

Maître de forges. — T. I.

16

$$\begin{array}{l}
 \text{Pour un sesquilate (3/2)} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} \beta = B - \frac{2S}{3} \\ \sigma = S - \frac{3B}{2} \end{array} \right. \\
 \text{Pour un bisilate (2)} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} \beta = B - \frac{S}{2} \\ \sigma = S - 2B \end{array} \right. \\
 \text{Pour un silicate (n)} \dots \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} \beta = B - \frac{1}{n} S \\ \sigma = S - n B \end{array} \right.
 \end{array}$$

Dans les colonnes 18, 19, 20 et 21, $\frac{1}{\beta}$ et $\frac{1}{\sigma}$ indiquent la quantité de minerai, de fondant ou de cendres qu'il faut ajouter pour fournir un kilogr. d'oxygène en sus de ce qui est nécessaire pour la constitution du silicate choisi. En effet, si 1 kilogr. de minerai contient β d'oxygène en excès dans les bases pour la formation du silicate donné, $\frac{1}{\beta}$ contiendra un excès d'oxygène de 1 kilogr. ; il en serait de même si cet excès provenait de la silice.

Par exemple, pour la composition d'un protosilicate, le minerai oolithique contient, par unité de poids, 0 kg. 0511 d'oxygène en excès dans la silice, il faudra donc $\frac{1}{0.0511} = 19$ kg. 59 de minerai pour fournir 1 kilogr. d'oxygène en excès ; c'est ce chiffre de 19,59 qui figure dans la colonne 19.

Les chiffres des colonnes 18, 19, 20, 21, désignés sous le nom d'*équivalents stoechiométriques*, indiquent donc les poids des différents minerais,

fondants, etc., qui apportent le même excès d'oxygène pour la formation d'un silicate donné, ce sont donc bien des nombres équivalents; ils montrent par quel poids d'un minerai ou d'un fondant, on peut remplacer tel ou tel autre, avec la certitude d'obtenir un laitier possédant le même degré d'acidité.

Chaque équivalent basique uni au nombre d'équivalents acides qui correspond au type de silicate voulu, produira ce silicate.

Pour obtenir un protosilicate (18 et 19) il faudra unir un équivalent acide et un équivalent basique, pour un bisilicate (20 et 21) un équivalent basique à deux acides, et ainsi pour tous les autres.

Le tableau inséré pages 282-283 montre immédiatement, par exemple, qu'avec le minerai oolithique et le fer spathique on pourrait obtenir un protosilicate sans ajouter de fondant; dans les deux cas le premier fournit l'équivalent acide, le second l'équivalent basique.

S'il s'agit d'un protosilicate, on prendra 19,59 du n° 1 et 12,72 du n° 2, car :

$$\begin{array}{l} 19.59 \times 0.0321 = 0.629 \\ 12.72 \times 0.0845 = 1.075 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 19.59 \\ 12.72 \end{array}} \right\} 1.704 \text{ d'oxygène dans les bases.}$$

$$\begin{array}{l} 19.59 \times 0.0832 = 1.629 \\ 12.72 \times 0.0059 = 0.075 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 19.59 \\ 12.72 \end{array}} \right\} 1.704 \text{ — — la silice.}$$

Pour un bisilicate, on prendra deux équivalents du lias et un de fer spathique :

$$\begin{array}{l} 105.24 \times 0.0321 = 3.378 \\ 12.72 \times 0.0845 = 1.036 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 105.24 \\ 12.72 \end{array}} \right\} 4.414 \text{ d'oxygène dans les bases.}$$

$$\begin{array}{l} 105.24 \times 0.0832 = 8.756 \\ 12.72 \times 0.0059 = 0.072 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} 105.24 \\ 12.72 \end{array}} \right\} 8.828 \text{ — — la silice.}$$

Lorsqu'on connaît la composition chimique de chaque minéral et qu'on en a inscrit les résultats dans le tableau, colonnes 1 à 5, aussitôt qu'on a déterminé, comme nous venons de l'indiquer, la proportion de chacun d'eux que l'on doit employer, il est facile de calculer la composition élémentaire du laitier.

Supposons le cas d'un protosilicate obtenu avec 19,59 kilogr. de minéral n° 1 et 12,72 kilogr. du n° 2, on a :

MnO	{	N° 1.. .	$19.59 \times 0.007 = 0.137$	}	0.429	} 8.001				
		N° 2.. .	$12.72 \times 0.023 = 0.292$							
CaO	{	N° 1.. .	19.59 — —	}	2.022					
		N° 2.. .	$12.72 \times 0.159 = 2.022$							
MgO	{	N° 1.. .	19.59 — —	}	1.081					
		N° 2.. .	$12.72 \times 0.085 = 1.081$							
Al ² O ³	{	N° 1.. .	$19.59 \times 0.065 = 1.273$	}	1.273					
		N° 2.. .	12.72 — —							
SiO ²	{	N° 1.. .	$19.59 \times 0.156 = 3.057$	}	3.196					
		N° 2.. .	$12.72 \times 0.011 = 0.139$							

Ce qui montre que : 19.59 + 12.72 de minerais, soit 32 kgr. 31, produiront 8.001 de matières scori-fiables ou laitier, dont il est facile de calculer la composition en centièmes.

Les chiffres de la 6^e colonne donnent le poids total du laitier, sans sa composition élémentaire :

$$19.59 \times 0.228 + 12.72 \times 0.278 = 8.002$$

La colonne 7 donnera la quantité de fonte produite :

$$\begin{array}{l} \text{N° 1.. . . .} \quad 19.59 \times 0.428 = 8.384 \\ \text{N° 2.. . . .} \quad 12.72 \times 0.226 = 2.874 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{N° 1.. . . .} \\ \text{N° 2.. . . .} \end{array}} \right\} 11.258$$

Donc, 32 kgr. 31 de lit de fusion contiennent 11 kgr. 258 de fer, soit 34.8 0/0 ; comme le fer absorbe du carbone pour constituer la fonte, on aura un rendement d'environ 36 0/0.

Le rapport entre la fonte et le laitier serait en poids :

$$\frac{8.001}{11.258} = 0.7$$

ce qui est convenable pour une bonne allure.

Il faut également tenir compte de la proportion de cendres renfermées dans le combustible. Pour cela on détermine la proportion des cendres que contient le combustible et la composition élémentaire de celles-ci que l'on inscrit sur le tableau. On évalue ensuite la quantité de combustible nécessaire pour traiter 100 kilogr. de lit de fusion ; elle varie entre 30 et 40 kilogr. supposons 35 en moyenne, on en conclut le poids nécessaire pour traiter le lit de fusion et celui des cendres ; on cherche alors, sur le tableau, la quantité de minéral ou de fondant nécessaire pour scorifier ces cendres.

Pour mieux comprendre, reprenons l'exemple du mélange de minerais ci-dessus, et supposons qu'on doit employer du coke à 10 0/0 de cendres. 32 kg. 31 de lit de fusion exigeront à peu près 12 kilogr. de coke qui renfermeront 1 kg. 200 de cendres ; l'équivalent de la cendre est acide et égal à 7,2. Par conséquent 1,2 est le sixième de l'équivalent et exigera pour sa saturation un sixième d'équivalent basique et si on demande celui-ci au minéral spathique n° 2 il faudra ajouter :

Désignation des minerais, des fondants et des cendres	Teneur pour l'unité de									
	Matières passant dans les laitiers						Fer	Oxygène de passant dans		
	Manganèse	Chaux	Magnésie	Alumine	Silice	Totaux		Manganèse	Chaux	Magnésie
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Minerais :										
Oolithique . .	0.007	"	"	0.065	0.156	0.228	0.428	0.001	"	0.0
Spathique . .	0.023	0.159	0.085	"	0.011	0.278	0.226	0.0051	0.0454	0.03
des houillères	0.003	0.012	"	0.010	0.095	0.120	0.403	0.0007	0.0034	0.0
Castine. . . .	"	0.518	"	"	0.021	0.539	"	"	0.148	"
Cendr. du coke	"	0.200	"	0.150	0.500	0.850	0.100	"	0.0571	0.0

Quantité de poids								Equivalent stoechiométrique			
Quantité des matières dans les laitiers				Excès d'oxygène pour former un				Quantités de minerais ou de fondants néces- saires pour avoir un excès de 1 0/0 d'oxy- gène dans le cas d'un			
Magnésie	Alumine	Total pour les bases B	Total pour les acides S	Protosilicate		Bisilicate		Proto- silicate		Bisilicate	
				Oxygène provenant		Oxygène provenant		Proto- silicate		Bisilicate	
				des bases β	des acides σ	des bases β	des acides σ	dans les bases $\frac{1}{\beta}$	dans les acides $\frac{1}{\sigma}$	dans les bases $\frac{1}{\beta}$	dans les acides $\frac{1}{\sigma}$
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0.0305	0.0321	0.0832	0.0832	0.0511	0.019	19.59	56.62				
0.0845	0.0059	0.0786	0.0815	12.72	12.27						
0.0047	0.0088	0.0506	0.0418	0.033	2.32	30.50					
0.148	0.0112	0.1368	0.1424	7.31	7.02						
0.0705	0.1276	0.2664	0.1388	0.0112	7.20	89.28					

$$1/6 \ 12,72 = 2 \text{ kg. } 12$$

et la charge deviendra :

19,59	de minerai n° 1 oolithique
14,84	— n° 2 spathique

Au lieu du minerai n° 2 on peut ajouter du calcaire, dont on trouve l'équivalent, colonne 18 du tableau, égal à 7,31 dont $1/6 = 1,22$. On ajoutera donc 1 kg. 22 de calcaire au lit de fusion.

Les combustibles minéraux renferment du soufre qui passe, pour la plus grande partie, dans le laitier en formant du sulfure calcaire ; on peut se rendre compte de la quantité de soufre contenue comme suit :

Pour 1 kilogr. de soufre il faut 1 kg. 25 de calcium ou 1 kg. 75 de chaux pour former le sulfure et contient 0 kg. 50 d'oxygène. Cette chaux prise au lit de fusion, doit être remplacée, dans le silicate, par une quantité équivalente de base : supposons que les 12 kilogr. de coke nécessaires tiennent 20/0 de soude soit 0 kg. 024, il faudra ajouter au lit de fusion, un corps basique de poids suffisant pour fournir un excès d'oxygène provenant des bases égal à $0,024 \times 0,50 = 0,12$, c'est-à-dire augmenter la proportion de minerai spathique de $0,12 \times 12,72 = 0 \text{ kg. } 15$. Nous avons supposé que la totalité du soufre passait dans le laitier, ce qui ne se réalise jamais ; il est cependant admissible que le minerai lui-même peut en renfermer et il n'en a pas été tenu compte. Cet exemple nous montre que la teneur en soufre n'exige pas un changement bien important du lit de fusion ; c'est

pour cela que dans beaucoup de cas on ne s'en occupe guère.

Les proportions des matières qui entrent dans le mélange étant calculées on en déduit facilement le rapport entre la chaux et la magnésie ; pour le phosphore on admet que tout passe dans la fonte.

Si on mélange plus de deux minerais et fondants on opère de la même manière en suivant la règle suivante :

Le rapport de la somme de tous les équivalents acides, à la somme de tous les équivalents basiques doit être égal à la fraction qui représente le degré de silicate ; si on a à mélanger plusieurs matières basiques et plusieurs autres acides, on les distribuera de manière à former le mélange le plus avantageux en faisant entrer en ligne de compte leurs propriétés particulières. Par exemple, il faut que la proportion d'alumine ne soit pas ni trop forte ni trop faible, le rapport entre la chaux et la magnésie soit convenable, etc. On doit également examiner le rendement du lit de fusion, le poids du laitier par rapport à celui de la fonte, tenir compte également de toutes les matières étrangères apportées par certains minerais et susceptibles d'altérer la qualité du produit. Enfin il ne faut pas négliger la question du prix des minerais et des fondants.

En résumé, lorsqu'on a établi, pour les matières dont on dispose, le tableau stoechiométrique, on peut calculer immédiatement un lit de fusion correspondant à une composition de laitier déterminé ; si avec ces matières on ne peut pas obtenir tel ou tel laitier on le reconnaît facilement et presque

immédiatement ; ce tableau permet, avec la même facilité, d'établir un lit de fusion nouveau ou de modifier celui qui est employé jusque-là, ce qui peut devenir indispensable quand on change de minerai ou quand on veut en introduire un nouveau afin d'augmenter ou diminuer la teneur en telle ou telle substance.

La solution de tous ces problèmes est très facile, car on opère sur des laitiers à composition connue et il ne s'agit que de remplacer une matière par une autre sans modifications sérieuses dans la nature de ces laitiers ; le silicate garde encore le même degré d'acidité, si à un certain poids d'une matière on substitue un poids d'une autre matière dans le même rapport que les équivalents stoechiométriques.

Exemple : 19 kg. 59 de minerai oolithique n° 1 équivalent à 23 kg. 92 de minerai n° 3 pour fournir un protosilicate, si donc le lit de fusion que nous avons renfermé 25 kilogr. du premier on devra lui substituer :

$$\frac{23,92}{19,59} \times 25 = 30 \text{ kg. } 50$$

de minerai de manière n° 3 et le nouveau silicate possédera le même degré d'acidité que le premier ; la proportion d'alumine seule diminuera un peu et si on veut la maintenir, il faudra introduire dans le lit de fusion une matière argileuse, un schiste.

IV. CALCUL DES LITS DE FUSION DES HAUTS FOURNEAUX PAR LA MÉTHODE DE PLATZ

M. Platz a exposé, en janvier 1902, dans le *Stahl und Eisen*, des idées nouvelles devant servir de base à une méthode pour le calcul des lits de fusion. L'auteur y donnait surtout les résultats de ses premières observations. Depuis, la méthode de M. Platz a fait de grands progrès, et elle est adoptée aujourd'hui dans un grand nombre de hauts fourneaux d'Allemagne.

D'après le calcul ordinaire, on se basait sur le rapport de l'oxygène de la silice à l'oxygène des bases, et on admettait que l'alumine pouvait prendre la place d'un poids équivalent de chaux, et inversement.

Dans la pratique cependant, les maîtres fondeurs ont reconnu que les résultats du calcul et de l'analyse devaient être corrigés si l'on voulait obtenir des laitiers répondant aux qualités de fluidité et de fusibilité cherchées. On admettait que les écarts résultaient du trouble apporté par la substitution de la chaux à l'alumine, et inversement; en supposant qu'une partie seulement de l'alumine, la moitié ou le tiers, jouait le rôle d'acide vis-à-vis des autres bases, au même titre que la silice; le restant se comportant vis-à-vis de la silice comme les bases elles-mêmes. Cette supposition était basée sur ce que l'alumine est un oxyde indifférent, qui joue aussi bien le rôle de base, comme dans les sels d'alumine, que le rôle d'acide, comme dans les aluminates. Cette sorte de théorie conduisait

en tout cas à des résultats pratiques, meilleurs qu'en attribuant constamment le rôle d'oxyde basique de la forme M^2O^3 à l'alumine.

M. Wedding énonçait la règle pratique suivante, dans son *Manuel de Sidérurgie* : pour obtenir le laitier qui correspond à la consommation minimum, et l'acidité du laitier restant la même, il faut que la proportion des bases MO aux bases M^2O^3 , c'est-à-dire pratiquement, abstraction faite des alcalis, la somme de MnO, CaO, MgO à la quantité de Al^2O^3 , soit tenue entre des limites parfaitement définies et constantes pour chaque cas déterminé.

Pour tous les cas de la pratique, ces limites sont toujours entre deux à quatre molécules de base MO, pour une molécule de base M^2O^3 , et cette condition peut toujours être réalisée facilement, par un mélange convenable des différentes sortes de minerais.

M. Platz a mis en doute cette sorte de règle, car il lui semblait impossible que l'alumine puisse jouer à la fois, et dans le même laitier, les rôles opposés d'acide et de base. Il a donc fait des essais, pour pouvoir lever le doute, avec des laitiers bien connus, et où Al^2O^3 jouerait soit l'un, soit l'autre des deux rôles qu'on lui attribuait.

Ses recherches en vue de déterminer la relation entre la composition chimique et les propriétés physiques des laitiers ont duré plusieurs années ; elles ont porté sur des laitiers dont les teneurs variaient de 25 à 40 0/0 de SiO^2 , 7 à 17 0/0 de Al^2O^3 , 38 à 58 0/0 de CaO. De toutes ces observations, il a été conduit à considérer l'alumine comme

tin oxyde acide. D'où on peut tirer les règles suivantes :

a) Les propriétés physiques d'un laitier, son apparence et sa structure quand il est solidifié, la façon dont il se comporte quand il est fluide et dénommé laitier court ou long, basique ou acide, ne dépendent pas seulement du rapport entre l'oxygène de la silice et celui des oxydes basiques, elles dépendent aussi du rapport de la somme des bases MO, à la somme de la silice et de l'alumine ;

b) La silice et l'alumine peuvent se remplacer mutuellement en quantité chimiquement équivalente ; au contraire, la chaux et l'alumine ne le peuvent pas ;

c) La composition d'une fonte, en ce qui concerne la teneur en silicium, manganèse, soufre, etc., alors que la charge et la température de la zone de réduction restent les mêmes, dépend de la proportion de chaux renfermée dans le laitier, et non pas du rapport d'oxygène. Donc, pour obtenir une fonte déterminée, on ne peut remplacer la chaux par l'alumine, mais on peut remplacer celle-ci par la silice, et inversement.

Prenons comme exemple les deux laitiers cités par M. J.-B. Nau, dans son étude publiée dans l'Iron-Age, et que nous reproduisons dans le tableau de la page suivante.

Ces deux laitiers proviennent du traitement d'un même minerai dans un même haut fourneau, par conséquent, le rapport de l'oxygène est égal à 1 ; ce sont des silicates simples ; ils ont cependant des propriétés physiques très différentes.

	Teneurs p. 0/0					
	Laitier n° 1			Laitier n° 2		
		Oxygène correspondant			Oxygène correspondant	
SiO ₂	37.1	19.78	)	35.4	18.88)
Al ₂ O ₃	16.7	)	7.83	9.2	)	4.32
CaO	38.5	)	)	47.2))
MgO	1.9	)	)	2.3))
MnO	0.7	)	)	0.4))
FeO	0.4	)	)	0.4))
CaS	4.1	)	)	4.6))
Totaux	99.4	19.78	7.83	11.99	18.88	4.32
				99.5		14.59

Le laitier n° 1 était vitreux, visqueux, s'étirant en fils; solidifié, il était dur et cohérent; le laitier n° 2, au contraire, était d'aspect terreux, granuleux à sa surface, très fluide et ne s'étirant pas en fils. Il se réduisait en poudre fine en se solidifiant.

La fonte obtenue avec le laitier n° 1 contenait plus de silicium et de soufre, mais moins de manganèse que celle correspondant au laitier n° 2. La température du vent et la quantité de coke était la même dans les deux cas; les différences de teneur de la charge en fer et en manganèse étaient insignifiantes.

Ces différences n'ont rien d'étonnant, car on sait depuis longtemps que pour obtenir une fonte riche en silicium et pauvre en manganèse, il faut employer beaucoup d'alumine, et au contraire, il en faut très peu pour obtenir des spiegels.

D'après M. Platz, l'influence de l'alumine, dans ce dernier cas, ne résulte pas précisément de l'alumine elle-même, mais plutôt de la chaux qui se trouve en petite quantité dans le laitier si l'alumine est abondante, et inversement. Il a donc conclu que :

Pour une même quantité de silice, un laitier est d'autant plus long et visqueux, qu'il renferme plus d'alumine. L'alumine ne donne pas la viscosité, mais la chaux l'enlève.

Les variations de la teneur en bases MO peuvent être reconnues par le seul aspect, pourvu que les trois quarts de ces bases soient constituées par de la chaux. Avec un peu d'habitude, on peut ainsi reconnaître une variation de 1 0/0, mais il est im-

possible de reconnaître ainsi séparément les proportions relatives de silice et d'alumine. Leur somme seule peut être appréciée de cette façon par différence, et en tenant compte des sulfures de calcium et alcalins, dont la proportion dépasse rarement 6 0/0.

Pour tirer des conclusions valables de l'examen comparé de deux laitiers, dont l'un est de composition chimique connue, la composition de l'autre étant à déterminer, il faut les refroidir dans les mêmes conditions.

Si en les refroidissant ils tombent en poudre, celui qui donne la poudre la plus fine est celui qui renferme le plus de bases MO, autrement dit la basicité vraie est en rapport étroit avec les propriétés physiques.

La substitution chimiquement équivalente d'un élément à un autre jouant le même rôle, n'est d'ailleurs pas nécessaire pour conserver à la fonte une même composition. La substitution à poids égaux est pratiquement suffisante. Cela tient à ce que $180 = 3\text{SiO}_2$ de silice équivalent chimiquement à un poids à peu près égal à 205, soit : $2\text{Al}_2\text{O}_3$ d'alumine ; les poids moléculaires $56 = \text{CaO}$; $40 = \text{MgO}$; $71 = \text{MnO}$, qui s'équivalent, sont sans doute un peu plus différents, mais comme MgO et MnO sont relativement rares par rapport à la CaO, la substitution à poids égaux de l'un à l'autre revient pratiquement à l'équivalence chimique.

Règle de Platz. — De ce qui précède, il résulte que le problème de l'addition de castine au lit de fusion se résout très simplement. M. Platz pose :

$$P = \frac{\text{Somme des bases M O}}{\text{Somme de silice et d'alumine}} = \frac{A}{B}$$

A et B sont les pourcentages calculés d'après les résultats donnés par l'analyse, et supposés se rapporter à un laitier exempt de sulfure et d'alcalis.

Ainsi, pour le laitier n° 1 cité au tableau précédent, on a :

$$A = \frac{(38,5 + 1,9 + 0,7 + 0,4) \times 100}{100 - (4,1 + 0,6)} = 43,55$$

$$B = \frac{(37,1 + 16,7) \times 100}{100 - (4,1 + 0,6)} = 56,45$$

4,1 représente le sulfure Ca S, et 0,6 les pertes et éléments non dosés, y compris les alcalis, soit :

$$100 - 99,4 = 0,6$$

Comme :

$$(38,5 + 1,9 + 0,7 + 0,4) + (37,1 + 16,7) = 100 - (4,1 + 0,6)$$

il en résulte que :

$$A + B = 100$$

P est une constante caractéristique d'une fonte de composition déterminée, dont la valeur moyenne en bonne marche est :

$$P_m = \frac{52}{48} = 1,083$$

L'analyse du minerai ayant été faite, représentons par leurs formules les teneurs pour cent des divers constituants et posons :

$$y = \text{Si O}^2 + \text{Al}^2 \text{O}^3$$

$$x = \text{Ca O} + \text{Mg O} + \frac{\text{Mn O}}{2}$$

On prend $\frac{\text{Mn O}}{2}$, car le poids moléculaire 71 du manganèse est notablement différent de celui de la chaux $\text{Ca O} = 56$, et de ce qu'une petite quantité de manganèse passe toujours dans la fonte.

L'analyse de la castine étant faite aussi, soit Q sa teneur pour cent en $\text{Co}^3 \text{Ca}$ disponible, c'est-à-dire celle donnée par l'analyse de laquelle on a déduit le carbonate, correspondant à la chaux nécessaire pour fondre la silice, l'alumine et les oxydes de fer qui s'y trouvent à l'état d'impuretés, le poids moléculaire de Ca Co^3 est égal à 100, soit :

$$12 + 40 + (3 \times 16)$$

et celui de la chaux :

$$\text{Ca O} = 56 = 40 + 16$$

Le poids C de la pierre à chaux dont on dispose, qui doit être ajouté à 100 de minerai, est donné par la formule :

$$C = (P_y - x) \frac{\text{Ca Co}^2}{\text{Ca O}} \times \frac{100}{Q}$$

ou :

$$C = (P_y - x) \frac{100}{56} \times \frac{100}{Q}$$

en pratique $Q = 90$ on a alors :

$$\frac{100}{56} \times \frac{100}{90} = \frac{10000}{5040} = 2 \text{ environ}$$

et on a la formule simplifiée :

$$C = 2 (P_y - x)$$

qui est celle de M. Platz,

Exemple. — Soit un minerai de fer dont la gangue présente la composition suivante :

$$\begin{aligned} \text{Si O}_2 &= 9 \\ \text{Al}_2 \text{O}_3 &= 2 \\ \text{Ca O} &= 4,1 \\ \text{Mg O} &= 0,6 \\ \text{Mn O} &= 1 \end{aligned}$$

On a :

$$y = 9 + 2 = 11$$

$$x = 4,1 + 0,6 + \frac{1,0}{2} = 5,2$$

Prenons $P = P_m = 1,083$, on a :

$$C = 2(1,083 \times 11 - 5,2) = 13,426$$

pratiquement, on ajoutera donc 13,5 0/0 de son poids de castine.

M. Platz fait remarquer qu'il faut déduire du pourcentage de silice contenue dans la gangue du minerai la quantité qui correspond au silicium ayant passé dans la fonte; la formule et l'exemple ci-dessus supposent que la fonte n'en renferme pas. Dans les exemples qu'il cite et qui correspondent à des cas réalisés dans la pratique, l'addition de la castine qui a été faite correspond à un chiffre un peu plus bas que celui donné par le calcul d'après sa règle, et cela doit être attribué, sans doute, à ce qu'on a tenu compte du silicium contenu dans la fonte. On doit calculer de la même façon la quantité de castine nécessaire pour faire passer dans le laitier la silice et l'alumine entrant dans la composition du coke employé.

En pratique, cette formule donne des résultats

meilleurs que la méthode de calcul ordinaire, par l'emploi du rapport d'oxygène; les laitiers ainsi obtenus auraient des propriétés se rapprochant beaucoup plus de celles que l'on désire. En prenant les coefficients absolument exacts au lieu de les prendre par des valeurs approchées, elle présente une grande précision et une grande simplicité en supprimant l'emploi de tableaux compliqués.

Les deux méthodes donnent des nombres très différents; la différence est tantôt positive, tantôt négative. Dans le cas de minerais riches en alumine, la méthode ordinaire donne un chiffre trop faible; dans le cas de minerais très siliceux, au contraire, le chiffre est trop fort et le laitier est à peine fusible.

L'aluminium est considéré par Mrazek comme une base, tandis que Platz le prend comme un acide jouant le même rôle que la silice; mais cette divergence n'a pas grande importance, si on se propose seulement de composer un laitier de type donné, c'est-à-dire dans lequel la silice, l'alumine et les bases se trouvent dans des proportions fixées. Toutefois, Blum propose de fixer le degré de silicate d'après la proportion entre la silice et les bases autres que l'alumine, et de faire le calcul d'après la méthode de Platz, en considérant l'alumine comme neutre (*Stahl und Eisen*, 1901, p. 1024).

CHAPITRE V

Des combustibles

SOMMAIRE. — I. Combustibles naturels solides. — II. Comparaison des combustibles solides naturels. — III. Combustibles carbonisés. — IV. Conditions à remplir pour obtenir un bon coke. — V. Combustibles liquides. — VI. Combustibles gazeux. — VII. Gaz résidus. — VIII. Gaz à l'air. — IX. Gazogènes. — X. Condenseurs d'eau. — XI. Décomposition de la vapeur d'eau par le fer ou le charbon en ignition. — XII. Gaz à l'eau carboné. — XIII. Procédés actuels de fabrication. — XIV. Gaz mixte.

Les combustibles sont des substances employées dans la métallurgie pour produire une grande chaleur. La combinaison des corps, leur décomposition, et, en général, tous les phénomènes chimiques qui tendent à les altérer, ne pouvant avoir lieu qu'à une haute température, les combustibles deviennent un sujet d'étude de la plus grande importance pour le maître de forges. Le choix qu'il en peut faire a beaucoup d'influence sur la qualité des produits; mais les circonstances locales, la difficulté et le prix des transports, celui des matières, commandent souvent l'emploi de l'un de préférence à l'autre. Aucun moyen ne doit être alors négligé par le chef d'atelier pour tirer le parti le plus avantageux de celui qui est mis à sa disposition, et c'est par des expériences comparatives, par une connaissance exacte de leur nature

et de leur manière d'être, qu'il peut espérer y parvenir.

L'élément le plus abondant dans les combustibles ordinaires, c'est le carbone, dont l'affinité pour le fer est très grande ; il en facilite la désoxydation à une haute température et forme avec lui la fonte et l'acier. Ainsi le combustible, non seulement sert à élever la température des fourneaux, mais il remplit encore l'office de réactif envers le minerai de fer.

On donne le nom de combustible à tout corps qui dégage en brûlant une quantité de chaleur utilisable ; ainsi le fer, le manganèse, le plomb, le silicium et l'aluminium peuvent être classés parmi les combustibles utilisés en métallurgie, puisque la chaleur dégagée par la combustion de ces corps joue un rôle important dans certains procédés de fabrication, qui sans ce secours ne pourraient être employés avec succès. D'une façon générale, on donne le nom de combustible à tout corps qui n'a pas d'autre emploi que la production de la chaleur.

Les combustibles proprement dits sont tous carbonés et hydrogénés. Le tableau de la page suivante donne la puissance calorifique de certains d'entre eux, et la température maximum qu'on peut obtenir par leur combustion par l'air.

Les métallurgistes divisent les combustibles en deux classes : *les combustibles naturels* et *les combustibles préparés* ou *artificiels*. On entend par combustibles naturels, ceux qui sont employés dans les arts tels qu'ils se rencontrent dans la nature ; on les appelle encore *combustibles crus* ; et par combustibles préparés, ceux qui sont épurés ou

Combustion	Puissance calorifique	Température maximum de combustion par l'air
Hydrogène se transformant en eau liquide.	34462	2736
Hydrogène en vapeur	29512	1500
Carbone en oxyde de carbone	2470	2715
Carbone en acide carbonique	8080	3000
Oxyde de carbone en acide carbonique	2403	1985
Soufre en acide sulfureux gazeux	2240	3850
Phosphore en acide phosphorique	5867	5800
Silicium en silice solide	7830	6450
Aluminium en Al^2O^3	7250	
Fer en oxyde de fer FeO	1219	
Fer en Fe^3O^4	1601	
Fer en Fe^2O^3	1706	
Fer en FeS	424	
Manganèse en MnO	1723	
Manganèse en MnO^2	2114	
Manganèse en MnS	843	
Zinc en ZnO	1314	
Plomb en PbO	243	
Cuivre en CuO	586	

rendus, par une préparation, plus propres aux opérations métallurgiques, on les désigne encore sous le nom de combustibles carbonisés.

La classification des combustibles naturels présente quelques difficultés; elle forme deux grandes sections : les combustibles végétaux et les combustibles minéraux, fondées sur leur manière d'être dans la nature. Les combustibles naturels se présentent sous trois formes différentes, c'est-à-dire ils sont solides, liquides ou gazeux.

I. COMBUSTIBLES NATURELS SOLIDES

Bois

Le bois, dans la signification ordinaire, se compose de racines, de tronc et de branches; sous le rapport métallurgique, ces trois parties se confondent sous le nom de ligneux et se composent essentiellement de cellulose $C^6 H^{10} O^5$, de substances minérales et d'eau.

L'eau favorise la réaction des éléments nutritifs de la plante, dissout les sels terreux nécessaires à la végétation, les porte, par les racines, dans le sein même des plantes, et y pénètre d'autant plus facilement que la viscosité de la dissolution est moins grande.

La quantité de cendres obtenue dans la combustion dépend de la nature du sol; les éléments qui constituent ce sol ont aussi beaucoup d'influence sur la composition des cendres; on y rencontre du carbonate de chaux, des sels alcalins, de la silice, des sulfates et des phosphates. La proportion de phosphore dépasse rarement 2 0/0.

Lorsqu'il est mis dans l'eau, le bois surnage; mais cela tient à l'air qu'il renferme dans ses pores; réduites en poudre fine, les espèces les plus légères ont encore une densité plus grande que le liquide distillé. En employant le procédé de la destruction des pores par la râpe, on a trouvé, pour quelques essences, la pesanteur spécifique suivante :

Hêtre.	1.29
Chêne	1.27
Sapin rouge	1.16
Tilleul	1.13
L'eau distillée étant.	1.00

Dans l'état naturel, cette pesanteur spécifique est loin d'être la même; la densité des principales essences est celle ci-après :

	Coupé récemment	Séché à l'air	Séché fortement
Chêne ordinaire	1.0754	0.7075	0.663
Tige de chêne.	1.0494	0.6777	0.663
Saule.	0.9859	0.4863	0.457
Hêtre.	0.9822	0.5907	0.560
Orme	0.9476	0.5474	0.518
Charme.	0.9452	0.7695	0.691
Pin larix	0.9205	0.4735	0.441
Sapin.	0.9121	0.5502	0.485
Sycomore.	0.9036	0.6592	0.618
Frêne.	0.9036	0.6440	0.619
Bouleau.	0.9012	0.6274	0.598
Frêne de montagne.	0.8993	0.6440	0.552
Sapin.	0.8941	0.5550	0.493
Pin.	0.8699	0.4716	0.434
Cormier sauvage.	0.8633	0.5910	0.549
Noyer.	0.8614	0.5749	»
Aulne.	0.8571	0.5001	0.443
Tilleul.	0.8170	0.4390	0.431
Peuplier noir	0.7795	0.3656	0.346
Tremble.	0.7654	0.4302	0.418

Le foisonnement, qui provient des vides produits par l'arrimage des combustibles en morceaux ou fragments, en augmentant le volume, en diminue la pesanteur spécifique : Le *pinus picea* sec, qui devrait peser 499 kilogr. le stère massif, ne pèse plus, lorsqu'il est arrangé en bûches, que 324 kilogr. ; le hêtre sec pèse massif 807 kilogr., et arrangé en meule 524.

Le tableau suivant donne le poids de quelques espèces de bois séchés à l'air :

	Poids du mètre cube	
	Spécifique	Avec foisonnement
Pin vieux (<i>pinus sylvestris</i>)	604	372
Pin jeune	»	351
Aulne	534	328
Bouleau	608	391
Chêne	»	439
Hêtre vieux	690	435
Charme	796	435

La composition élémentaire du bois est la suivante :

	Avec les cendres	Sans les cendres
Carbone	49.7	50.5
Hydrogène	6 0	6.2
Oxygène	41.3	42.3
Azote	1.1	1.0
Cendres	1.9	0.0
	<u>100.0</u>	<u>100.0</u>

Tous les bois absolument secs ont à peu près la même composition élémentaire, à laquelle il suffit d'ajouter 20 0/0 d'eau pour avoir celle du bois séché à l'air.

MM. Clément et Désormes sont arrivés à cette conclusion que, pour des poids égaux, tous les bois ont la même valeur calorifique. Ce résultat est parfaitement d'accord avec les analyses chimiques suivantes :

	Carbone	Hydrogène	Oxygène
Ligneux pur . . .	52.65	5.25	42.10
Chêne	49.43	6.07	44.50
Frêne	49.36	6.07	44.57
Erable	49.80	6.37	43.89
Hêtre	48.53	6.30	45.17
Bouleau blanc . .	48.60	6.37	45.02
Orme	50.19	6.42	43.39
Peuplier noir . .	49.70	6.31	43.99
Tilleul d'Europe .	49.41	6.86	43.73
Saule fragile . .	48.44	6.36	44.80
Sapin du Nord . .	49.95	6.41	43.65
Pinus picea . . .	49.59	6.38	44.02
Pinus sylvestris .	49.94	6.25	43.81
Pinus larix . . .	50.11	6.31	43.58

Le tableau suivant donne la composition de cinq essences différentes, d'après M. Regnault :

	Hêtre	Chêne	Bouleau	Tremble	Saule
Carbone	49.46	49.58	50.29	49.26	49.93
Hydrogène	5.96	5.78	6.23	6.18	6.07
Oxygène	42.36	41.38	41.02	41.74	39.38
Azote	1.22	1.23	1.43	0.96	0.95
Cendres	1.00	2.03	1.03	1.86	3.67
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Ces analyses sont faites avec du bois provenant du tronc de l'arbre; celles suivantes ont eu lieu sur du bois de branchage :

	Hêtre	Chêne	Bouleau	Tremble	Saule
Carbone	50.37	50.08	51.29	49.59	51.39
Hydrogène . . .	6.21	6.14	6.17	6.20	6.18
Oxygène	41.14	41.38	40.41	40.23	36.45
Azote	0.78	0.95	0.87	1.00	1.41
Cendres	1.50	1.45	1.26	2.98	4.57
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

La quantité d'eau varie avec la nature du bois ; elle diminue lorsque le bois abattu reste exposé à l'air. Le tableau suivant donne la proportion moyenne d'eau contenue dans les diverses essences de bois arrivés à maturité au moment de l'abattage :

Charme	18.6
Saule	26.0
Sycomore	27.0
Frêne de montagne	28.3
Frêne	28.7
Bouleau	30.0
Chêne	34.7
Sapin du Nord	37.1
Marronnier d'Inde	38.2
Pin	39.7
Hêtre	39.7
Aulne	41.6
Peuplier	43.7
Orme	44.5
Pin dur	45.2
Tilleul	47.1
Peuplier d'Italie	48.2
Larix	48.6
Peuplier blanc	50.6
Peuplier noir	51.8

Dans le bois le plus jeune, la proportion d'eau peut s'élever à 60 0/0. Si on laisse le bois refendu

exposé longtemps à l'air, deux ans au moins, dans un endroit sec et aéré, la proportion d'eau s'abaisse peu à peu jusqu'à 20 0/0 et même, pour certaines essences, jusqu'à 17 0/0. On ne peut pousser plus loin la dessiccation qu'en soumettant le bois à une température comprise entre 125 et 150 degrés. Le bois absolument sec est un mélange de cellulose, de cendres et du résidu de la sève, lequel contient de l'azote. Si on élève la température au delà de 150°, le bois commence à se décomposer, et si on le chauffe à l'abri de l'air jusqu'au rouge naissant, il se transforme en charbon, dont le poids est d'environ le quart de celui du bois.

Plus le bois est sec et plus son pouvoir calorifique est élevé, c'est-à-dire qu'un poids donné de bois dégagera, en brûlant, un nombre de calories d'autant plus grand qu'il contiendra moins d'eau; un kilogramme de bois bien sec dégage, par la combustion, 3,800 calories, tandis que simplement séché à l'air et contenant 20 0/0 d'eau il ne fournit que 2,900 calories. Le pouvoir calorifique des corps combustibles se détermine par diverses méthodes. Berthier l'obtenait en faisant réduire au combustible à étudier une certaine quantité d'oxyde de plomb; Dulong le calculait en partant de l'analyse élémentaire du combustible; Berthelot le brûle doucement par l'oxygène pur dans un calorimètre, après l'avoir enfermé dans un vase en platine. Cette dernière méthode est la seule qui soit exacte, mais l'appareil employé par Berthelot est d'un prix trop élevé pour être à la portée des laboratoires d'usines. M. Mahler a modifié cet

appareil, qui ne permettait de soumettre à l'expérience que de petites quantités de matières; il a remplacé le vase en platine par une bombe en acier émaillée à l'intérieur, d'une capacité beaucoup plus grande; tout laboratoire d'usine peut aujourd'hui étudier la valeur des combustibles qui lui sont présentés.

Tableau du pouvoir calorifique de certains bois

	Bois	
	Marchand	Séché
Pin vieux.	2646 cal.	3274 cal.
Pin jeune.	2320	3057
Aulne	2461	2986
Bouleau	2384	2813
Chêne	2268	2948
Hêtre vieux.	2172	2967
Hêtre jeune.	2236	2723
Charme	2320	2743

On a essayé d'employer le bois vert dans les hauts fourneaux; mais ces essais, qui pouvaient produire de graves accidents, n'ont donné, comme on devait bien s'y attendre, aucun résultat notable. La carbonisation s'opérait dans la cuve même et devait donner de l'irrégularité à la descente des charges. Cependant, on a remarqué que dans le haut fourneau de *Corbançon* (Indre), soumis à ce régime, des morceaux de tremble, après avoir parcouru toute la hauteur du fourneau, sont arrivés à la tympe sans que leur forme fût altérée. En 1839, le haut fourneau de *Saint-Georges* (Haute-Saône) marchait uniquement au bois vert. Il employait, pour 100 kilogr. de fonte, 300 kilogr.

de mine et un stère et demi de bois; à *Roche, Mouchy* et la *Grâce-de-Dieu* (Doubs), on a porté aux deux tiers du volume le total de la charge en bois vert, qu'on avait soin de prendre dans les essences les plus dures.

Les résultats obtenus par l'addition du bois en nature au charbon de bois ont été vivement contestés, et ont été bien différents. Cela est dû sans doute au plus ou moins de fusibilité des minerais, à la bonne composition des fondants et à diverses autres causes.

Tandis qu'à Gondrecourt (Haute-Saône), on constatait que le bois mélangé par moitié, en volume, avec le charbon, ne modifiait point l'allure du fourneau d'une manière désavantageuse; qu'à Massevaux (Haut-Rhin), le même mélange de combustible donnait un rendement régulier et satisfaisant en fonte grise de moulage, et permettait d'employer un cinquième de scories en volume, et de diminuer la castine à mesure que la proportion de bois vert augmentait; que dans la Haute-Saône, à Breurey, Le Magny, Trécourt, Estravaux, Baigne, Velleuxon, on portait la proportion de bois vert aux deux tiers de la totalité du combustible; à Rainville, on trouvait que les avantages économiques étaient balancés par la mauvaise qualité des fers obtenus des fontes produites; dans quelques fourneaux du Jura, où on employait deux tiers de bois en nature, la production journalière était diminuée; dans la Haute-Saône, les laitiers devenaient ferrugineux, les coulées peu abondantes. Néanmoins, dans ces dernières circonstances, la température paraissait

très élevée, la fonte devenait entièrement noire, il se produisait une telle quantité d'écailles de graphite, que les laitiers en étaient comme empâtés et ne pouvaient être extraits du fourneau qu'à coups de ringard.

En résumé, l'introduction d'une grande masse de bois dans le fourneau donne une économie de 15 0/0 environ; mais l'allure est moins régulière; dans quelques fourneaux, l'économie a été balancée par une diminution de production journalière et de rendement du minerai. Il est vrai qu'on n'avait rien changé aux dimensions des fourneaux à charbon. Il y avait diminution de température dans les parties supérieures, ce qui a commandé l'emploi de l'air chaud.

La réussite a été moins problématique dans les feux d'affinerie.

A *Oberbruck* (Haut-Rhin), on est parvenu à remplacer la moitié du charbon par un volume égal de bois en nature, coupé en bûchettes de 0^m15 de longueur. La production journalière a été portée de trois à quatre, et on a pu affiner avec facilité et amélioration des fontes obtenues au vent chaud; l'emploi de ce combustible dans les foyers d'affinerie de la Haute-Saône, où il a été employé par moitié avec le charbon, a parfaitement réussi; à *Nyby*, près Thorsallå, à proximité du lac Halar, en Suède, on puddle et on rechauffe le fer brut au moyen de la combustion du bois parfaitement sec, abattu depuis deux ans et réduit en petites bûchettes de 32 centimètres de long sur 6 à 7 centimètres d'épaisseur.

On a calculé qu'un stère de bois vert donne, à

peu de chose près, un stère de ligneux ou bois desséché en volume ; tandis que la perte en poids était de 27 0/0.

De tout ce qui précède, on peut tirer les deux conséquences suivantes :

1° Si le combustible végétal est destiné à produire de la flamme, à brûler, par exemple, dans les fours à réverbère, il est indispensable, pour obtenir tout l'effet utile, d'en chasser l'eau hygrométrique, et de le *réduire en ligneux* ;

2° S'il doit produire une haute température, sans développement de flamme, comme dans les fourneaux de fusion du fer, il faut le ramener à un moindre volume et le *réduire en charbon*.

Dessiccation et torréfaction du bois

Les bois ont d'autant moins de valeur calorifique en métallurgie qu'ils contiennent plus d'eau : la vapeur, pour se produire, emprunte aux milieux environnants une partie de leur chaleur et abaisse par conséquent leur température :

Le ligneux pur dégage . .	1.700°	centigr.	de chaleur.
S'il contient 40 0/0 d'eau.	1.380°	—	—
Et à 82 —	1.120°	—	—

Or, la fusion de la fonte se tenant entre 1,200 et 1,400 degrés, on voit quel peu de ressource offre dans la métallurgie du fer le bois vert fraîchement coupé. Il faut donc, pour obtenir de ce combustible tout l'effet utile qu'il peut donner, en expulser préalablement l'eau hygrométrique qu'il contient. La quantité existante dans le bois varie selon les circonstances de leur position : au mo-

ment de l'abatage, elle s'élève parfois jusqu'à 80 0/0 du ligneux pur.

La dessiccation à couvert et à la température ordinaire est loin d'être suffisante : nous avons déjà dit qu'après six ou huit mois de séjour à l'abri, le bois contenait encore quelquefois 40 0/0 d'eau. Il faut donc avoir recours à la chaleur, en chauffant le bois un peu au-dessus de 100° C. ; on opère de plusieurs manières.

Autrefois on a essayé de dessécher le bois en forêt, et surtout dans la Haute-Marne. Pour cela, on renfermait le bois dans des enveloppes en tôle ou en fonte, lutées avec de la terre grasse et chauffées à l'extérieur avec des branchages du même bois et des résidus de peu de valeur. Ce procédé ne pouvait réussir qu'à la condition d'une cuisson prolongée et d'une dépense considérable ; il ne tarda pas à être abandonné.

Dans les Ardennes, aux usines de *Chéhéry* et d'*Aprémont*, le desséchage du bois s'opérait en meules et en forêt. Les meules contenaient trente stères de bois et étaient établies de la manière ordinaire.

En avant de la meule et sur une grille disposée à cet effet, on brûle du même bois et on entretient la combustion à l'aide d'un ventilateur, qui lance, en même temps, les gaz dans la meule. La consommation du même bois n'est guère que la dixième partie du bois mis en meule. L'opération dure de vingt-quatre à trente heures et rend en poids 65 à 70 0/0.

Dans la Haute-Saône, le moyen employé consistait à faire traverser le bois, coupé en petites bil-

lettes, par des gaz sortant du haut fourneau, qui, comme nous le verrons plus loin, développent beaucoup de chaleur et surtout dépouillés d'oxygène libre. Un procédé analogue a été suivi à l'usine d'Abesse (Landes).

Une cisaille a été établie près de la machine soufflante et en reçoit le mouvement. Le bois qui est porté sur le tablier y est coupé en petites bûchettes régulières, d'une longueur de 0^m 15 environ. Au-dessus du gueulard est placée une petite cheminée en briques que traversent les gaz sortant du haut fourneau. Cette cheminée a 1^m 50 de hauteur totale ; à 50 centimètres de la plate-forme du gueulard, et dans le vide intérieur de la cheminée, on a placé une grille carrée qui remplit exactement ce vide, mais qui n'est fixée aux parois que par un axe sur lequel elle peut basculer, afin de passer de la position horizontale dans celle verticale. Ce quart de rotation s'opère à l'aide d'une manivelle qui ressort à l'extérieur. A 50 centimètres au-dessus de cette première grille, s'en trouve une deuxième, placée de la même manière et dans les mêmes conditions ; en sorte que toute la hauteur de la cheminée est divisée par ces deux grilles en trois parties parfaitement égales.

La grille supérieure étant horizontale, on y jette par le haut de la cheminée, une charge de bois vert, qu'on y laisse séjourner pendant deux heures ; on donne ensuite un tour à la manivelle ; la première grille devient verticale, et le bois, en partie desséché, tombe sur la seconde grille, qui se trouve, elle aussi, placée horizontalement. Là, le bois desséché se torréfie pendant deux heures encore,

tandis qu'une nouvelle charge a été mise sur la première grille.

Après ces deux opérations, le bois tombe dans le fourneau, ayant perdu environ la moitié de son poids.

Le combustible cuit ainsi obtenu, est nommé *bois torréfié*. Si la cuisson est poussée un peu plus loin, on obtient ce qu'on appelle du *charbon roux*.

Aujourd'hui, les différentes méthodes employées pour la dessiccation du bois se ramènent à deux principes, qui sont les suivants :

Le premier principe consiste à mettre en contact direct avec le bois les gaz provenant du foyer où se produit la chaleur nécessaire à l'opération, qui porte le combustible brut à une température supérieure à 100 degrés centigrades. L'eau hygrométrique est ainsi vaporisée, et cette vaporisation est encore favorisée par la tendance qu'ont les gaz eux-mêmes à se saturer de vapeur. Cette torréfaction a lieu dans une chambre rectangulaire en maçonnerie, partagée en deux étages par une grille horizontale, au-dessus de laquelle se charge le bois vert, et au-dessous de laquelle se préparent les gaz brûlés, élevés à une température insuffisante pour provoquer la carbonisation.

Ce principe a été appliqué en grand aux forges de *Lippitzbach*, sur la Drave inférieure, en Carinthie; on y charge à la fois 108 stères de bois. La torréfaction dure au moins deux jours et demi en été, et au plus six jours en hiver. La perte est en général de 33 0/0.

Dans le second principe, les gaz ne sont point en contact immédiat avec le bois; ils passent à

travers la chambre à ligneux, voûtée en maçonnerie, au moyen de tuyaux en fonte ou en tôle.

La chaleur n'agit ici que par rayonnement, et les gaz, après avoir cédé au bois une partie de leur chaleur sensible, se rendent à une cheminée et se perdent dans l'air. Ce mode de torréfaction est adopté aux forges de Neuberg, où la charge est de 48 stères de bois; la durée du feu varie entre quarante et soixante heures, et le prix de revient est de 16 fr. 95 par tonne de ligneux.

Il ne faut pas perdre de vue qu'en laissant exposé à l'air, à la température ordinaire, du bois séché artificiellement, on est certain qu'il absorbera de l'eau et reviendra peu à peu à ce qu'il était après un simple séchage à l'air; par conséquent, si l'on veut utiliser les propriétés du bois desséché à 150 degrés centigrades, il faut le consommer immédiatement, ce qui a conduit à créer les appareils de dessiccation et de torréfaction à proximité du lieu d'emploi de ce bois torréfié.

Tourbe

La tourbe est le produit de la décomposition de certaines espèces de plantes, sous l'action simultanée de l'air et de l'eau; il s'en forme constamment, même à l'époque actuelle.

On donne le nom de *tourbières* à des terrains compacts, humides, recouverts d'une légère couche de gazon, et formés de feuilles ou de menus branchages en putréfaction, dont la décomposition peu avancée répand une odeur désagréable. Ces couches foliacées se rencontrent à une faible profondeur; elles sont quelquefois recouvertes d'un plancher

de sable de moins d'un mètre. Les tourbières se rencontrent principalement dans la zone tempérée, tantôt en vallées, tantôt sur les hauteurs. Les terrains tourbeux sont le plus souvent marécageux ; ils résonnent sous le pas, forment comme un plancher élastique, et sont quelquefois, et dans certains endroits si délayés, qu'il y a du danger à s'y hasarder à cheval.

Indépendamment de l'élasticité et du résonnement qui indiquent, presque à coup sûr, l'existence des tourbières, on peut s'assurer qu'il existe de la tourbe sous un gazon, en y enfonçant un pieu ou un instrument quelconque : les couches qui se trouvent au-dessous de la première couche végétale sont détrempées, molles, et n'opposent qu'une faible résistance.

Cependant, on trouve des couches de tourbe dans des terrains parfaitement secs, mais dont l'origine alluvienne n'est pas douteuse.

Dans le Guadalaxara, près Madrid, il se trouve, dans un terrain sablonneux, deux couches de tourbe superposées l'une à l'autre et séparées par un banc de sable. Cette formation curieuse, qui, quoique appartenant à une autre époque, offre beaucoup d'analogie avec le mode de dépôts par couches successives des houilles, se distingue par la nature des plantes, dont les détritiques forment une foule de petits filaments serrés, entrelacés et cimentés par de l'argile. La qualité de ce combustible est d'ailleurs fort inférieure.

Sur le versant de certaines montagnes, il n'est pas rare de trouver des couches de tourbe de couleur pâle, formées de la décomposition des mousses,

auxquelles sont parfois associées les feuilles qui tombent des arbres. Ce combustible est intermédiaire entre les couches compactes des marais et celles légères et poreuses des alluvions sèches. La tourbe de montagne est quelquefois assez compacte pour qu'on puisse la carboniser; elle est brun noirâtre, à tissu terreux, au milieu duquel on distingue de petites racines très fines. Lorsqu'on la comprime, elle devient assez fine pour prendre des empreintes délicates.

Carbonisée à l'air, elle jette beaucoup de fumée, une flamme longue et une odeur désagréable de plantes brûlées. Son charbon est léger, boursoufflé, fendillé, plus noir que la tourbe et prenant une légère teinte bleuâtre.

Comme on le voit, la tourbe est un combustible extrêmement varié dans sa texture et sa composition; c'est pour cela que personne n'a pu, jusqu'à présent, en donner une classification raisonnable. Lorsqu'elle est due à la décomposition des feuilles, elle est plus serrée, plus compacte et plus pesante; si elle est produite par l'accumulation de mousses et de graminées, elle devient spongieuse et légère; des débris de végétaux peu altérés, entrelacés dans la masse, lui donnent un aspect fibreux, réticulé, et une pesanteur spécifique moins grande encore.

La France, l'Angleterre, l'Allemagne, la Russie et la Scandinavie possèdent des gisements importants de tourbe, qu'on utilise comme combustible industriel.

L'extraction de la tourbe se fait tantôt à bras, tantôt au moyen de machines.

Dans le premier cas, si elle se présente avec une

consistance suffisante, on la divise en briquettes prismatiques, au moyen d'outils appropriés, dits *louchets*, puis on fait sécher ces briquettes à l'air libre sur une aire ou en piles, à travers desquelles on assure une facile circulation d'air; on désigne cette tourbe sous le nom de *tourbe découpée*. On augmente la consistance de la tourbe en asséchant au préalable les tourbières; si, pour une raison quelconque, on ne peut donner à cette matière, du premier coup, la forme de briquettes, on l'extrait de la tourbière comme de la terre, puis on la malaxe dans une fosse en la piétinant et en la battant, on la transforme en briquettes moulées comme de l'argile à briques et on la fait sécher, on obtient ainsi la *tourbe moulée*. Cette sorte d'extraction peut avoir la variante suivante. Après l'opération de malaxage et de mélange, on l'étend sur le sol pour qu'elle acquière de la consistance par séchage, puis on la foule, on la bat, on la découpe en morceaux réguliers et on termine le séchage en empilant les morceaux comme on le fait pour les briquettes; c'est la tourbe désignée en Allemagne sous le nom de *Backtorf* ou *Breitorf*.

L'extraction et la préparation de la tourbe non consistante coûte de 15 à 20 0/0 de plus que celle de briquettes coupées au louchet, mais la matière est plus dense et plus résistante.

Les machines employées pour l'extraction de la tourbe sont de deux sortes. Les premières ne font que l'extraction, tandis que les secondes, les plus récentes, hachent les fibres et mélangent les divers éléments; quelquefois même elles font subir au mélange une préparation mécanique qui sépare

les matières inorganiques, puis elles lui donnent une forme régulière sous une pression convenable.

D'autres délayent la tourbe broyée dans l'eau; dans ce cas, la pâte obtenue est répandue sur des surfaces de séchage et découpée quand elle a acquis la consistance nécessaire. La tourbe obtenue dans le premier cas est désignée sous le nom de *tourbe pressée*, et celle obtenue dans le second cas, porte le nom de *tourbe broyée à la machine*.

La tourbe extraite par les machines diffère de celle qu'on extrait à bras par une plus grande homogénéité, elle est plus résistante et peut supporter le transport sans donner lieu à un aussi grand déchet. La tourbe pressée a l'avantage d'être plus dense, elle se comporte mieux pendant le transport, elle occupe moins de volume, elle est moins hygrométrique.

La composition des tourbes est loin d'être la même pour toutes les localités, ainsi qu'il est facile de se l'imaginer. Plusieurs savants ont fait des analyses, et les chiffres qu'ils ont donnés s'écartent beaucoup les uns des autres. Ainsi, Mushet n'a trouvé que 15 0/0 de carbone et 12 0/0 de cendres, tandis que Marcher a trouvé 65 0/0 de carbone et 13 0/0 de cendres; M. Berthier a analysé les tourbes de Crouy-sur-Ourcq de différentes qualités, et il a trouvé :

	Tourbe noire	Tourbe compacte	Tourbe mousseuse
Carbone.	23.7	21.5	23.2
Cendres.	11.5	18.8	12.0
Matières volatiles. .	64.8	59.7	64.8
	<hr/> 100.0	<hr/> 100.0	<hr/> 100.0

18.

La pesanteur spécifique des tourbes varie avec leur tissu plutôt qu'avec leur composition. La densité absolue de ce combustible doit d'ailleurs être avec soin distinguée de son poids marchand, qui se complique des vides intérieurs laissés par les pores et du foisonnement résultant de l'arrangement mécanique en meules ou en monceaux. Nous appellerons l'une pesanteur théorique, et l'autre pesanteur industrielle.

	Pesanteur d'un mètre cube	
	Théorique	Industrielle
Tourbe légère et mousseuse . . .	»	241 kgr.
— moins mousseuse	»	307 »
— mixte	549	291 »
— charbonneuse, compacte, brune	695	362 »
— métallurgiq., compacte, noire et dure	725	362 »

La valeur calorifique des tourbes n'est point en raison de leur pesanteur; la nature de leur tissu et leur structure intérieure influent beaucoup sur les résultats, surtout d'après la méthode adoptée pour déduire les conséquences en calories. Voici quelques données en calories :

	Tourbe	
	Marchande	Séchée
Légère et mousseuse . . .	2198	3255 cal.
Mixte	2172	3057 »
Charbonneuse, brune . . .	1935	3274 »
Métallurgique, noire . . .	2012	3204 »

Ces résultats sont pratiques, et les chiffres qui les représentent peuvent être nommés *calories*

industrielles. Ils résultent d'expériences faites par le docteur Brix, qui a trouvé qu'un kilogramme de tourbe contenant de 8 à 10 0/0 de cendres et 25 0/0 d'eau, appliqué à la production de la vapeur, vaporise autant d'eau que 1 kilogr. 200 gr. de bois; si donc on admet que le bois développe par sa combustion 2900 calories, la tourbe atteindra 3500 calories.

La tourbe est toujours chargée d'une grande quantité d'eau. La tourbe fraîchement extraite peut contenir jusqu'à 80 0/0 d'eau; celle qui a été séchée à l'air en retient de 25 à 30 0/0, qui occasionnent pour leur vaporisation, une perte de chaleur considérable dans le fourneau où le combustible est employé brut. On a, en conséquence, proposé de comprimer fortement la tourbe pour lui enlever son humidité, réduire la matière carbonneuse à un moindre volume et de la dessécher rapidement. Séchée à 100 degrés, elle perd presque complètement son eau, mais dès qu'elle est exposée à l'air libre elle en reprend une égale quantité.

Quand on veut obtenir des hautes températures avec de la tourbe pour des opérations métallurgiques, il faut absolument lui enlever son eau hygrométrique par une dessiccation à l'air libre ou en chambres closes et chauffées. La dessiccation en chambres closes a l'avantage de gagner du temps et du terrain, mais elle enlève à la tourbe son alcali qui disparaît avec l'eau dans laquelle il est en dissolution.

Quelques-unes des tourbes peuvent être carbonisées et sont éminemment propres au traitement du fer, soit dans la production de la fonte, soit

dans l'affinage du métal; elles ne rongent point les chaudières de fer, comme le fait la houille, et les sels alcalins qu'elles contiennent donnent de la qualité aux métaux; elles sont très propres à la génération de la vapeur dans les machines.

Du lignite

Les feuilles et les plantes herbacées ont fourni la tourbe; les troncs et les branches ont donné naissance au lignite. Ce combustible est formé de débris végétaux de l'époque tertiaire; de tous les combustibles minéraux proprement dits, c'est celui dont la formation est la plus récente. Nous comprenons sous cette dénomination les bois altérés, fossiles ou bitumineux, qui se convertissent en braise et donnent à la distillation des produits analogues à ceux du bois.

Le lignite est un combustible plus ou moins compact, d'une couleur brune ou noirâtre, d'une pesanteur spécifique de 1,2 à 1,4, ayant parfois le tissu du bois, parfois se rapprochant de la houille; brûlant avec ou sans flamme, et répandant généralement à la combustion, une odeur balsamique, bitumineuse ou fétide. Certains lignites ont de la ressemblance avec certaines houilles, mais il y a entre la série des bois les plus altérés et la houille la plus récente, une ligne de démarcation qui en fera toujours deux espèces distinctes.

La houille s'est déposée dans une formation ancienne, avec des terrains secondaires inférieurs, à une époque où, grâce à une atmosphère très riche en carbone, et à une chaleur intense, des plantes bitumineuses énormes se développaient sur

la surface du globe. La houille commence en partant de la profondeur, au moment où le bitume disparaît, et finit où le lignite commence.

Celui-ci appartient aux terrains tertiaires et fait rarement irruption dans ceux secondaires, où prend naissance la série des houilles. Les bois qui le composent végétaient encore après la période houillère, quand l'atmosphère bitumineuse commençait à perdre son carbone.

La houille est due aux plantes herbacées riches en bitume; le lignite au ligneux des arbres qui leur avaient succédé. La chaleur centrale a ensuite fait remonter le bitume des couches de houille à celles de lignite. Ce qui distingue les lignites les plus modernes, c'est la présence de l'acide acétique, l'acide du bois; ce qui fait reconnaître les lignites les plus anciens, comme les houilles les plus modernes, c'est la présence du bitume. Mais ce qui surtout leur donne un caractère tranché, c'est la structure, la forme moléculaire, la pâte.

On rencontre parfois des réunions de bois altérés qui présentent une grande étendue : des forêts entières se sont abîmées; leurs arbres ont été inclinés, submergés sous des influences qui paraissent tenir à de grandes causes. On donne à ces vastes débris le nom de *forêts sous-marines*. Quelquefois elles sont assez bien conservées : on y retrouve le bois entier avec ses alcalis; dans d'autres circonstances, la décomposition est plus avancée. Cependant, on connaît des forêts submergées dont la destruction remonte à des époques antérieures aux temps historiques.

Ces bois fossiles appartiennent aux parties supé-

rieures du terrain tertiaire, aux terrains de sédiment qui ont recouvert nos continents en dernier lieu. Les arbres renversés, les bouleaux, les ifs, les chênes, les noix de coco, sont facilement reconnaissables dans les forêts souterraines ou sous-marines. L'île de Chatou, près Saint-Germain, est presque entièrement composée de bois fossiles et de troncs d'arbres peu altérés; ce combustible existe à Vitry en couches puissantes. Un particulier de cette ville en avait fait bâtir une maison pendant la Révolution. Dans l'Ariège, il est pénétré de carbonate de chaux; à Bovey, dans le Devonshire, on trouve des couches de bois fossile et bitumineux qui offrent toutes les nuances du passage de la fibre végétale au *surtubrand* ou charbon de pierre de ce pays.

Au-dessus des alluvions modernes, on rencontre encore de temps en temps des bois purement altérés; mais les parties inférieures des terrains tertiaires appartiennent presque exclusivement au lignite; quelquefois des branches isolées ont été entraînées avec les matières sableuses ou les argiles de transport; quelquefois, des parties ont été broyées et réagglutinées en amas plus ou moins solides. Les couches de lignite y sont généralement séparées les unes des autres par des lits de matière sableuse, argileuse, quelquefois, mais rarement, mélangée de bitume. On y reconnaît, de temps en temps, le tissu organique du bois; on y trouve des branches, des tronçons de dicotylédons, des coquilles d'eau douce, des animaux mammifères, des mastodontes, des rongeurs, etc.

La série des lignites, en partant de haut en bas,

commence aux bois altérés, pour ne finir qu'à la houille; elle se prolonge dans tous les étages de la période secondaire, à commencer du grès houiller, où le lignite a une telle apparence de la houille, qu'on ne peut souvent le reconnaître qu'à l'aide de sa braise qui ne ressemble nullement au coke, et à sa poussière beaucoup moins noire.

Les oxydes de fer contenus dans le tissu ligneux ont suivi les plantes dans leur destruction et se trouvent encore dans les lignites supérieurs à l'état de carbonates. A la longue et à mesure que la minéralisation avance, le fer perd son acide carbonique, se sature de soufre et se transforme en pyrite, lorsqu'il se trouve en contact ou même dans le simple voisinage de corps organisés à l'état de décomposition.

Dans les terrains secondaires, à l'étage correspondant au terrain jurassique, le lignite a quelquefois acquis une grande compacité; son grain est tellement fin qu'il est susceptible de poli; on peut le tailler, le sculpter, le graver. C'est le *jayet*. Il brûle alors avec une flamme vive, allongée, propre aux fours à réverbère, auxquels il peut être employé dans les contrées où il est abondant. Dans le cas contraire, il n'est guère en usage que pour la fabrication des boutons et de certains ornements.

Il existe enfin une sorte de lignite bitumineux, que beaucoup d'industriels confondent avec la houille et qui, cependant, appartient à l'étage le plus moderne de terrains secondaires. Ce lignite se nomme *stipite*; il n'est pas dû, comme le charbon de terre, à des plantes herbacées bitumineuses,

mais bien à des arbres qui, après leur destruction, ont été pénétrés par le bitume de la formation tertiaire, dite *asphaltique*. Aussi le coke en est-il fritté, braisiforme et tout à fait différent de celui fourni par la houille. Ce combustible, le meilleur de tous les lignites, est celui qui procure le plus de chaleur dans un temps donné et présente la flamme la plus allongée.

Quoique la série des lignites forme une chaîne continue, sans solution, depuis le bois altéré jusqu'au stipite, on peut cependant faire cinq variétés appartenant à cette espèce de combustible : 1° le bois fossile; 2° le lignite à carbonate de fer; 3° le lignite pyriteux; 4° le jayet; et 5° le stipite.

Avant de passer en revue ces cinq variétés, qui sont susceptibles d'être employées à des usages très divers, il est bon de rappeler ici que les combustibles offrent, industriellement parlant, deux phénomènes distincts et importants : la chaleur produite est généralement en raison de la teneur du combustible en carbone; l'inflammabilité est en proportion de ses substances volatiles. Dans les combustibles minéraux, ces deux éléments de la combustion sont modifiés par la présence des terres en plus ou moins grande quantité. Cela posé, passons à l'examen de nos cinq variétés de lignite.

Bois fossile. — Le bois fossile diffère du bois vivant par une moindre quantité de matières volatiles. Il est donc moins inflammable, et son inflammabilité diminue à mesure qu'il s'altère davantage.

D'un autre côté, la présence de terres, tout en

lui donnant plus de compacité, lui laisse moins de carbone sous un même poids. C'est, par conséquent, un combustible inférieur au bois sous tous les rapports, et offrant peu de ressource dans l'industrie : il peut néanmoins être employé dans des chauffages domestiques et dans quelques usines qui exigent une chaleur modérée, lente et graduée, mais jamais un coup de feu violent.

Lignite à carbonate de fer. — Le lignite à carbonate de fer n'est pas non plus un combustible très calorifique; mais il renferme un élément qui peut être très utilement mis à profit dans la réduction des sulfures métalliques, tels que la galène, dont le soufre doit être dérivé par le fer ou un de ses oxydes.

Lignite pyriteux. — Le lignite pyriteux n'est guère propre qu'au chauffage et à la production de l'acide sulfurique. La grande quantité d'acide sulfureux qu'il dégage ne permet guère de l'employer dans les usages domestiques, ni de le placer sous des chaudières en fer, qu'il attaque facilement et qu'il perce en peu de temps avec l'aide de la chaleur. Il est inutile d'ajouter que cette sorte de combustible est tout à fait impropre à la production de la fonte ou du fer.

Ce lignite se rencontre principalement dans les terrains de grès bigarré; il a la structure tout à fait ligneuse; sa couleur est brune, quelquefois verdâtre; il est pénétré de pyrites de fer blanches, qui s'y rencontrent sous forme d'amas et même de veinules. Ce sont évidemment des troncs d'arbres qui ont passé à l'état de lignite, et qui sont encore en train de se décomposer; il n'est pas rare de

trouver dans la même branche des parties entièrement carbonisées, ayant toute l'apparence du charbon de bois, tandis qu'à côté le tissu est devenu compact, grenu, rougeâtre, chargé d'oxyde de fer ou de sulfure de ce métal. Les marnes calcaires, qui avoisinent généralement cette singulière minéralisation, sont blanches et très feuilletées; elles portent la trace des eaux qui les ont déposées et qui n'étaient évidemment que de petits filets coulant légèrement et par mille contours. Ces marnes contiennent un grand nombre de morceaux de charbon de bois de 1, 2, 3 centimètres et plus de longueur; leur tissu ligneux, leur sonorité, leur couleur et leur manière de se comporter au feu ne laissent aucun doute sur leur origine. Les morceaux sont empâtés par la marne dans tous les sens, et ne sont pas couchés suivant une même direction, ni un même plan. Lorsqu'on retire ce lignite du contact de l'air, il se recouvre de petites cristallisations aciculaires et bacillaires, limpides, légèrement blanchâtres et bleuâtres; c'est du sulfate de fer dû à la décomposition de la pyrite : quelquefois même le soufre se montre à la surface sous forme de petites efflorescences jaunes.

Lignite jayet. — Le lignite jayet est d'un très beau noir; sa cassure est conchoïde, vitreuse, grasse, très luisante, anguleuse; il se laisse rayer par le fer; sa rayure est brunâtre, couleur de charbon roux; il donne au feu une odeur tout à fait distincte de la houille, dont il diffère par sa compacité. Quelquefois cette odeur est balsamique et assez agréable, surtout dans les variétés les

plus compactes; le plus souvent, elle est âcre et fétide. Sa flamme est longue, jaunâtre, jetant beaucoup de fumée.

Le lignite jayet est exempt de pyrite de fer; cela est dû à sa compacité, à son tissu homogène et serré, et souvent à la présence du bitume, qui se manifeste lorsqu'on brûle le combustible, en formant des bulles à la surface et bouillant à la manière des liquides; il donne au lignite brûlé l'apparence d'un coke boursoufflé; mais, comme il n'existe que de loin en loin dans le tissu, il a peu d'influence sur le résultat général de la carbonisation.

Le principal caractère du lignite c'est la carbonisation; elle donne un résultat semblable à la braise, feuilleté, fritté et de peu de valeur calorique.

Lorsque le lignite ne dévoile pas son origine végétale dans sa texture, à la température ordinaire, il la manifeste à la chaleur d'un fourneau. Cette structure écailleuse, semi-chatoyante et filamenteuse, qui est le propre du charbon végétal, il la possède à un degré éminent; il jouit même souvent de la sonorité, lorsque sa braise a été faite avec soin. Certains lignites, qui ont toutes les qualités du jayet, ont conservé assez le tissu ligneux pour qu'il ne soit pas possible de les confondre avec certaines houilles, telles que celle des terrains pœciliens. Ils sont compacts comme le véritable jayet, mais l'éclat gras ou vitreux à la cassure manque généralement. Au feu, ils donnent une braise terreuse, jaunâtre, qui laisse, après la combustion, un résidu considérable de cendres.

Lignite stipite. — Le stipite se trouve dans le grès de l'assise inférieure de la formation poestlienne; c'est une sorte de houille flambante, en couches de un à deux mètres de puissance; c'est elle qui marque assez généralement la limite d'un bassin houiller véritable, dont les derniers dépôts combustibles sont venus se perdre au milieu des grès bigarrés et des arkoses de cet âge.

Le stipite présente une structure très stratifiée, formée alternativement de strates brillantes, noires, compactes, de peu d'épaisseur, et de strates ternes, noires et terreuses, également peu puissantes. La strate brillante donne un coke fritté et change légèrement de forme en brûlant; celle terne se fendille et ne donne aucune apparence de coke.

Comme ces feuillets alternatifs n'excèdent guère un décimètre d'épaisseur chacun, il en résulte que ce combustible ne peut être considéré dans les arts que comme une houille maigre à longue flamme, et ne peut être employé qu'aux mêmes usages métallurgiques.

Le plus souvent le stipite a l'apparence de la houille flambante, il est formé de petites couches parallèles, tantôt brillantes, tantôt terreuses; il participe des qualités du lignite et de la houille; du lignite, par son odeur, son gisement, son peu d'abondance et les pyrites de fer qui presque toujours l'accompagnent; de la houille, par sa propriété bitumineuse qui lui donne, au feu, une flamme allongée blanchâtre, et sa facilité de se coaguler en un coke fritté.

L'aspect gras et ligniteux de certaine variété et

l'odeur moitié bitumineuse, moitié acide qu'elle donne en brûlant, indiquent le passage du lignite à la houille. Le terrain dans lequel on le trouve, et qui est bien postérieur à la formation houillère, ne laisse aucun doute à cet égard.

A Las Rozas, près de Reynosa, dans la Vieille-Castille, il existe une double couche assez puissante de stipite, qui offre tous les caractères du combustible que nous venons de décrire; elle est dans une arkose micacée blanchâtre, dont les couches sont inclinées de 45° environ. Ce gisement, au milieu d'un terrain éminemment triasique, est la limite orientale de la bande houillère qui a été rejetée sur le versant méridional des Pyrénées, et qui longe ce versant de l'Est à l'Ouest, faisant des apparitions à Aguilar, Cervera, Savero et Otero, dans une ligne parallèle à l'axe du grand soulèvement.

Dans tous les autres points où se montre la houille, depuis la province de Toro jusqu'à la Galicie, les roches carbonifères sont parfaitement caractérisées, et la houille est grasse, compacte et suivie. Près de Reynosa, commence la fusion des terrains : la formation secondaire inférieure est démembrée et disparaît; le terrain psamméthyrique occupe seul les vallées et les collines que lui abandonne le calcaire silurien de soulèvement.

La teneur en carbone des lignites paraît augmenter en raison de leur ancienneté et de leur profondeur dans le sein de la terre. Les analyses suivantes donnent une idée de leur composition depuis le bois fossile jusqu'au stipite :

	Bois fossile de Brühl près Cologne	Lignite de Dax	Jayet d'Uttweiler	Stipite de Las Rozas
Carbone	54.97	70.49	77.40	81.32
Matières volatiles.	30.78	24.52	21.90	17.68
Cendres	14.25	4.99	1.00	1.00
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

Les cendres des lignites ne contiennent aucune trace d'alcali ; elles sont, en général, composées de silice, alumine, oxyde de fer, sulfate de chaux, chaux et magnésie, dans des proportions dont la différence doit être attribuée, sans doute, aux circonstances locales sous l'influence desquelles s'opéra le dépôt des matières dans les gîtes naturels de ces combustibles.

Quelques variétés réussiraient probablement fort bien dans le travail du fer. Elles n'ont pas été essayées, quoique à première vue elles semblent devoir présenter des avantages assez importants.

De la houille

De tous les combustibles employés dans la métallurgie, celui qui joue le plus beau rôle, c'est, sans contredit, *la houille*. Son abondance, sa facile extraction, la modicité de son prix, l'ont placée au premier rang, quant à sa valeur domestique ; son inflammabilité, sa teneur en carbone, sa valeur calorifique, lui accordent une des premières places dans l'économie industrielle.

La houille apparaît dans l'écorce du globe immédiatement au-dessous des terrains de lignite, avec lequel elle se confond quelquefois. Le lignite donnait de l'acide acétique à la distillation ; on n'en

retrouve dans la houille qu'avec les variétés qui se rapprochent le plus du bois fossile. En général, les substances que donne le premier, sont : carbone, terre et acide; celles données par la houille, sont : carbone, bitume et terre. L'ammoniaque manifeste sa présence dans les deux espèces.

Non seulement les différentes variétés de houille, depuis la plus bitumineuse jusqu'à la plus terreuse, passent de l'une à l'autre d'une manière insensible, quant à leur composition interne; mais il est encore bien difficile de les distinguer par leurs caractères extérieurs et empiriques. Le terrain sur lequel reposent les terrains houillers n'a aucune influence sur la qualité du combustible; car si la houille maréchale grasse de Saint-Etienne a pour base le micaschiste et le gneiss, celle de la même qualité des environs d'Olloniego, en Asturies, repose sur le calcaire silurien. Le micaschiste et le gneiss, d'ailleurs, servent de charpente pour ainsi dire à la houille sèche de Prades et de Jaujac, dans l'Ardèche. Le calcaire silurien, d'un autre côté, soutient également et la houille maigre de Binon et celle grasse de Torazo, en Espagne.

La couleur n'est pas non plus un caractère absolu : la plupart des houilles anglaises et françaises sont d'un beau noir, tandis que celle de Saverro, en Castille, est presque grise. L'aspect gras, vitreux ou mat; la texture prismatique, grenue, lamelliforme; la cassure conchoïde, compacte, schisteuse, n'indiquent point, d'une façon certaine, les qualités du combustible. Cependant, l'éclat plus ou moins brillant, plus ou moins métalloïde, est le signe d'une houille moins bitumi-

neuse. Le bitume donne un aspect plutôt gras que métallique, plutôt mat que brillant. Il existe des houilles maigres lamelliformes, qui se confondent au premier abord avec des houilles grasses à coke. Les premières ont un éclat un peu plus vitreux ; les secondes sont un peu plus noires : on rencontre souvent dans celles-là, malgré leur texture généralement compacte, quelques fragments de texture ligneuse, non concordants et qui font angle souvent avec les joints de stratification.

Cette houille maigre, exposée à la bougie, ne fuse point comme le font les houilles fortement bitumineuses ; elle se boursoufle à peine en petits mamelons superficiels et donne une flamme de peu de durée.

La houille grasse et qui donne du coke est souvent difficile à distinguer de la houille simplement flambante ; elle possède comme elle l'éclat résineux dans sa cassure, mais elle est moins brillante et plus grasse ; l'aspect gras est d'ailleurs plus uniformément répandu et n'alterne pas avec l'aspect terne, comme il arrive souvent dans les houilles flambantes ; elle affecte aussi un peu moins la forme prismatique, mais elle n'est pas non plus exempte d'efflorescences sulfuro-ferrugineuses.

La couleur, la forme extérieure et le tissu de la houille flambante sont variables ; le plus souvent elle est noire, d'un éclat vitreux, se divisant en espèces de cubes ; son tissu est fibreux avec des alternances ternes et grasses.

La houille lamellaire n'est pas parfaitement noire ; elle est composée d'une multitude de petites lamelles qui présentent divers aspects, suivant le

sens de la cassure. Ces lamelles sont quelquefois tellement petites, que vues dans le sens de leur surface, elles offrent une texture soyeuse, chatoyante, qui a quelques rapports avec certains plombs sulfurés, lesquels tiennent le milieu entre la variété grenue et la variété lamineuse. Vu dans la section, le tissu est tout à fait fibreux, allongé, capillaire, ressemblant à une certaine variété de sulfure d'antimoine. Dans un autre sens, c'est une pâte grenue, à grains très fins, légèrement spongieuse : cette variété donne un coke brillant, argentin, léger et souvent ramiforme.

La houille grasse à coke se présente sous plusieurs aspects : en faisant abstraction de la couleur, elle a quelquefois l'aspect de la galène à larges facettes polies ; elle est d'un noir brillant, à cassure conchoïde, inégale ou grenue. Elle est, dans ce cas, assez friable, tache les doigts et se ternit momentanément sous l'haleine. Cette variété a souvent le tissu lamelleux, comme stratifié, rarement d'un éclat mat et terne. Quelquefois on y remarque une empreinte semblable à celle que donnerait une plante coupée dans sa section d'une manière nette et tranchée ; parfois elle est coupée en plans de stratification par une matière blanchâtre, magnésienne ou calcaire, rarement colorée par la pyrite de fer.

Il existe une espèce de houille grasse appartenant aux terrains calcaires carbonifères, et dont les couches reposent immédiatement sur le calcaire silurien. Cette houille est d'un gris foncé, grenue, non prismatique, assez pesante, ayant de petits filets de carbonate blanc de chaux qui circulent

dans son tissu. A sa surface, cette variété de houille présente une quantité de petites veines calcaires, blanchâtres, et ressemble assez, quant à la structure, au fer hydraté cloisonné. La houille paraît s'être déposée dans les petites cavités à un état de liquidité très grande; elle y forme des noyaux d'un noir intense, vitreux, dont la couleur contraste singulièrement avec le calcaire. Quelquefois elle semble déposée en couches de peu d'épaisseur, séparées par le carbonate blanc, et même par du sulfure de fer. Cette houille se boursoufle au feu et donne un coke gris noir, lourd, dont les cendres contiennent beaucoup de chaux et quelque peu de fer, ce qui procure aux échantillons de coke la faculté attractive. Le carbonate de fer gris foncé s'y rencontre ordinairement en rognons, en assez grande abondance.

La houille sèche a un éclat métallique assez prononcé; elle est beaucoup moins noire que les houilles maigre, grasse et flambante; sa texture est quelquefois grenue, souvent fibreuse ou écailleuse; elle affecte rarement la forme prismatique; elle tache peu les doigts. Quelquefois l'éclat métallique alterne avec l'aspect terne et mat.

Il est presque impossible de distinguer les unes des autres, les différentes qualités de houille, par l'examen de leurs caractères extérieurs. L'essai au feu ou mieux l'analyse chimique, est le seul moyen de reconnaître les différentes qualités de houille, qui passent de l'une à l'autre, sans donner une marque de la limite où commence et finit chaque variété.

Si l'on veut classer les houilles d'après leur

manière de se comporter dans les usages auxquels on les applique et l'effet le plus immédiat qu'elles produisent, on aura les compositions suivantes :

	A coke	Flambante	Maigre	Sèche
Carbone	82.72	81.81	85.01	90.11
Matières volatiles.	13.60	15.11	12.46	7.53
Cendres.	3.68	3.08	2.53	2.36
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

A proprement parler, il n'y aurait que trois sortes de houille : *la houille grasse, la houille maigre et la houille sèche.*

La houille grasse serait divisée en trois variétés : *la houille grasse dure, la houille maréchale, la houille grasse à longue flamme.*

La houille grasse dure se distingue par son coke boursoufflé, compact, très propre aux opérations du haut fourneau.

La houille maréchale donne un coke encore plus boursoufflé; elle est très propre à la forge, en ce qu'en se coagulant avec facilité, elle permet à l'ouvrier de bien en envelopper le fer et de former voûte au-dessus.

La houille à longue flamme produit un coke moins boursoufflé; elle est très propre au puddlage et au gaz d'éclairage.

La houille maigre, que M. Regnault a nommée houille sèche à longue flamme, est la limite où le coke cesse d'être boursoufflé; il est fritté. Sa flamme est assez longue et propre à la chaudière.

La houille sèche, que M. Regnault et divers autres savants confondent avec l'anhracite, n'a

plus qu'une flamme très courte et ne donne qu'un coke fritté. Elle est propre à la cuisson de la pierre à chaux et du plâtre. Les Anglais s'en servent avantageusement dans les hauts fourneaux du pays de Galles.

La houille sèche, appartient aux terrains secondaires inférieurs; l'anhracite au terrain de transition : la première se trouve dans le grès houiller ancien, ou dans les dernières assises du calcaire carbonifère; le second est dans le schiste argileux de transition ou dans les quartzites du terrain cambrien : la houille sèche est noire, sans éclat métalloïde et tache les doigts; l'anhracite est d'un gris métallique prononcé, et ne laisse point de traces sur les mains; l'anhracite pétille et décrépité au feu; la houille sèche brûle sans bruit comme les autres combustibles. Il y a donc toute raison pour séparer théoriquement et pratiquement la houille de l'anhracite.

La composition de la houille est variable et analogue à la suivante, trouvée sur les échantillons provenant de Rive-de-Gier, Entrevernes et Champany :

	Houille grasse	Houille maigre	Houille sèche
Carbone	62.00	47.80	59.20
Matières volatiles.	41.00	39.50	2.00
Oxyde de fer	2.20	6.90	14.70
Silice.	1.50	0.00	7.60
Chaux.	0.00	5.10	0.00
Pyrite accidentelle.	0.00	0.00	2.16
	<hr/> 106.70	<hr/> 99.30	<hr/> 85.66

On calcule ordinairement la valeur calorifique des houilles, et, en général, des combustibles en

unités de chaleur. On a proposé plusieurs méthodes pour évaluer les pouvoirs calorifiques en unités de chaleur, dites *calories*, mais elles sont en général fondées sur des données théoriques qui manquent d'exactitude, ne donnent que des à peu près, et dont les résultats sont loin d'être industriels et pratiques.

Dans l'un de ces procédés, on admet que le pouvoir calorifique d'un combustible est proportionnel à son pouvoir réducteur. On sait que les oxydes métalliques, mis au milieu d'un combustible, cèdent tout leur oxygène à ce combustible et se réduisent en métal à l'état de pureté. La quantité de métal obtenue en poids, dans un temps donné, est proportionnelle à la valeur calorifique du combustible.

Ce procédé est inexact et sujet à des erreurs : le temps donné doit être très court, attendu que la rapidité de l'oxydation dépend de la teneur en carbone dans un volume et dans un poids fixés ; on opère ordinairement sur de la litharge, ou oxyde de plomb réduit en poudre ; or, le plus ou moins de finesse de cette poudre influe sur la rapidité de l'action du carbone ; enfin, il faut avoir une certaine habitude de l'essai au creuset pour bien réunir toutes les parcelles de plomb obtenues, qui sont assez généralement disséminées dans diverses parties du vase.

Le calcul fondé sur la composition du combustible, quoique également sujet à quelques inexactitudes, a sur celui de la réduction l'avantage de n'exiger aucun travail manuel, et peut se faire facilement sur le papier et dans le cabinet ; il

admet d'abord que le pouvoir calorifique du combustible est égal à celui de son carbone ajouté à celui de l'hydrogène, excédant la quantité nécessaire pour former de l'eau avec l'oxygène donné par l'analyse. Ce principe, assez contestable, est ainsi appliqué :

Prenons pour exemple la houille de Blanzzy, qui est composée, abstraction faite des cendres, de :

Carbone.	77.19	
Oxygène.	17.46	} 19.61
Hydrogène pour l'eau.	2.15	
Hydrogène excédant.		3.20
		<hr/> 100.00

Or, la valeur calorifique du carbone étant de 7800 calories, et celle de l'hydrogène de 22125, on a, en réduisant la composition à l'unité :

$$\begin{aligned}
 0.7719 \times 7800 &= 6020.82 \\
 0.0320 \times 22125 &= 708.00 \\
 \text{Total. . . .} & \underline{6728.82} \text{ calories.}
 \end{aligned}$$

Voilà pour le calcul théorique, En industrie, ce n'est point sur le carbone absolu trouvé dans l'analyse qu'il faut calculer, mais bien sur le coke fourni dans le travail pratique. D'après cela, la houille de Blanzzy donnant 67 0/0 de coke, il convient de ramener les calculs ci-dessus à ceux qui suivent :

$$\begin{aligned}
 0.67 \times 7800 &= 5226 \\
 0.032 \times 22125 &= 708 \\
 \text{Total. . . .} & \underline{5934} \text{ calories.}
 \end{aligned}$$

La quantité de chaleur développée par les houilles varie beaucoup pour les différents pays et les différentes exploitations d'une même région. Il résulte d'un grand nombre d'essais faits sur des houilles très diverses, que le pouvoir calorifique de chaque variété peut être exprimé en calories industrielles par les chiffres suivants :

		Calories pour les houilles	
		Marchande	Séchée
Houille	Raffaud, de Rive-de-Gier . .	4563	»
—	de la Ricamarie, à gaz . . .	3595	»
—	Anglaise	4845	4905
—	de Prusse, anthraciteuse . .	5152	5171
—	— grasse	4902	4934
—	de Silésie	4538	4740
—	— supérieure	4259	4442
—	de Saarbruck, ordinaire . .	4802	4962
—	d'Eschweiler, grasse	5667	5716
—	d'Aix-la-Chapelle, anthraci- teuse	4348	4405
—	de Westphalie, anthraci- teuse	4133	4204
—	de Westphalie, grasse . . .	5193	5287
—	d'Amérique	4748	»
—	de Commentry	5636	»
—	de Bezenet	4927	»
—	de Newcastle	5123	»

La pesanteur spécifique des houilles est variable et dépend de la composition. Il est facile de concevoir qu'elle augmente depuis la houille la plus grasse jusqu'à celle la plus maigre, c'est-à-dire depuis la houille la plus bitumineuse jusqu'à celle la plus chargée de carbone. Voici un tableau qui en donne une idée :

Houille de Mons	1.276
— de Newcastle	1.280
— de Rive-de-Gier	1.288
— Cannel-Coal	1.317
— Commentry	1.319
— Alais	1.322
— Rolduc	1.343
— Pays de Galles	1.348
— Blanzv	1.362
— Noroy	1.410

Lorsque la houille est réduite en fragments, l'effet des vides qui produisent ce qu'on appelle le foisonnement, est tel qu'un hectolitre, dont le poids est, d'après les données ci-dessus, de 133 kg. en moyenne, se réduit à moins de 85 kilogram.

Voici le poids commercial d'un hectolitre de quelques houilles françaises :

Bezenet	76 à 78 kg.
Commentry	78 à 79 —
Les Ferrières	78 à 79 —
Le Creusot	79 à 80 —
Decize	82 à 83 —
Saint-Etienne	83 à 84.5
La Taupe	85 à 86 —
Anzin	85 à 86 —
La Combelle	86 à 87 —
La Barthe	88 à 89 —

On distingue commercialement les houilles en : *Gaillette*, ou *gailleterie*, composée de gros fragments ;

Gailleton, ou *gailletin*, à morceaux plus restreints ;

Tête de moineau, à morceaux de la grosseur d'une noix ;

Menus, poussières plus ou moins fins.

Enfin, on désigne sous le nom de *tout-venant*, la houille telle qu'elle sort de la mine avec une proportion minimum de gaillette qui peut varier du $\frac{1}{3}$ au $\frac{1}{4}$ du poids total.

Les houilles se rencontrent en France dans une cinquantaine de bassins distincts, qui se développent chaque jour davantage. Les plus importants sont ceux du Nord et du Pas-de-Calais, de la Loire, de la Bourgogne et du Nivernais, du Gard, du Tarn et de l'Aveyron, enfin du Bourbonnais. On y trouve toutes les qualités de houille, mais les houilles maigres et sèches y entrent pour un chiffre important, surtout dans les Alpes et l'Ouest.

De l'anhracite

Nous avons dit que beaucoup de savants confondent l'anhracite avec la houille sèche, et qu'en histoire naturelle il y avait plusieurs raisons pour les séparer. En industrie, un seul caractère en fait également deux combustibles distincts : c'est la *décrépitation*.

L'anhracite est un minéral d'un gris plus ou moins foncé, ordinairement à éclat métallique, tachant rarement les doigts, d'une certaine compacité, d'un poids généralement plus fort que les autres combustibles, difficilement inflammable, décrépitant au feu et donnant, dans sa combustion, une chaleur très intense. Il est de tous les combustibles minéraux, le plus riche en carbone et le plus pauvre en matières volatiles. Ces dernières sont uniquement l'eau hygrométrique, qui est la cause de la décrépitation.

Diverses analyses de l'anhracite ont donné les résultats suivants :

	La Mure	Pays de Galles	Mandres	Vizille	Clos- Chevalier
Carbone . .	88.54	91.29	91.30	94.40	97.25
Matières vo- latiles . .	9.89	7.13	2.70	3.70	0.00
Cendres. . .	1.57	1.58	6.00	1.90	2.75
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

La densité de l'anhracite s'élève de 1,48 à 2,00, ce qui donne 1400 à 2000 kilogr. le mètre cube ou 140 à 200 kilogr. l'hectolitre théorique, c'est-à-dire en masse compacte, tel qu'il est dans le sein de la terre. En industrie, et avec la mesure en fragments, cet hectolitre ne pèse plus que 95 à 102 kilogr. en moyenne.

L'anhracite appartient aux étages inférieurs des terrains carbonifères; il pénètre même dans les terrains métamorphiques, si voisins des terrains ignés. C'est là que soumis à une énorme chaleur, il a perdu son bitume par distillation et est devenu, ainsi que la houille sèche, un véritable coke naturel. L'anhracite de Pensylvanie se trouve dans le schiste argileux de cette formation; celui de l'entrée des Asturiès, en Espagne, est dans le quartzite du terrain cambien. A la Mure, c'est l'étage inférieur du terrain jurassique qui le recèle; mais, en général, dans le département de l'Isère, les couches d'anhracite, dont la puissance varie entre 5 et 16 mètres, sont encaissées dans un grès qui repose directement sur le terrain schisteux. Il est probable que ce grès ne soit pas contemporain du calcaire à Belemnites avec lequel il alterne

quelquefois et qui appartient à la formation moyenne du liais. Les empreintes végétales qu'on trouve dans le grès anthracifère ont une grande analogie avec celles du grès houiller, tandis que les plantes du liais en diffèrent essentiellement.

En Angleterre, l'anhracite, ou *glanz-coal*, se trouve dans les terrains de gneiss et de schistes micacés; il est si intimement associé à ces roches, qu'on ne peut guère douter que sa formation en soit contemporaine.

Au point de vue de la qualité, si on compare l'anhracite à la houille bitumineuse, l'avantage se trouve incontestablement du côté de l'anhracite, dans la plupart des cas où il s'agit de mettre à profit une grande chaleur. L'anhracite contient jusqu'à 97 0/0 de carbone, la matière calorifique par excellence; la houille bitumineuse n'en renferme guère plus de 60 0/0.

Les cendres de la houille bitumineuse offrent rarement un chiffre de 8 à 10 0/0; elles s'élèvent souvent à 12. Dans l'anhracite, elles atteignent le plus souvent le chiffre de 4 à 6 0/0; les éléments des deux combustibles sont assez analogues.

Rogers, qui les a analysés, dans le but d'en faire la comparaison, a mis en présence des échantillons de houille bitumineuse de *Risca* et d'anhracite provenant d'*Yuiscedwin iron Works* :

1° *En vase clos* :

	Houille	Anthracite
Coke.	67	97.18
Soufre.	4	0.32
Substances volatiles. . .	29	2 50
	<hr/> 100	<hr/> 100.00

2° *En four ouvert :*

	Houille	Anthracite
Coke.	69	97.18
Soufre	6	0.32
Matières volatiles.	25	2.50
	<u>100</u>	<u>100.00</u>

3° *Par combustion :*

Carbone brûlé.	90.60	95.76
Soufre.	0.30	0.12
Cendres.	9.40	4.12
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

L'analyse des cendres a donné :

	Houille	Anthracite
Silice	50.00	52.08
Alumine.	16.67	16.67
Carbonate de magnésie.	10.00	5.21
— de chaux.	6.66	5.21
Peroxyde de fer.	16.67	20.83
	<u>100.00</u>	<u>100.00</u>

Les deux peroxydes de fer, 16,67 dans la houille et 20,83 dans l'anthracite, représentent :

	Houille	Anthracite
Fer.	11.67	14.58
Oxygène.	5.00	6.25
	<u>16.67</u>	<u>20.83</u>

Or, le soufre représenté par le fer des cendres est à deux états très différents : il forme un persulfure dans la houille fraîchement abattue, tandis qu'il n'existe qu'en état de protosulfure dans l'anthracite. Ce qui donne :

	Houille	Anthracite
Fer.	11.67	14.58
Soufre.	13.48	8.32
	<u>25.15</u>	<u>22.90</u>

Comme les cendres de l'anthracite sont à celles de la houille bitumineuse dans le rapport de $\frac{4,12}{9,10}$ il en résulte que la houille peut introduire dans le fer trois fois et demi plus de soufre que l'anthracite; ce qui constitue déjà un grand avantage en faveur de l'anthracite.

Si nous reprenons maintenant les deux combustibles minéraux avec toutes leurs parties constituantes, nous aurons, pour la composition de 1,000 kilogrammes de chacune :

	Houille	Anthracite
Charbon utile	598 kg.	900 00
Cendres.	60	38.40
Soufre.	8	3.20
Matières volatiles . .	334	58.40
	<u>1000</u>	<u>1000.00</u>

Dont en soufre :

Des cendres	8 kg.	3.2
Du combustible. . . .	2	1.6
	<u>10</u>	<u>4.8</u>

Dans les essais qu'on a faits en France pour substituer l'anthracite au coke, on n'a pas fait attention à l'énorme densité du premier, et on n'a rien ou très peu changé à l'allure des machines soufflantes; cependant, la pesanteur spécifique de l'un est plus du double de celle de l'autre (956

contre 405). Une pareille erreur suffirait seule pour expliquer l'insuccès des expériences faites à Vizille.

D'un autre côté, l'anhracite donne de 4 à 10 0/0 de cendres très argileuses, contenant :

Silice.	58.4
Alumine.	38.0
Fer.	2.0
Chaux	1.6
	<hr/>
	100.00

Or, si l'on suppose que le combustible rend 10 0/0 de cendres, chaque quintal devra donc contenir :

Silice.	5.84
Alumine.	3.80
Fer.	0.20
Chaux	0.16
	<hr/>
	10.00

D'après ce que nous verrons à l'article des fondants, il faudrait donc ajouter au flux dans le fourneau :

Silice.	8.09
Chaux	7.44
	<hr/>
	15.53

par chaque quintal d'anhracite brûlé.

Les pyrites contenues dans le combustible sont moins inquiétantes lorsque le fondant est bien fait, et lorsque surtout le minerai contient de l'oxyde de manganèse. Dans l'essai de Vizille, fait avec des fers spathiques manganésifères, le soufre avait

en entier passé dans les laitiers, qui en contenaient de 1,20 à 1,96 0/0.

Un des inconvénients de l'anhracite, est l'accumulation, dans les parties inférieures du fourneau, de petites portions de combustible, qui descendent sans être brûlées jusque dans le creuset et qu'on est, à tout moment, forcé d'enlever à la pelle. Cette espèce de poussière s'oppose au contact des matières, rend le laitier pâteux et oblige à donner un vent fort et montant. Le remède à ces graves inconvénients, c'est de jeter l'anhracite en morceaux d'un certain volume, et d'élever fortement la température.

100 parties de cette poussière donnent à l'analyse :

Charbon pur		52	
Cendres :			
Silice	24	} 48	
Alumine.	5		
Carbonate de magnésie.	3		
— de chaux.	2		
Peroxyde de fer. { Fer. 9.8	} 14		
{ Oxygène. 4.2			
			100

Il suffit de comparer l'analyse ci-dessus avec celle de cendres de l'anhracite, donnée plus haut, pour être bien convaincu de l'identité de la poussière et des cendres.

Il est également évident qu'en ajoutant 11 à 12 kilogrammes de chaux ou 20 de carbonate à ces 48 de poussière, on les rendrait fusibles, et qu'au lieu de nuire au rapprochement des matières et à la vitrification des terres, cette addition faci-

literait leur formation naturelle en laitier. La décrépitation de l'anhracite dans le fourneau est la principale cause de cette production de poussière : elle tient à l'eau organique que le combustible renferme, en assez grande quantité pour représenter 1,5 0/0 du poids de l'anhracite. Le liquide, exposé à une énorme chaleur, se dilate subitement, rompt la cohésion du combustible, produit des explosions partielles et jette au loin les petits morceaux d'anhracite, avec d'autant plus de force et de bruit que le morceau principal était plus gros. La cause de la décrépitation une fois connue, il est possible de la faire disparaître, en calcinant par avance l'anhracite et l'amenant, peu à peu et par une chaleur ménagée, à perdre son eau hygrométrique. Ce moyen, le plus simple de tous, enlève, d'un seul coup, les deux graves inconvénients de l'anhracite : la poussière et la décrépitation.

Un troisième inconvénient de l'anhracite, c'est sa forte densité, si toutefois on peut considérer cela comme un inconvénient. Sa grande compacité, en effet, rend difficile son inflammation ; mais une fois allumé, il brûle avec une petite flamme bleue, sans répandre de fumée ; il perd, à la calcination, un peu d'eau due à l'humidité et un peu d'acide carbonique, répondant au calcaire qu'il renferme ; il dégage assez ordinairement une odeur sulfureuse très prononcée et décrépité en se réduisant en petits fragments.

On reproche, et avec raison, à l'anhracite, les trois inconvénients suivants : brûler lentement, se réduire en poussière au feu et contenir du soufre.

Avec une grande quantité et une grande pression de vent, un échauffement graduel et des minerais ou des fondants manganésifères, ou un peu chargés de chaux, ces inconvénients disparaissent en partie, et on a à sa disposition le plus riche des combustibles industriels et le plus calorifique sous le moindre volume.

L'anhracite demande, dans le haut fourneau, une pression deux ou trois fois plus forte que le coke. Il est en effet plus compact, présente, à poids égal, une surface beaucoup moins grande que la houille carbonisée, et, en décrépitant, se réduit en poussière et engorge le fourneau et le refroidit sous une basse pression.

Si dans un fourneau allant au coke, on tente d'introduire de l'anhracite, sans changer la marche des machines soufflantes, le premier effet de cette introduction d'anhracite, en quelque petite quantité qu'il se trouve, est de retarder la descente des charges et de donner une moindre production ; à mesure qu'on augmente la quantité d'anhracite, la descente se ralentit, le minerai s'affine sur les étalages, produit des secousses, les laitiers se chargent de fer, et la marche du fourneau se déränge. En outre, la poussière qui se forme par la décrépitation du combustible s'agglomère un peu au-dessous du ventre, et, comme cette agglomération ne peut être vaincue par un vent faible, elle obstrue le passage vers la cuve, fait projeter le laitier par la tympe d'abord, puis par les tuyères. Cet effet est encore augmenté par la réduction en petits morceaux du minerai grillé préalablement, qui se délite à une forte chaleur.

On ne saurait donc trop recommander, dans le cas du travail à l'anhracite dans les hauts fourneaux, d'employer des machines soufflantes d'une grande puissance, de donner au vent une pression supérieure à 20 centimètres, et de faire composer les charges de minerai de morceaux d'une certaine grosseur, celle du poing, par exemple. Dans ce cas, le grillage, loin d'être utile, ne pourrait qu'être nuisible. Le minerai doit être employé cru. Ces recommandations présentent une économie dans deux manipulations préliminaires : le cassage et le grillage.

Dans les localités où on en a la possibilité, on pourrait très bien agglomérer l'anhracite avec la houille et en obtenir un coke particulier. En ce cas, la pression du vent aux tuyères se calculerait suivant la quantité de l'un et l'autre combustibles employés à l'agglomération : avec 7 parties d'anhracite et 5 parties de houille, le coke exigerait une pression au manomètre de 15 à 16 centimètres.

Dans le pays de Galles, on calcule que 1,250 kilogrammes d'anhracite brut, contenant 1,150 kilogrammes de carbone, sont nécessaires pour produire 1,000 kilogrammes de fonte.

L'anhracite se rencontre en France sur certains points, et notamment au Nord, au bassin de Valenciennes ; en Belgique, près de Charleroi ; en Angleterre, on le rencontre près de Merthyr-Tydwil ; en Allemagne, il existe quelques petites couches, il y est principalement employé pour le chauffage domestique et la production de la vapeur, on l'apprécie moins pour la métallurgie. En Pensylvanie, il en existe un gisement important, qui couvre

120.000 hectares et possède une puissance considérable. Il fournit un combustible presque exempt de cendres et d'eau hygrométrique, dont la composition chimique se rapproche de celle des meilleurs coques ; aussi est-il employé à l'état cru dans les hauts fourneaux de certaines régions des Etats-Unis, en présentant les inconvénients que nous avons déjà signalés.

II. COMPARAISON DES COMBUSTIBLES SOLIDES NATURELS

Si nous comparons les combustibles solides naturels que nous venons d'examiner, au double point de vue des propriétés physiques et de la composition chimique, nous remarquons qu'ils forment une série dont les deux termes extrêmes sont le bois et l'anhracite, et dans laquelle la quantité de l'oxygène va en diminuant graduellement d'un terme à l'autre, tandis que la proportion du carbone va en augmentant, et par conséquent, le résidu de la distillation en vase clos augmente aussi. Tout au contraire, la quantité de matières volatiles diminue, en même temps que la composition de ces matières subit des changements considérables (Voir le tableau page suivante).

III. COMBUSTIBLES CARBONISÉS

Le but de la carbonisation, c'est de concentrer sous un moindre volume les deux substances utiles dans la métallurgie : le carbone et l'hydrogène ; le carbone, base de la calorificité ; l'hydro-

Tableau comparatif des divers combustibles

Nature des combustibles	Composition chimique, abstraction faite de l'eau hygrométrique et des cendres en centièmes				Résidu de calcination en vase clos	Matières volatiles	Hydrogène utilisable	Pouvoir calorifique	Ban hygrométrique après séchage à l'air	Cendres p. 0/0	
	C	H	O	Az							
Bois	50.5	6.2	42.3	1.0	25	75	0.91	3600	20 0/0	2	
Tourbe	60.0	6.0	32	2.0	35	65	2.00	5000	25 à 30	6 à 20	
Lignite	61.5	5.5	33		40	60	1.37	5500	25 à 40	5 à 15	
Lignite prop. dit.	69.5	5.5			45	55	7000	2.37	7000	5 à 10	3 à 15
Lignite gros.	75.5	5.5			50	50	8000	3.13	8000	4 à 8	3 à 10
Houille sèche à longue flamme.	77.5	5.5	17		55	45	3.38	8200	2 à 4	2 à 15	
Houille grasse à longue flamme.	82.0	5.5	12.5		65	35	3.94	8600	id.	id.	
Houille march.	86.5	5.0	8.5		70	30	3.75	9000	id.	id.	
Houille grasse à courte flamme.	89.5	4.5	6		78	22	2.37	9400	id.	id.	
Houille maigre à courte flamme.	92.5	3.0	5		85	15	2.15	9200	id.	id.	
Anthracite	94.0	2.0	4		92	8	1.50	9200	id.	id.	

gène, élément de l'inflammabilité. Tous les combustibles naturels sont composés de :

Eau sous forme d'oxygène et d'hydrogène ;

Matières terreuses ;

Hydrogène en excès ;

Carbone.

Ces deux derniers éléments devant être conservés, on chasse les deux autres, savoir : l'oxygène et l'hydrogène saturant sous forme de vapeur ; les matières terreuses sous forme de cendres. Mais comme cette séparation ne se fait qu'au moyen d'une haute température, et que celle-ci ne peut s'obtenir qu'en consommant une partie de l'hydrogène et du carbone du combustible, il est évident que le résultat de la préparation est une quantité de carbone et d'hydrogène moindre que celles existant dans le combustible brut primitif.

La carbonisation est donc un procédé à l'aide duquel on réduit un combustible à l'état le plus voisin du carbone pur. Lorsqu'on expose à une température de plus en plus élevée les combustibles solides, ils commencent à se décomposer vers 150 degrés et à donner naissance à un dégagement d'eau, d'hydrocarbures divers, d'oxyde de carbone de gaz ammoniac, etc. La manière dont se fait cette décomposition dépend surtout de la température à laquelle elle s'opère ; mais, si on chauffe un combustible à l'abri de l'air jusqu'au rouge, le résidu est toujours du carbone à peu près pur et des cendres.

Les matières volatiles résultant de la décomposition contiennent des éléments combustibles en grand nombre ; leur départ constitue une perte

appréciable lorsqu'on n'utilise pas le pouvoir calorifique qu'elles possèdent. Malgré cette perte, l'opération de la carbonisation est d'une très grande utilité, puisqu'elle permet d'obtenir des combustibles brûlant sans flamme, préférables dans bien des cas à ceux qui, à l'état naturel, ont servi à les préparer.

La décomposition d'un combustible par la chaleur exige une dépense calorifique qui ne peut être faite sans inconvénient dans le moment et dans le milieu où se fait la combustion ; d'un autre côté, si comme cela se passe dans les fours à cuve, où le combustible est en couches épaisses que l'air traverse de bas en haut, il se produisait un dégagement de gaz dans les parties supérieures de l'appareil, les produits de la combustion qui se forment dans la région inférieure seraient gênés dans leur mouvement ascensionnel. Enfin, les fragments de combustibles naturels changent de forme en se décomposant sous l'action de la chaleur et ce fait seul s'oppose à leur emploi dans bien des cas : les houilles grasses par exemple ne pourraient être utilisées là où le coke qui en provient s'emploie avec avantage. En outre, la température de combustion du résidu de la calcination d'un combustible naturel est plus grande que celle de ce même combustible employé en état cru.

Le bois et la tourbe peuvent être carbonisés avec avantage, mais il est inutile de chercher à carboniser les lignites qui, sous l'action de la chaleur, s'effritent. Tous les moyens employés jusqu'à présent pour obtenir de bons charbons de lignite ont échoué. Les houilles sèches à longue flamme se

comportent d'une façon analogue ; beaucoup d'entre elles cependant supportent sans se briser une carbonisation modérée, c'est-à-dire une élimination de la plus grande partie des matières volatiles qu'elles contiennent, pourvu qu'on ne pousse pas la chaleur ni trop vivement, ni à un degré trop élevé. Toutes les houilles collantes conviennent à la carbonisation, tandis que l'anhracite et les houilles qui s'en rapprochent s'émiettent sous l'action de la chaleur. D'ailleurs, la carbonisation de ces derniers combustibles n'offre que peu d'intérêt, car la quantité de matières volatiles qu'ils contiennent est très faible.

La carbonisation a lieu en *meules*, *entre murs* ou en *fours* plus ou moins clos.

En meules ou en plein air, la purification est plus complète, en ce que l'oxygène de l'air forme des combinaisons et sert de réactif ; mais il se forme aussi de l'oxyde de carbone et de l'acide carbonique aux dépens du combustible, et le résultat de l'opération est sensiblement moindre.

En vase clos, dans les fours, la carbonisation est moins parfaite. Dans la houille, par exemple, qui est presque toujours accompagnée de pyrites, le bisulfure se décompose par la chaleur, passe au sulfure simple ; il est très difficile alors de le séparer entièrement, il est toujours du protosulfure en combinaison. En plein air, au contraire, le sulfure est dégagé à l'état d'acide sulfureux.

Aussi le produit carbonique obtenu dans un four est-il, le plus souvent, plus pesant que celui obtenu en plein air. Cette différence se remarque encore dans les différents fours ; celui qui laisse

une entrée à l'air atmosphérique donne toujours un résultat moindre en poids que celui qui est hermétiquement clos. Voilà pourquoi les charbons obtenus dans les laboratoires des chimistes diffèrent tant de ceux qu'on obtient dans les usines.

La construction et l'entretien des fours coûte assez pour qu'on n'emploie cette méthode que lorsqu'on veut distiller et recueillir tous les produits du combustible. Le procédé des meules est, au contraire, simple, facile et peu coûteux.

Le bois et la tourbe diminuent de volume dans la carbonisation ; la houille se gonfle et augmente au contraire. Moins le combustible contient de carbone, plus la cuisson des meules exige de précautions, car l'union du carbone avec les substances volatiles étant alors plus intime, celles-ci pourraient l'entraîner en grande partie avec elles. Le bois subit d'ailleurs un grand déchet et prend un retrait considérable, ce qui peut, en dérangeant l'économie des meules, nuire beaucoup à la conduite du feu.

La tourbe demande moins de ménagement, surtout lorsqu'elle jouit d'une certaine capacité ; elle peut même, dans certains cas, être exposée à un courant d'air. Mais si elle est mousseuse, fibreuse et légère, elle exige toutes les précautions possibles dans la conduite de l'opération.

Les procédés de carbonisation pour le bois, la tourbe et la houille, sont à peu près les mêmes ; cependant, les différences qui s'y trouvent exigent que nous les traitions à part et en fassions des articles spéciaux.

Carbonisation du bois

Le résultat de la carbonisation du bois, c'est le charbon de bois ; les méthodes qu'on emploie pour préparer le bon charbon de bois se rattachent aux trois types principaux déjà cités, savoir : la carbonisation en meules, la carbonisation entre murs et la carbonisation en fours ou vases clos.

Les bois ont d'autant moins de valeur calorifique en métallurgie qu'ils contiennent plus d'eau ; la vapeur, pour se produire, emprunte aux milieux environnants une partie de leur chaleur et abaisse, par conséquent, leur température :

Le ligneux pur dégage. . .	1700	cal.	de	chaleur.
S'il contient 40 0/0 d'eau. .	1380	—	—	
Et à 82 0/0 d'eau.	1120	—	—	

Or, la fusion de la fonte se tenant entre 1200 et 1400 degrés, on voit quel peu de ressource offre dans la métallurgie du fer, le bois vert fraîchement coupé. Il faut donc, pour obtenir de ce combustible tout l'effet utile qu'il peut donner, en expulser préalablement l'eau hygrométrique qu'il contient. La quantité existante dans les bois varie selon les circonstances de leur position ; au moment de l'abatage, elle s'élève parfois jusqu'à 80 0/0 de ligneux.

L'âge du bois est une des considérations des plus importantes pour la carbonisation. La première raison qui guide ordinairement les propriétaires des forêts, c'est l'économie du temps et l'abondance des produits. Quoique ces considérations doivent être modifiées par les influences particulières, il n'en existe pas moins des connaissances expéri-

mentales qui peuvent nous conduire à une théorie plus ou moins certaine des lois de la végétation et de l'économie des coupes.

Les sucres nutritifs de la plante sont portés, dans les vaisseaux du bois, par une force de succion puissante. Tant que la chaleur de l'atmosphère favorise cette attraction capillaire, la sève monte et la plante se développe et grandit ; à mesure que le calorique diminue, son influence décroît, la sève se ralentit ; elle paraît même cesser d'agir tout à fait. Le printemps donne le signal de la marche ascendante des principes végétaux à travers le tissu organique ; l'automne indique le moment du repos ; l'hiver, tout semble avoir cessé. Mais la sève a grossi la tige, et, lorsqu'elle s'arrête, elle marque la cessation de travail par une espèce de nœud, un *calus* qui distingue chaque sève annuelle par un bourrelet léger qui se forme sur la tige.

En comptant la distance d'un calus à l'autre, on se rend compte du progrès de l'arbre pendant une année. Il est facile alors de déterminer le développement pris par la plante à tel ou tel âge, dans telle ou telle période. C'est ainsi qu'on trouve que dans les cinq premières années un arbre croît de 4^m 85 à peu près ; que de cinq à dix ans, il atteint la hauteur de 7^m 15, et qu'à l'âge de vingt ans, il s'élève à 9^m 75.

Ainsi, l'accroissement diminuerait dans les arbres de cinq à vingt ans. Il semblerait, d'après cela, qu'il serait plus avantageux de couper le bois fort jeune, et c'est peut-être cette raison qui porte, en certain pays, les propriétaires de taillis à aménager à l'âge de dix à douze ans.

La carbonisation ne présente d'avantages que dans les végétaux dont la fibre ligneuse est fortement caractérisée, puisqu'elle contient 52 0/0 de carbone. Ce ligneux, très faible dans les jeunes plantes, se forme néanmoins de bonne heure, s'accumule avec l'âge, et occupe déjà à vingt ou vingt-cinq ans, les 93 centièmes des diverses espèces de bois. A mesure qu'un arbre avance en végétation, cette fibre s'épaissit ; les canaux conducteurs se rétrécissent, la sève ne porte plus qu'avec difficulté la petite quantité d'acide carbonique qui lui est fournie par les racines ; les variations de la température des nuits et des jours n'influent plus avec autant de force sur le jeu des pompes capillaires ; les branches et les feuilles s'approprient seules le carbone de l'atmosphère ; la transpiration de la tige principale n'est plus réparée ; elle continue cependant à grossir, mais la dose de carbone n'augmentant plus, le bois devient plus léger et donne moins de charbon à volume égal.

Il paraît, d'après l'expérience, que ce terme de perfectibilité, relativement à la teneur en carbone, est entre vingt et vingt-cinq ans. Ce qu'il y a de bien certain, c'est que les bois qui dépassent cet âge n'offrent aucun bénéfice dans la carbonisation, et que, d'un autre côté, ceux au-dessous de quinze à vingt ans donnent une moindre quantité de charbon. Il n'est pas étonnant, d'après cela, que les bois vieux, humides et dépérissant, produisent de mauvais charbons et en moins grande quantité que les bois sains. Il n'est pas moins évident que le bois qui croît encore donne de meilleurs produits que celui qui ne croît plus.

A l'âge de vingt-cinq ans, le bois contient de 48,53 à 50,19 de carbone ; il a nécessairement une valeur calorifique moindre que celle de la houille, qui contient 60 à 70 de carbone et que l'anhracite, qui en renferme 95 à 97,50 ; il a, en outre, un autre désavantage, c'est d'occuper plus de place à valeur industrielle égale. 100 kilogrammes d'anhracite forment un volume de 85 décimètres cubes ; 100 kilogrammes de houille représentent un solide de 117 décimètres cubes ; 100 kilogrammes de bois occupent un espace de 306 décimètres cubes. En d'autres termes, 100 décimètres cubes d'anhracite pèsent 118 kilogrammes ; 100 décimètres cubes de houille pèsent 85 kilogrammes ; 100 décimètres cubes de bois pèsent 32 kilogrammes et demi.

Le grand volume des bois, comparé à leur valeur calorifique, ou, ce qui est la même chose, à leur teneur en carbone, a été de tout temps un inconvénient dans les arts métallurgiques. On a dû, par conséquent, chercher à en réduire le volume en en chassant les substances volatiles, et en conservant le plus possible de carbone dans le combustible restant. C'est là le but de la carbonisation.

Cette opération a été bien imparfaite jusqu'à nos jours, car on avait rarement obtenu plus de 18 0/0 de charbon impur, tandis que le bois soumis à la distillation contenait jusqu'à 50 0/0 de carbone pur.

Plusieurs circonstances se sont en effet opposées constamment à un rendement plus considérable. A première vue, il semble que pour carboniser le bois, il suffise de l'exposer à une certaine chaleur ;

les principes volatils se vaporisent et s'échappent, le carbone reste; il y a une véritable distillation. Cela est vrai dans un vase bien hermétiquement clos, dans lequel le bois n'est point exposé au contact de l'air, où la chaleur nécessaire à l'opération est fournie par un combustible étranger. C'est ce qui se passe dans les laboratoires de chimie; mais cela n'a plus lieu dans la pratique de la carbonisation en grand, dans les meules, qui sont non seulement en contact avec l'air extérieur, mais dans lesquelles encore il faut en introduire pour activer la cuisson. Il y a là une véritable combustion, c'est-à-dire une consommation du principe charbonneux, outre un dégagement des principes inflammables. La partie de l'air atmosphérique que les chimistes ont nommée *oxygène*, se combine avec une partie du carbone du combustible; il se forme un gaz qui s'échappe, et qui, par son dégagement, enlève d'autant plus des éléments calorifiques.

Les méthodes qu'en emploie pour fabriquer le charbon de bois se rattachent à trois types principaux.

Carbonisation en meules. — Cette méthode est la plus ancienne et c'est celle qu'on emploie généralement en Europe. Une meule est un tas de bois établi suivant certaines règles et à l'intérieur duquel on met le feu et qui est recouvert extérieurement de gazon ou de matières analogues, pour que la combustion soit très limitée; celle-ci est d'ailleurs réglée par des ouvertures ménagées dans le revêtement extérieur et ne doit porter que sur la proportion absolument nécessaire pour produire

la chaleur utile à l'opération. La figure 60 représente la forme qu'on donne aux meules; on les établit de la façon suivante :

On commence par choisir un emplacement convenable qu'on appelle *faulde*. Ce choix a toujours lieu l'été, lorsque le terrain est bien sec ; on place la

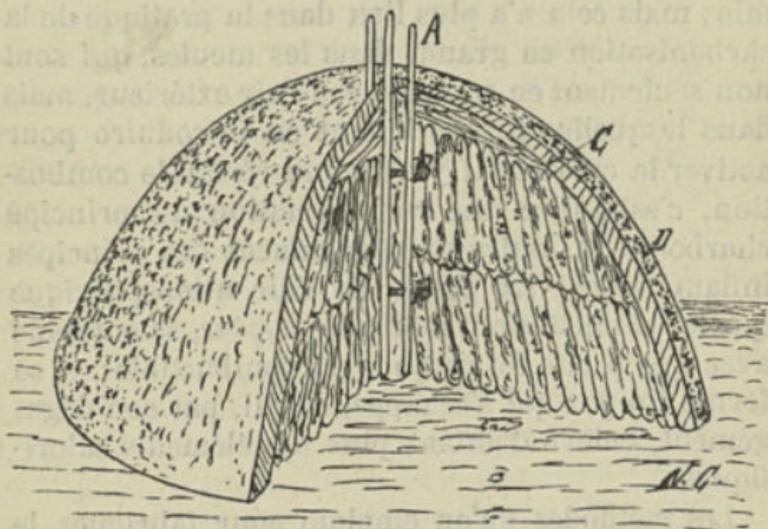


Fig. 60. Meule à charbon de bois.

faulde à l'abri du vent, à la proximité des taillis ; on la dâme et on lui donne une légère pente, du centre à la circonférence, afin de favoriser l'écoulement des liquides. On doit donner la préférence aux emplacements qui ont déjà servi, parce qu'on a moins de craintes de voir se produire des crevasses et une introduction d'air irrégulière.

Le charbonnier doit éviter, avec le même soin, les terres trop légères et celles trop compactes. Dans les premières, l'air pénètre à travers la faulde

et active la combustion, souvent d'une manière inégale; dans les secondes, l'humidité ne pouvant s'infiltrer dans la terre, remonte dans la meule et produit des fumeroles. Certains fabricants préparent la terre avant d'y placer les billettes, soit en composant un parquet d'humus et de branchages, soit en y mêlant de la cendre et du fraisil, et formant une assise qui porte le nom de *terre de charbonnier*.

Le bois est coupé à une certaine longueur, ordinairement 80 centimètres environ, qu'on nomme *charbonnette*. On lui laisse le plus souvent l'écorce, et il paraît même que les maîtres de forges, en général, préfèrent le produit du bois brut à celui du bois pelé pour la fabrication du bon fer, et cela se comprend aisément, puisque l'écorce contient cinq fois et demi plus de sels alcalins que le bois même. On place le bois à l'abri, jusqu'à l'époque de la cuisson, pour éviter les lavages de la pluie.

Au milieu de la faulde, on plante deux ou trois piquets A, qu'on maintient à une distance convenable, en les reliant par des traverses B; on remplit avec des menues branches sèches ou des combustibles faciles à enflammer, l'intervalle entre ces piquets, et à leur pied on dispose des planchettes minces posées de champ, qui facilitent l'allumage. Suivant un rayon du cercle dont les piquets forment le centre, on place sur le sol un gros rondin qu'on enlève après le dressage de la meule; le vide qu'il laisse sert pour l'introduction du feu jusqu'au centre.

Les morceaux de bois à carboniser sont appuyés contre les poteaux, comme on le voit sur la figure,

en plaçant les billettes les plus fortes vers le centre et les plus minces vers la circonférence ; car, si elles étaient trop près de la cheminée, elles se consumeraient avant que tout le reste ne fût carbonisé. Un second rang est placé immédiatement au-dessus de la même manière, et l'on forme ainsi jusqu'à quatre rangs, dont le dernier est en bois moins gros que les autres. La meule présente ainsi la forme d'un cône tronqué. La hauteur de la meule peut atteindre 3 à 4 mètres, et sa capacité de 100 à 150 mètres cubes. Quand tous les bois sont placés, on bouche avec des billettes ou des branchages les vides qui restent à la surface, et on recouvre d'une couche C, de gazon, de feuilles, de la mousse, des aiguillettes de sapin, ou d'autres matières analogues, le tout autour de la meule et au pied, sur une hauteur de 15 centimètres, on laisse un vide qu'on garnit de branchages, le revêtement ne commençant qu'au-dessus ; on remplace quelquefois ces branchages par des bûchettes portées sur des pierres ; enfin, on recouvre le tout avec une couche de terre D, mêlée de fraisil d'une cuisson précédente, sur une épaisseur variant de 3 à 12 centimètres. Du côté où le vent souffle, on dresse une sorte de brise-vent, sorte d'écran qu'on place à une certaine distance de la meule, et on allume.

Peu de temps après l'allumage, on bouche le conduit horizontal par lequel on a introduit le feu, on garnit le pied de la meule avec de la terre ; le charbonnier pratique un certain nombre de trous à travers l'enveloppe, de telle sorte que le feu se propage graduellement du sommet vers la base.

On dispose généralement deux rangées de ces trous, qu'on fait tout simplement avec le manche de la pelle; en bouchant ceux de la rangée supérieure et en pratiquant une autre rangée au-dessous de celle qui reste, on force le feu à descendre.

Au début de la cuisson, l'eau qui s'évapore provoque des explosions et soulève une partie de la couverture; il faut réparer le dégât rapidement, car l'air pénétrant librement par la fente dans l'intérieur de la meule, la brûlerait tout entière. Le bois diminue de volume pendant la carbonisation, provoquant des affaissements partiels; on doit alors garnir les trous par trop profonds avec du bois frais, et dans tous les cas, maintenir la couverture en bon état.

On ne peut pas éviter la production d'affaissements généraux, et l'avantage de l'emploi de la couverture en gazon, terre et fraisil, est de s'accommoder aux changements de forme, et de maintenir ainsi la meule à l'abri de l'air extérieur pendant toute la durée de la cuisson.

On s'aperçoit que la carbonisation est terminée par l'aspect de la fumée qui, à la fin, devient très claire; on bouche alors tous les événements pour étouffer le feu, et il ne reste plus qu'à extraire le charbon qui reste. L'opération dure de quinze à vingt jours pour une meule de dimensions moyennes.

Quelquefois, on dispose les billettes parallèlement les unes aux autres et horizontalement; la meule a alors la forme d'un rectangle en plan et en coupe transversale, et celle d'un trapèze en coupe longitudinale, c'est ce qu'on appelle *la meule couchée*. Les meules à bois couchés ont un avan-

tage sur celles à bois debout, en ce qu'il y est plus facile d'en garnir les vides. Les bûches placées horizontalement et serrées les unes contre les autres, donnent moins lieu aux crevasses et aux éboulements; elles sont par conséquent plus faciles à surveiller et exigent moins de main-d'œuvre que dans les meules verticales. Quant au rendement en charbon, comparé au volume du bois massif, il varie de 0,95 à 1,15, moyenne 1,05 pour la meule horizontale; et de 0,89 à 1,12, pour la meule verticale; et comparé au volume du bois en meule horizontale, il est en moyenne de 8,65, et pour celle verticale de 0,59.

On peut du reste entasser dans une meule horizontale beaucoup plus de bois que dans une meule verticale. Les vides du foisonnement sont, dans l'un et l'autre cas, comme 33 à 39.

En poids, la carbonisation à bûches couchées rend 24 à 25 0/0, résultat notablement supérieur à celui qu'on obtient avec les meules à bois debout.

La cuisson commence vers le centre et se répand peu à peu vers la circonférence. Si donc on a du bois tendre à carboniser avec du bois dur, il faut avoir soin de le placer vers les points les plus éloignés de l'ignition, afin qu'il ne commence à brûler que lorsque le centre est déjà avancé, et qu'il ne soit pas exposé à une chaleur si intense.

La carbonisation en meules se fait en forêts, à proximité des taillis; ce procédé doit être donc préféré à ceux qu'on ne peut employer que dans des usines de carbonisation, toutes les fois que le transport du bois à l'usine exige des frais impor-

tants, puisque le poids du charbon est beaucoup plus faible que celui du bois qui l'a produit.

La qualité du charbon provenant des meules est excellente lorsque l'opération est bien conduite, mais les produits de la distillation ne sont pas recueillis, et tous les essais faits en ce sens ont échoué les uns après les autres. En Silésie, on est parvenu à recueillir une faible partie de goudron et d'acides en pavant la faulde et en lui donnant une légère pente de la circonférence vers le centre.

Carbonisation dans les fours. — Malgré la surveillance la plus active que l'on peut exercer, la carbonisation en meules ne donne qu'un faible rendement, et on est toujours exposé aux accidents provoqués par les entrées fortuites de l'air au milieu du combustible. Ces inconvénients ont conduit les fabricants à recourir à l'emploi des fours pour la carbonisation du bois.

Une enveloppe en maçonnerie bien faite ne peut pas laisser passage à l'air comme la couverture en terre d'une meule, qui s'affaisse continuellement pendant la cuisson. D'un autre côté, le rendement des fours est bien plus grand, sans avoir besoin d'exercer une surveillance aussi soutenue que pour les meules.

En Europe, on emploie rarement les fours, mais dans l'Amérique du Nord, on fait un usage fréquent de ce procédé importé de Suède. Les formes des fours sont très variables. On peut leur donner la forme rectangulaire avec voûte cylindrique; dans d'autres cas, le four est un cylindre vertical, recouvert d'une calotte sphérique. On rencontre

également des fours de formes entièrement coniques.

Les premiers ont 15 mètres de longueur, de 3 à 5 mètres de largeur et une hauteur à peu près égale ; les seconds ont 8^m 50 de diamètre dans la partie cylindrique, 3^m 50 de hauteur jusqu'à la naissance de la voûte ; les derniers ont à la base

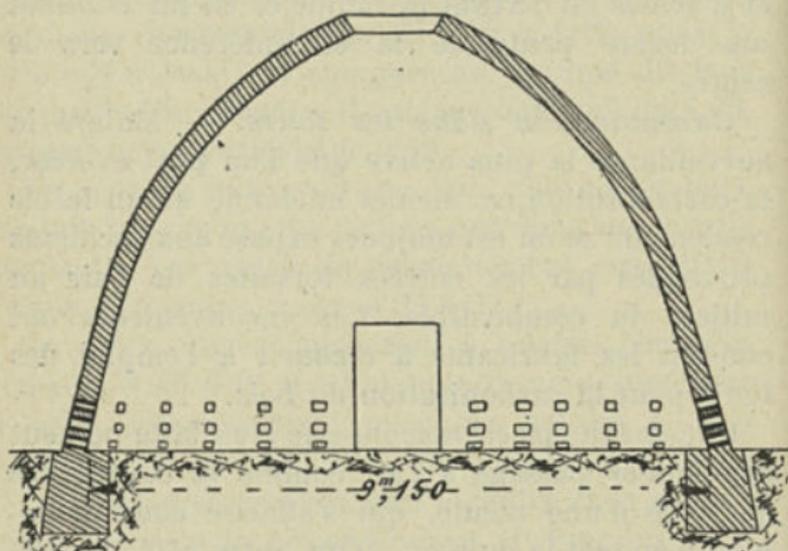


Fig. 61. Four américain pour carboniser le bois.
Charge, 126 stères ; rendement en volume, 53 p. 100 ; durée de l'opération, treize jours.

un diamètre de 8^m 50 à 9 mètres et une hauteur de 6 à 8^m 50. Tous ont deux ou trois rangées d'ouvertures à différents niveaux pour le réglage de l'entrée de l'air,

La figure 61 représente un four pour carboniser le bois employé en Amérique. La figure 62 repré-

sente un four suédois de forme rectangulaire recouvert d'une voûte cylindrique.

Dans l'Amérique du Nord, on laisse échapper les produits de la distillation. Dans d'autres contrées, on a essayé de les recueillir en plaçant dans les parois des fours des tuyaux dans lesquels circu-

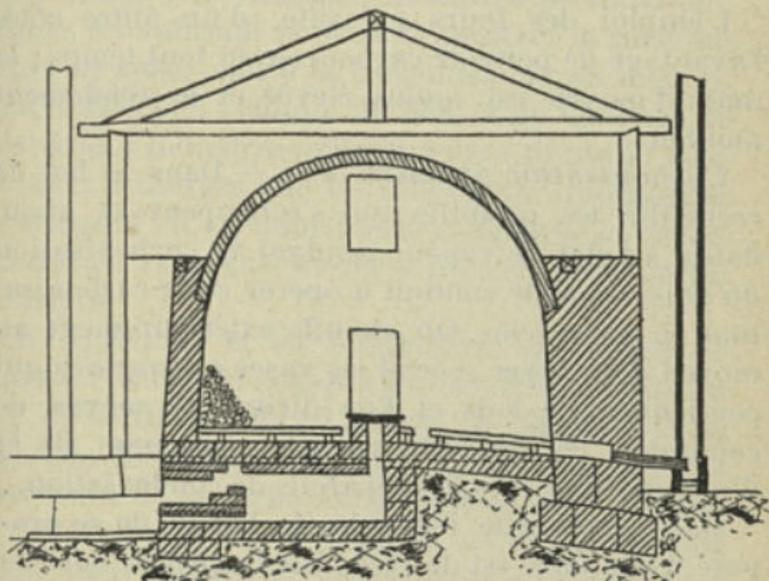


Fig. 62. Four suédois à carboniser le bois.
Usine de Maviken.

laient les produits gazeux et où se faisait une condensation partielle. Cette pratique ne semble pas avoir donné d'heureux résultats ; on n'aboutit qu'à la production d'un charbon de mauvaise qualité et à un faible rendement. La construction des fours absorbe un capital qui doit être amorti ; il faut donc compter, dans le prix de revient du charbon, la somme nécessaire à cet amortissement

et y ajouter les frais de réparation, dépenses qui n'existent pas dans la carbonisation en meules. Il exige, en outre, des frais de transport plus considérables, puisqu'il faut transporter près des fours le bois abattu dans les forêts et, ensuite, le charbon fabriqué de la salle des fours à l'usine qui doit le consommer.

L'emploi des fours présente, d'un autre côté, l'avantage de pouvoir carboniser en tout temps; la main-d'œuvre est moins élevée et le rendement meilleur.

Carbonisation en vases clos. — Dans le but de recueillir les produits qui s'échappent en abondance à l'état de vapeur pendant la carbonisation du bois, on a été conduit à opérer cette carbonisation en vases clos. On chauffe extérieurement au moyen d'un foyer spécial les vases ou cornues qui contiennent le bois et l'on dirige, au moyen de conduites, les produits volatils provenant de la décomposition vers les appareils de condensation.

Mais, dans cette méthode, le but qu'on se propose d'atteindre est de recueillir l'esprit de bois, le charbon jouant le rôle d'un résidu. C'est sur cette méthode de carbonisation en vases clos qu'est basé le gazogène de M. Riché.

Avec 100 kilogr. de bois on obtient 20 kilogr. de charbon, 1 kilogr. d'esprit ou vinaigre de bois ou alcool méthylique, et 4 kilogr. d'acétate de chaux. On obtient donc par cette méthode, en même temps que le charbon de bois, des produits chimiques qui ont une certaine valeur; les frais sont plus grands et il faut tenir compte, en outre, de la valeur moindre du charbon obtenu dont la puissance calo-

rifique est plus faible que dans celui qui provient des meules ; mais ce défaut de qualité est compensé par un rendement supérieur.

Donc, si on étudie une pareille installation, avant d'adopter telle ou telle méthode de carbonisation, il faut examiner tous les besoins locaux, si l'écoulement des vinaigres et autres produits chimiques est suffisant pour faire préférer la carbonisation en vases clos à la carbonisation en meules. D'un autre côté, l'emploi du bois et du charbon de bois dans l'industrie métallurgique diminue tous les jours à mesure que les moyens de transport se développent ; il est donc fort douteux que la carbonisation en vases clos arrive à prendre place parmi les foyers.

En Amérique et en Angleterre, on emploie le procédé Pierre, qui consiste à cuire le bois dans un four de boulanger de 10 mètres de diamètre et de 5 mètres de hauteur environ, au moyen des gaz provenant de la carbonisation elle-même ; dès que la vapeur a cessé de se dégager, on met en marche l'aspirateur qui envoie les gaz dans un condenseur d'où ils reviennent chauffer un four voisin ; il faut douze à dix-huit heures pour chasser l'eau et de six à huit jours pour la cuisson complète. 100 kilogrammes de bois fournissent :

Charbon de bois	25,00
Alcool méthylique	0,75
Acide acétique.	1,00
Goudron de bois	4,00
Eau.	45,95
Gaz combustible	23,30
	<hr/>
	100,00

Propriétés du charbon de bois. — Le charbon de bois est principalement composé de carbone, il contient en outre de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote avec les matières qui constituent les cendres. Exposé à l'air, il absorbe une notable quantité de vapeur d'eau et d'air et une quantité considérable de gaz, comme l'indique d'ailleurs le tableau suivant :

Gaz ammoniaïc.	90	fois son propre volume.	
Acide chlorhydrique	85	—	—
Acide sulfureux	65	—	—
Acide sulfhydrique.	55	—	—
Protoxyde d'azote.	40	—	—
Acide carbonique.	35	—	—
Protocarbure d'hydrogène.	35	—	—
Oxyde de carbone	9,5	—	—
Azote	7	—	—
Hydrogène.	1,75	—	—

Chauffé à 100-150 degrés, il laisse échapper ces gaz et les remet en liberté.

La composition moyenne du charbon de bois exposé à l'air pendant un certain temps, sans cependant avoir été mouillé, est la suivante :

Carbone	80,1
Eau hygrométrique	12,0
Cendres	3,0
Hydrogène	1,8
Oxygène et azote	3,1
	100,0

Sa puissance calorifique est de 6,900 calories.

Le charbon provenant de jeunes taillis est chargé de sels à base de potasse, et facilite, par l'affinité

de celui-ci pour la silice, le dégagement de l'oxyde terreux. Le fer qu'on obtient alors est doux. Lorsque l'arbre prend de l'âge, la quantité de potasse diminue, celle de silice augmente. Le fer peut alors acquérir plus ou moins d'aigreur, suivant la proportion de l'oxyde terreux. Ces différentes nuances ont fait donner au charbon, suivant les produits qu'on en obtient, les noms de *doux*, *aigre*, *fort* ou *faible*, dénominations assez vagues, mais qui sont presque d'un usage général.

Le charbon frais et qui a séjourné quelques jours dans la forêt, est plus combustible que celui qui a séché dans les halles. Cette espèce d'anomalie s'explique par la propriété que possède le charbon d'absorber, presque au sortir de la faulde, toute l'humidité qu'il est susceptible de prendre. Nous savons déjà que l'effet calorifique produit par un combustible est en raison inverse de son inflammabilité.

Le charbon de bois retient et garde toutes les parties alcalines du végétal : il a donc avantage sur le bois quant au traitement du fer. C'est peut-être le meilleur combustible qu'on puisse employer dans l'affinage, et chaque fois que le carbone se trouve en contact avec le métal à l'état de fusion.

La teneur moyenne des cendres du charbon de bois est de 0,70 de potasse par 100 kilogr. de combustible : si, pour produire 100 kilogr. de fonte, on dépense 150 kilogr. de charbon, on voit qu'il peut se combiner plus de 1 0/0 de potasse dans la fonte fabriquée.

Le poids d'un mètre cube de charbon de bois, mesuré selon l'usage dans le commerce, vides

compris, est variable suivant les essences de bois. Ainsi, le charbon obtenu avec du :

Sapin blanc, pèse	de 125 à 140	kilogr.
Sapin rouge et pin	de 140 à 180	—
Bois blanc tendre	de 140 à 200	—
Bois dur	de 200 à 240	—

Le bon charbon est très noir, sonore et dur, il noircit à peine les doigts; si l'admission d'air a été très grande, ou si la carbonisation a été trop rapide, on obtient un charbon mou, friable, tachant les doigts, et d'un pouvoir calorifique très faible.

Les charbons cuits à une température trop basse, restent en état de bois imparfaitement carbonisé, d'une couleur brunâtre, et brûlent avec flamme; ce sont les *fumerons* ou *charbon roux*.

Le charbon placé dans des halles ou magasins se délite et accuse un déchet de 50/0 environ, provenant de la séparation du fraisil et de la transformation d'une partie de carbone en acide carbonique par oxydation.

Carbonisation de la tourbe

La tourbe carbonisée est à la tourbe brute ce que le charbon de bois est au bois, ce qu'est le coke à la houille. Mais, de même que les bois menus ne donnent point de charbon, et que certaines houilles ne produisent point de coke; de même, il existe un grand nombre de variétés de tourbes qui ne peuvent être carbonisées: l'opération se pratique comme pour le charbon de bois, en meules, aux fours ou à vase clos. On reconnaît

dans le charbon de tourbe la structure de la matière employée à sa fabrication. On n'emploie, pour la carbonisation, que les tourbes compactes pressées mécaniquement ; elles donnent un charbon fort assez semblable au charbon de bois.

Le charbon de tourbe contient, comme le charbon de bois, une certaine quantité d'hydrogène, d'oxygène et d'azote ; il absorbe les gaz et l'humidité : sa composition élémentaire peut être la suivante :

Carbone.	70
Hydrogène.	2
Oxygène et azote.	11
Cendres.	5
Eau hygrométrique.	12
	100

Son pouvoir calorifique est de 6,300 calories environ. Un mètre cube pèse environ 230 à 250 kilogrammes.

Ses cendres contiennent une certaine quantité d'alcali et il peut servir à l'affinage du fer. On sait que le défaut du fer d'être cassant à froid est dû, en grande partie, à la présence de la silice ; on sait, d'autre part, qu'on peut vitrifier la silice par un alcali fixe et former un verre léger qui nage sur le bain et s'écoule au dehors par les trous de laitier, laissant le fer à l'état plus ou moins voisin de la pureté.

Carbonisation de la houille

Dans la carbonisation du bois, on avait pour but, non seulement de concentrer le carbone, mais

encore de diminuer le volume du combustible. Dans la carbonisation de la houille, on obtient un résultat tout contraire.

Ainsi, tandis que l'espace occupé par le bois brut est réduit au sixième par la réduction du volume en charbon, celui occupé par la houille est augmenté d'un tiers par le foisonnement du coke; tandis que la teneur en carbone est triple pour un même volume dans la carbonisation du bois, elle est réduite dans la proportion de trois à quatre pour un même volume dans la carbonisation de la houille.

En carbonisant la houille, le but qu'on se proposait, c'était de la désulfurer, car il est possible qu'on attribuait au soufre l'odeur désagréable qu'on sent lorsqu'on brûle de la houille dans des mauvaises conditions. Cette odeur provient surtout des hydrocarbures, et il y a certaines régions où l'on désigne sous le nom de *désulfuration* l'opération de la carbonisation.

Les premiers essais de carbonisation ont été faits en 1619, par M. Dudley, qui obtint un brevet pour l'emploi du coke à la fusion de la fonte.

Toutes les houilles ne sont pas propres à être carbonisées : la quantité de coke varie tellement, que les unes donnent à peine 40 0/0 de produit, et les autres produisent presque le double. On emploie pour la fabrication du coke, en première ligne les houilles grasses : il se passe là quelque chose d'analogue au travail de la nature dans l'opération et la formation de certaines roches grenues, dont les grains sont restés agglomérés sans ciment apparent.

L'agglomération des morceaux de houille grasse par la chaleur est une propriété très précieuse, qu'on peut mettre à profit pour transformer en gros morceaux de coke des houilles pulvérulentes. Ainsi, dans la plupart des exploitations minières de Saint-Etienne, il se produit environ deux tiers de menu. Il y a donc une grande économie à en faire du coke. Mais cette ressource n'existe pas pour toutes les mines.

Le coke, dans les hauts fourneaux, ne saurait être trop pur ; il est important qu'il contienne le moins possible de cendres, attendu que ces cendres sont des causes d'engorgement et rendent pâteux les laitiers, si on ne les fait pas entrer dans le calcul du dosage des fondants. Comme celui qu'on emploie généralement provient de la carbonisation des houilles menues, on peut les laver pour diminuer l'importance des cendres. De cette façon, on peut broyer certaines houilles et les laver, pour les soumettre à la carbonisation et obtenir un coke assez pur. Sans cet artifice, ces houilles, en raison de leur teneur en cendres, n'auraient pas pu subir l'opération de la carbonisation.

L'emploi des houilles lavées pour la préparation du coke s'est généralisé depuis 1860. La transformation de la houille en coke est d'autant plus profitable, que le rendement que l'on obtient est plus élevé ; cela conduit à rechercher, pour cet usage, les charbons riches en carbone, voisins de l'anhracite, bien qu'ils soient moins collants que les houilles à gaz et les houilles marécales. Il y a, du reste, une relation très nette entre la nature de la houille carbonisée et celle du coke obtenu.

Les houilles très gazeuses et très grasses, fournissent un coke boursoufflé et poreux, facile à écraser, et ayant tendance à produire de l'oxyde de carbone ; au contraire, les houilles contenant peu de gaz, se boursoufflent moins et sont d'une agglomération plus difficile, elles donnent un coke plus dense, plus résistant, avec lequel on obtient plus facilement de l'acide carbonique, et préférable à l'autre dans bien des cas.

Souvent, on mélange des houilles de nature différente, plus ou moins grasses, auxquelles on fait subir une préparation mécanique convenable. On produit ainsi un coke de meilleure qualité qu'on n'eût pu l'obtenir de chacune des houilles carbonisées séparément,

La carbonisation de la houille s'opère de différentes façons ; le système à préférer dépend naturellement de la nature de la houille ou du mélange des houilles à traiter.

Carbonisation en meules. — La carbonisation de la houille en meules est la méthode la plus ancienne, elle ne présente aucune difficulté, et elle a beaucoup d'analogie avec celle du bois ; elle ne peut s'appliquer qu'à la houille en morceaux d'une certaine grosseur. On ne peut pas y traiter les menus, ni par conséquent les houilles lavées, ni enfin celles qui sont très grasses et collantes, l'agglomération devant s'opposer au passage de l'air. Une partie du carbone est brûlé dans les meules, d'où un rendement moindre que dans les autres systèmes. Aussi, cette méthode est abandonnée aujourd'hui ; on n'en trouve plus actuellement d'exemples qu'en Angleterre et sur quelques points

de la Haute-Silésie, où l'on carbonise des houilles grasses peu chargées de cendres, et d'un prix peu élevé. Dans la Haute-Silésie, et notamment à Königshütte, etc., on carbonise aussi des houilles sèches à longue flamme, riches en éléments volatils, qu'il serait impossible d'employer à l'état cru dans les fours à cuve. Le coke que l'on obtient se comporte très convenablement ; il est nécessaire de ménager un tirage plus fort que dans les meules à charbon de bois, parce que la houille est d'une combustion plus difficile que le bois et laisse moins de vides entre les fragments. Dans l'axe de la meule, on construit une cheminée, percée de nombreuses ouvertures dans la partie qui doit être entourée par la houille ; cette cheminée est surmontée d'un chapeau en tôle, qui permet de régler le tirage.

La figure 63 indique comment la houille est disposée ; autour de la cheminée A, sont des carneaux D, qui amènent l'air vers la cheminée ; on les établit en briques, depuis le bord inférieur de la meule jusqu'au point B, et à partir de là, ils se continuent avec des gros morceaux de houille ; on place à la partie inférieure de la meule les plus gros morceaux de houille, au-dessus les fragments d'une moyenne grosseur, que l'on recouvre avec les plus menus ; au milieu de ces derniers, on ménage quelques carneaux en briques prolongés jusqu'à la cheminée, et on recouvre le tout de débris de coke.

La meule a ordinairement de 1^m 50 à 2 mètres de hauteur et contient de 10 à 30,000 kilogrammes de houille. On fait l'allumage soit par la cheminée,

soit par les carneaux horizontaux, quelquefois même par la cheminée et les carneaux en même temps.

Le rendement en coke varie de 60 à 65 0/0; les matières terreuses qui constituent les cendres restent complètement dans le coke, par conséquent, le rendement est plus grand pour les charbons riches en cendres que pour ceux qui le sont moins.

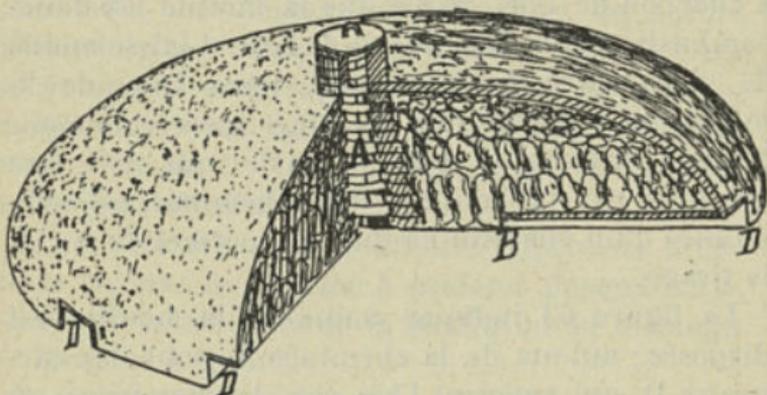


Fig. 63. Meule à coke.

La carbonisation au moyen de meules n'est jamais bien complète; il en résulte que, bien qu'on y brûle une partie de la houille, on obtient un rendement supérieur à celui de la même houille, débarrassée de ses cendres et carbonisée en vase clos.

Si la houille est grasse et collante, on fait la meule plus haute et on la recouvre d'une couche plus épaisse de menu. La houille maigre demande une moindre élévation, afin que sa surface soit plus exposée à l'influence de l'air et une couche

supérieure plus légère, pour que le passage n'en soit pas entièrement intercepté.

Carbonisation dans les fours. — A mesure que la consommation du coke se développait, on était amené à chercher un procédé qui permettrait de

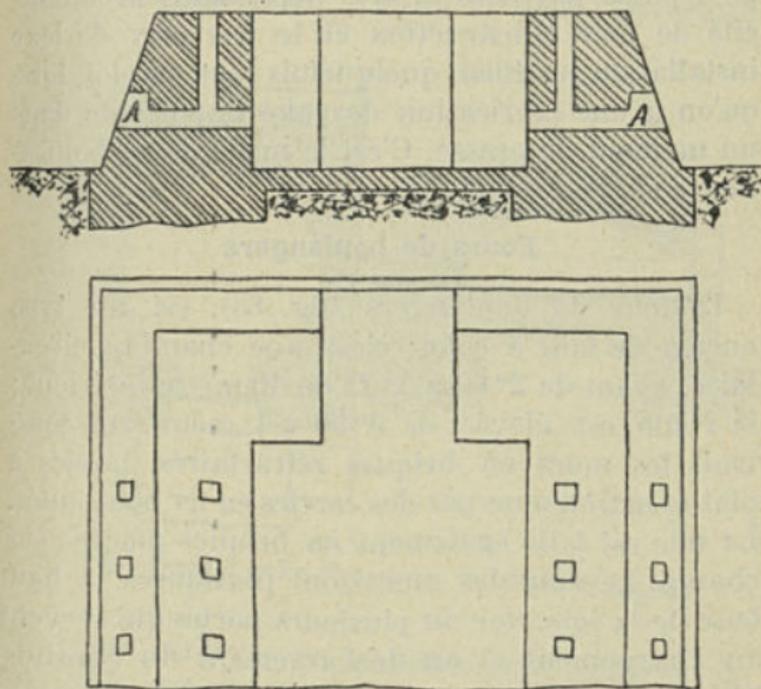


Fig. 64. Bâche à carboniser la houille.

carboniser de la houille en petits fragments et à établir les *fours à coke*.

Le plus simple des fours à coke est celui formé (fig. 64) d'un simple mur d'enceinte, bâti en pierres sèches, élevé au-dessus du sol de 0^m 70; les dimensions de cette enceinte sont : 3 mètres de longueur et 2 mètres de largeur; on ménage dans les murs,

à différentes hauteurs, des ouvreaux A, que l'on ferme et que l'on ouvre à volonté au moyen de briques mobiles ; on peut y carboniser de la houille grasse. Leur emploi est moins fréquent que celui des meules à cause de leur faible rendement, qui ne dépasse pas 60 à 67 0/0. Cependant, la simplicité de leur construction et le bas prix de leur installation justifient quelquefois leur emploi, lorsqu'on a une fabrication de coke importante dans un moment de presse. C'est le mode de carbonisation en *bâche*.

Fours de boulangers

Le four de boulangers (fig. 65), est un type ancien de four à coke ; c'est une chambre circulaire, ayant de 2^m 60 à 3^m 25 de diamètre intérieur ; la voûte est élevée de 0^m 50 à 1 mètre. On construit les murs en briques réfractaires, posées à plat et maintenues par des cerces en fer boulonnés. La sole est faite également en briques placées sur champ. Le long des murs sont pratiquées, à hauteur de la sole, une ou plusieurs portes qui servent au chargement et au déchargement du combustible ; on la ferme pendant l'opération, en laissant entrer seulement à l'intérieur du four, une petite quantité d'air qui sert à brûler les gaz qui se dégagent, ce qui maintient le four en chaleur ; quand la carbonisation est terminée, on ouvre les portes, on tire le coke avec des crochets, et dans le four qui reste rouge, on introduit une nouvelle charge de houille. Une cheminée, placée sur le dôme du four, sert pour le dégagement des gaz. Pour opérer avec ce four, on commence par le

chauffer en y brûlant de la houille, et lorsque les parois sont bien rouges, on introduit la charge, et la décomposition se fait immédiatement.

Un four des dimensions que nous venons de donner, a quatre ouvertures latérales qu'on ferme à volonté à l'aide de briques et dont l'ouverture

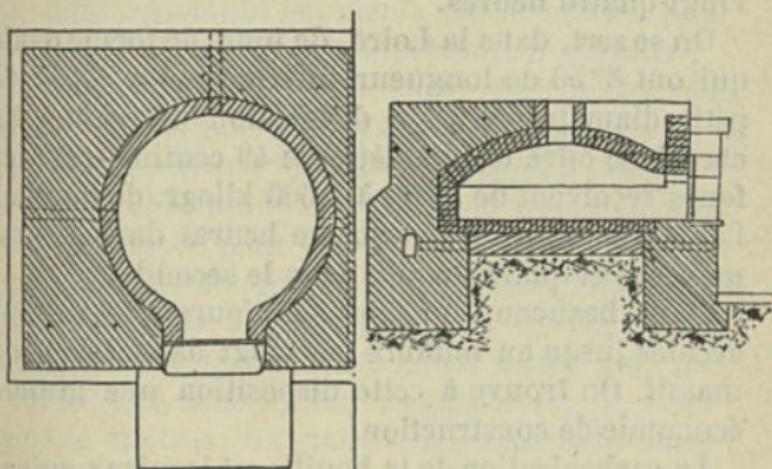


Fig. 65. Four à coke François, dit de boulanger.

supérieure centrale est constamment ouverte, il reçoit à la fois 20 hectolitres de houille grasse, qui sont suffisants pour laisser la place au boursofflement. Les 1,600 kilogr. de houille (20×80) produisent 736 kilogr. de coke, lorsque les portes sont bien fermées, et 671 kilogr. seulement lorsque le four est mal clos.

A Savero, un four ayant 2 mètres de diamètre sur 1 mètre de voûte au centre, d'une construction analogue, parfaitement fermé, rendait 8 quintaux métriques pour 16 de houille.

A Saint-Etienne et à Rive-de-Gier, les fours sont généralement circulaires et n'ont qu'une seule porte ; leur diamètre varie entre 2^m 25 et 2^m 75, et la hauteur de la voûte est de 1^m à 1^m 20 ; on donne rarement à la cheminée un diamètre de plus de 30 centimètres. Ils reçoivent intérieurement de 1,130 à 1,610 kilogr. de houille, et l'opération dure vingt-quatre heures.

On se sert, dans la Loire, de fours de forme ovale qui ont 5^m 50 de longueur intérieure sur 2^m 60 de petit diamètre et 1^m 30 d'élévation de voûte. La cheminée offre un diamètre de 49 centimètres ; les fours reçoivent de 3,000 à 4,500 kilogr. de houille ; l'opération dure vingt-quatre heures dans le premier cas et quarante-huit dans le second.

Dans beaucoup d'usines, les fours à coke sont accolés jusqu'au nombre de vingt dans le même massif. On trouve à cette disposition une grande économie de construction.

La carbonisation de la houille est le mieux entendue à Rive-de-Gier et à Saint-Etienne, où d'ailleurs la qualité du combustible favorise l'opération. A Rive-de-Gier, on a obtenu et on obtient de 60 à 65 0/0 en grand et en fours ; à Torteron, de 50 à 55 0/0, entre murs, sorte de four à découvert.

En meules, le rendement est beaucoup moindre, mais le coke est beaucoup plus compact, moins boursoufflé, plus sonore, plus pesant et plus propre aux opérations métallurgiques. La forme de la houille, indépendamment de sa qualité, influe sur l'abondance du produit.

En houille menue, les meules donnent 43 0/0.

En gros morceaux, on a obtenu :

Houille grasse.	40 à 45 0/0
Houille demi-grasse	50 à 55 0/0
Houille maigre	60 à 65 0/0

Les fours de boulangers présentent trois inconvénients principaux :

1° On ne peut pas éviter la combustion d'une partie du coke par l'air introduit pour brûler les gaz, combustion qui est même indispensable pour maintenir la masse à la température nécessaire ;

2° La chaleur est inégalement distribuée grâce aux grandes dimensions et à la forme des fours ;

3° Enfin, lorsque les gaz s'échappent dans l'atmosphère, il se produit une fumée intense qui est très incommode pour le voisinage.

Les fours de boulangers conviennent mieux aux houilles grasses à longue flamme qui se carbonisent à basse température, qu'à celles qui, peu collantes, ont besoin pour s'agglomérer de beaucoup de chaleur ; ils étaient très répandus autrefois ; ils le sont moins aujourd'hui que l'on sait cokéfier les houilles très riches en carbone et qu'on a constaté que le traitement de ce genre de combustible est le plus avantageux ; mais on les rencontre encore assez souvent en Angleterre, où la nature de certaines houilles peut justifier leur emploi, bien qu'on puisse leur reprocher un rendement moindre et une fabrication irrégulière. On en trouve également encore quelques-uns dans la Haute-Silésie, où on exploite une grande quantité de houilles faciles à carboniser, et sur divers points de la Westphalie. La cuisson dure trois jours environ pour une charge de 6,000 kilogr.

L'inconvénient de ces fours, que nous allons dési-

gner sous le nom général de *fours anciens*, consiste en ce que l'on ne peut pas y obtenir une température bien élevée et que, par conséquent, on ne peut pas y carboniser les houilles très carburées dont le rendement est bien supérieur et le produit d'une meilleure qualité et plus dense. Aussi, depuis qu'on a reconnu que les cokes denses étaient meilleurs et qu'on a trouvé le moyen de les fabriquer, on a proposé une série de fours destinés à ce genre de carbonisation et que nous allons désigner sous le nom de *fours nouveaux*, par opposition aux anciens.

Fours nouveaux

Dans tous ces nouveaux fours la houille est enfermée dans une étroite chambre chauffée extérieurement, comme une cornue. Ce chauffage extérieur est entretenu par la combustion des gaz qui se dégagent de la houille même et qui circulent autour des chambres dans des carneaux ménagés à cet effet. A la sortie des carneaux, ces gaz contiennent encore assez de chaleur pour être utilisés soit au chauffage de l'air, soit à la production de la vapeur par exemple.

Chaque chambre a la forme d'un prisme creux à axe tantôt vertical, tantôt horizontal, ce qui est plus fréquent. Sa largeur est très réduite afin que le chauffage, par les parois, fournisse une température assez élevée et uniforme; cette largeur varie de 1 mètre à 40 centimètres; elle est d'autant plus faible que la houille est moins collante et exige une température plus élevée pour produire un coke de bonne qualité.

Si on chauffait trop brusquement, dans un four

étroit, une houille très grasse et riche en gaz, elle se boursoufflerait d'une façon excessive et le coke obtenu serait très léger; il faut donc que les fours soient adaptés à la nature de la houille dont on dispose.

La durée de la carbonisation varie de vingt-quatre à soixante heures suivant le type de four adopté et la marche qu'on doit imprimer à l'opération. Ces fours, qui sont de faible capacité, ne produisent guère plus de 40,000 à 45,000 kilogr. par mois; on les réunit donc par groupes auxquels on donne le nom de *batteries*.

A partir du moment où les fours sont portés au rouge, ils fonctionnent d'une manière continue; aussitôt la houille chargée, la décomposition commence et les gaz combustibles se dégagent. Le rendement de ces appareils est supérieur à celui des anciens fours, d'une part, parce que la charge est mieux à l'abri du contact de l'air, d'autre part et surtout parce qu'on y traite des houilles dont le résidu à la carbonisation est plus considérable; on arrive ordinairement à 70-78 0/0 du poids de la houille chargée.

Nous allons donner la description de quelques-uns de ces fours à coke en choisissant de préférence ceux qui peuvent être pris comme types et ceux qui, par l'importance de leur production, ont été fréquemment employés.

Four belge Smits. — Les figures 66 et 67 représentent le plus ancien des fours à coke, dont la description est inutile, les figures étant très explicites.

Four Appolt. — Le four Appolt est le plus ancien des nouveaux fours à axe vertical. Les figures 68, 69, 70 et 71 représentent une batterie

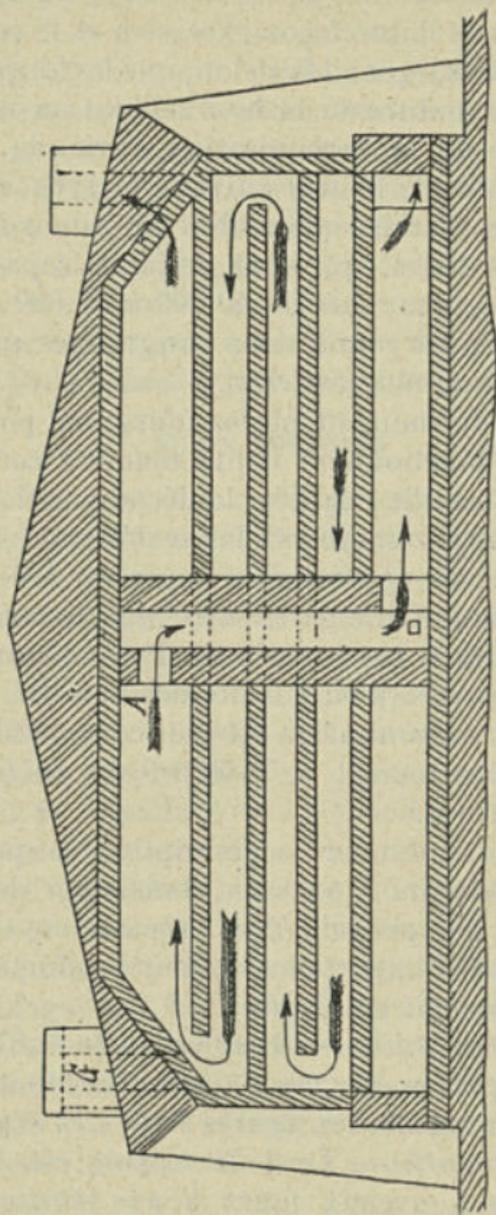


Fig. 66. Four belge, système Smits.

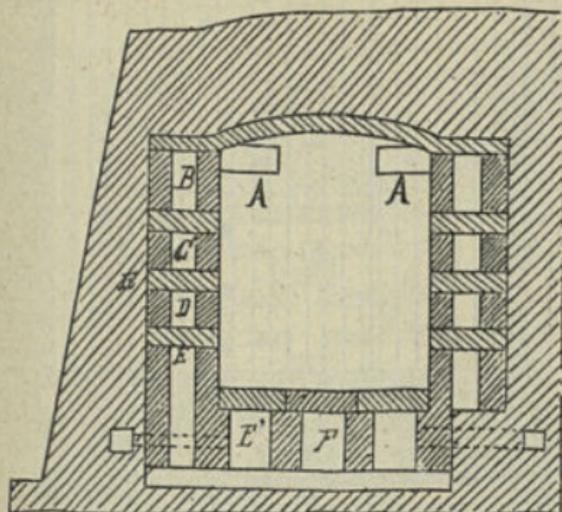


Fig. 67. Four belge, système Smits.

de ces fours. Un mur d'enceinte A enveloppe douze et quelquefois dix-huit cornues B, dont la section horizontale est un rectangle, dont les dimensions vont en s'agrandissant de haut en bas. Ces cornues ont de 5 mètres à 5^m 50 de hauteur jusqu'à l'orifice supérieur, qui est réduit à un carré ayant 29 centimètres de côté, par l'avancement successif de six assises supérieures de briques. Au-dessous de ces gradins renversés, la section est de 1^m 12 × 0^m 29, à la base elle est de 1^m 26 × 0^m 43. On construit ces cornues avec des briques réfractaires de formes spéciales, maçonnées avec soin et reliées l'une à l'autre par une série de grandes briques C, qui traversent les parois des deux cornues voisines. Les côtés les plus larges reposent sur deux traverses en fer I, encastrées dans les piliers qui portent sur les murs d'enceinte et sont soutenues, en

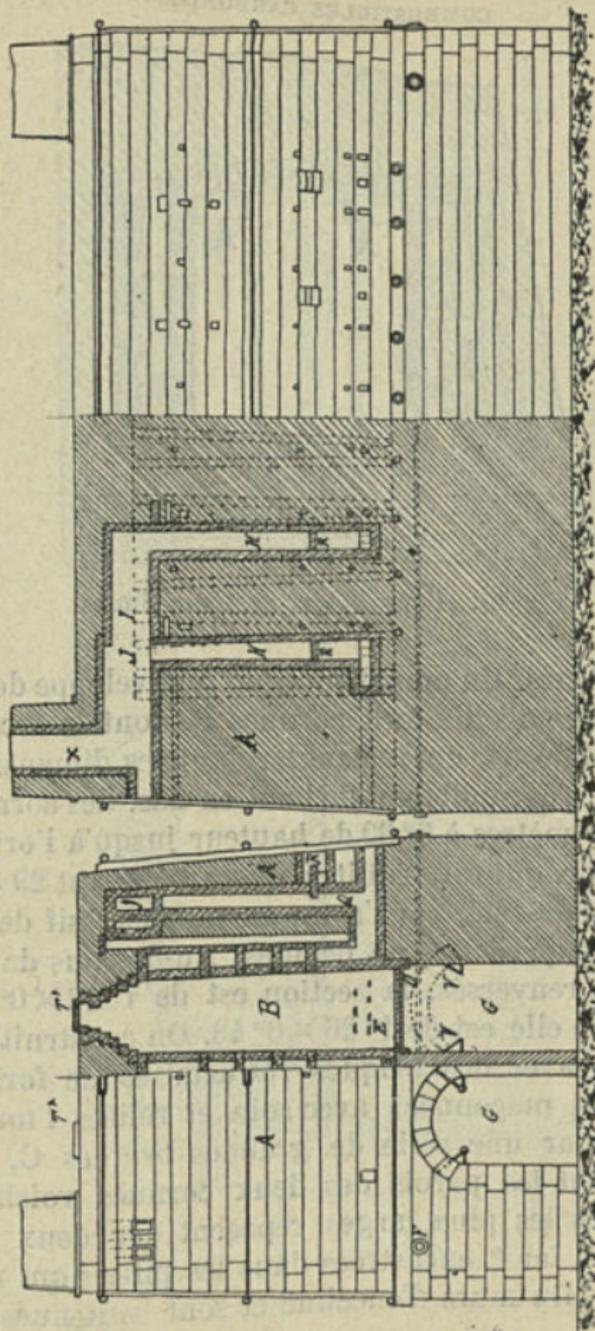


Fig. 68 et 69. Four Appoint.

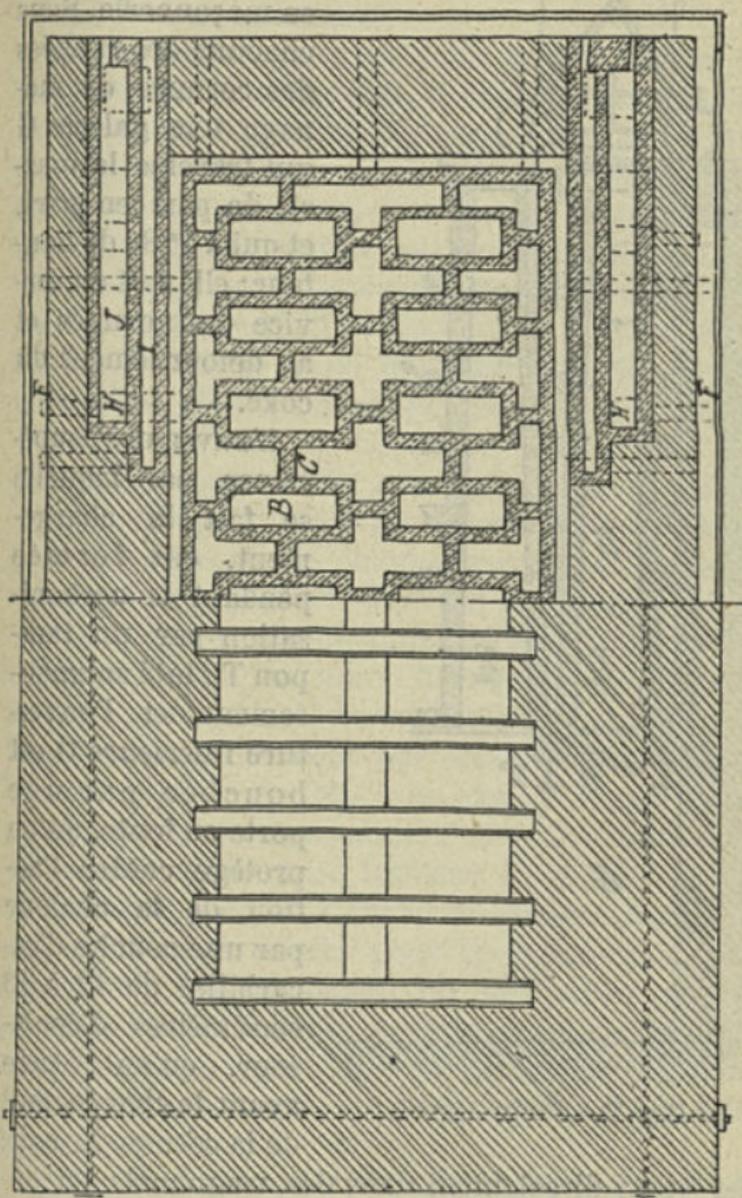


Fig. 70. Four Appolt.

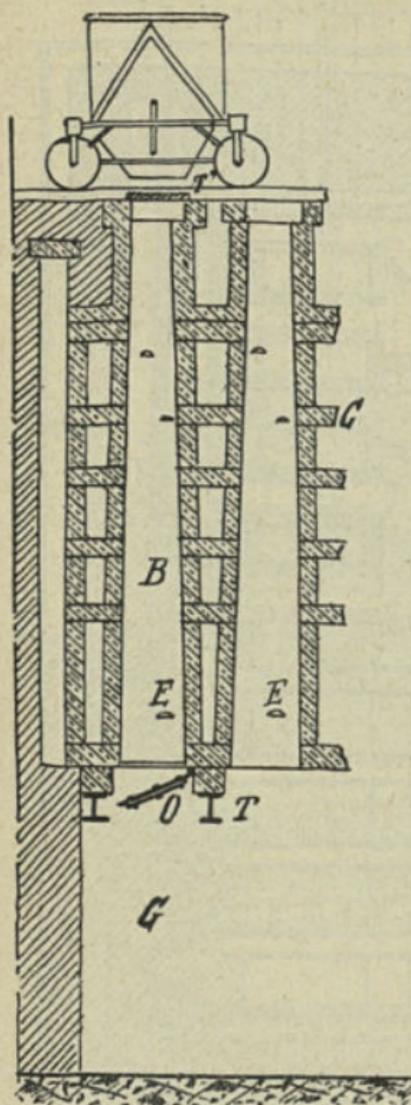


Fig. 71. Four Appolt.

outre, par des voûtes en maçonnerie. Sous chacune des rangées des cornues, on ménage une galerie G qui traverse le massif de part en part, et qui a 1^m 80 de hauteur; elle sert au service des cornues et au défournement du coke.

L'ouverture supérieure, par laquelle se fait le chargement, est fermée pendant la carbonisation par un tampon T', luté soigneusement, et l'ouverture inférieure O est bouchée par une porte en fonte, qu'on protège contre l'action de la chaleur par une couche d'escarbilles de 12 à 13 centimètres d'épaisseur, qu'on étale avant le chargement de la cornue. Le coke

est versé directement dans des wagonnets en ouvrant les ouvertures O; la forme pyramidale de

la cornue facilite la descente du coke, qui est dirigé vers les wagonnets par les volets en fonte V, encastrés dans les massifs.

Les gaz qui se dégagent de la houille sortent de la cornue par des fentes E, situées sur deux rangs horizontaux, à 60 centimètres environ au-dessus du fond, ce qui oblige les gaz à traverser de haut en bas toute la colonne de houille avant de s'échapper. Chaque cornue est munie de dix-huit de ces fentes, sept sur chacun des grands côtés et deux sur les petits. A 1^m 50 au-dessous de l'orifice supérieur, on réserve aussi quelques ouvertures, qui ne servent généralement que lors de la mise en marche d'un four, on les ferme ensuite avec des briques. En sortant des cornues, les gaz circulent en se mélangeant, dans les espaces libres qui existent tout autour de chaque cornue, et ils s'enflamment au contact de l'air arrivant par les ouvertures F et par quelques ouvertures latérales ménagées dans les murs d'enceinte. La flamme enveloppe ainsi les cornues, et les produits de la combustion se rendent par les carneaux Q, qui sont au nombre de trois, sur chaque long côté du massif et dans les conduits J et I, qui communiquent eux-mêmes avec les deux cheminées X. Les registres R servent à régler le tirage. Quand on met un four en marche pour la première fois, ou au début d'une campagne, on doit porter les cornues au rouge, mais en marche normale, on remplit immédiatement les cornues après défournement. Chaque cornue reçoit de 1,200 à 1,400 kilogrammes.

L'avantage des fours Appolt réside dans la grande

surface de chauffe qu'ils présentent, par rapport à leur capacité; toutes les parois, sauf les deux extrémités, sont soumises à l'action de la flamme.

La surface de chauffe va jusqu'à 6 et 7 mètres carrés par mètre cube de capacité; d'après certains métallurgistes, on trouve un mètre carré de surface de chauffe par 100 kilogrammes chargés; quant aux fours horizontaux, ils ne présentent qu'une surface de chauffe moitié moindre par mètre cube.

La chaleur est parfaitement bien utilisée dans ce four, où le prisme de coke est étroitement pressé contre les parois, et la combustion du carbone réduite au minimum. De cette manière, l'opération est rapide, et on peut traiter des houilles maigres dans de bonnes conditions et avec un rendement convenable.

En revanche, ce four présente des inconvénients assez graves; les frais d'installation de ces fours sont plus élevés que ceux pour les fours horizontaux; les réparations sont moins faciles, et la remise en état d'une seule cornue exige l'arrêt et le refroidissement du massif tout entier.

Cette disposition du four Appolt a été modifiée en disposant quatre rangées de cornues au lieu de deux dans le même massif, les briques isolées reliant les parois de deux cornues sont remplacées par des cloisons verticales, qui donnent plus de solidité aux parois et forment des carneaux verticaux, dans lesquels circulent les gaz avant de se rendre dans la cheminée. Les gaz de quatre cornues sont réunis dans le même carneau.

Dans d'autres installations, on a supprimé les

piliers en maçonnerie, en faisant porter tout le massif par des colonnes et des poutres en fer ; de cette façon, tout le bas des cornues est mieux aéré et le déchargement moins dangereux.

Four Smet ou four belge. — Ce four, représenté figures 72 et 73, est un four à axe horizontal, essayé pour la première fois en 1850 ; il s'emploie

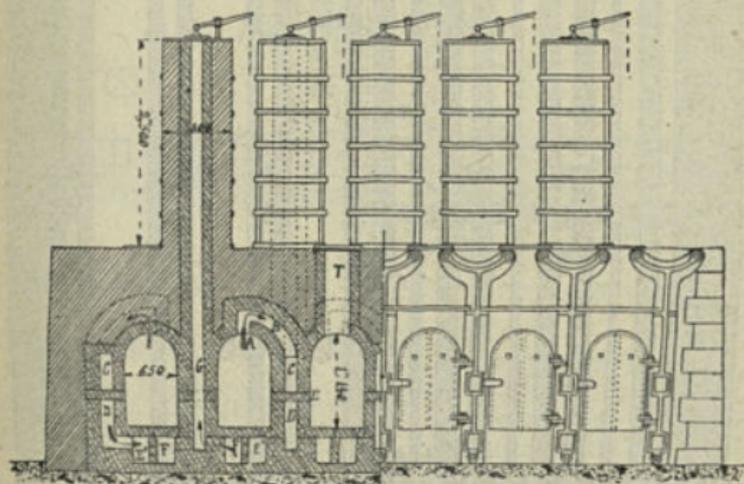


Fig. 72. Four Smet à deux portes (coupe et élévation verticale).

encore aujourd'hui dans certaines usines de la Sarre. Les gaz sortent de la cornue par deux ouvertures A, percées à travers la voûte, ils descendent par deux carneaux distincts B, placés à droite de la cornue, et arrivent ainsi aux carneaux C horizontaux, qui les dirigent chacun vers l'extrémité la plus voisine ; de là, ils reviennent en sens contraire par les carneaux D, séparés des premiers par une cloison E, puis ils pénètrent sous la sole

dans les carneaux E' F, et enfin, ils passent dans la cheminée G, séparée en deux par une cloison verticale, et située au milieu de la longueur du four.

Chaque four est pourvu de deux trémies de chargement T. Le défournement se fait par les

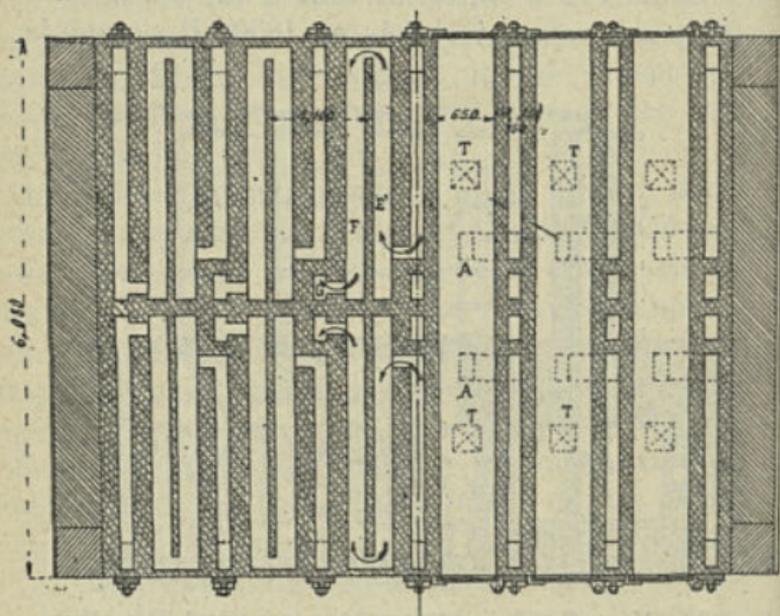


Fig. 73. Four Smet à deux portes (coupe horizontale).

portes, qui sont en fonte et garnies d'une enveloppe en briques réfractaires, maintenues par des nervures saillantes. Ces portes sont à gonds, et leur fermeture, assurée par un loquet, est lutée avec soin pendant la carbonisation.

Les dimensions des cornues sont :

Longueur.	6 à 7 mètres.
Largeur.	65 centimètres.
Hauteur.	1 ^m 10 à 1 ^m 20.

La charge est de 2,500 kilogrammes environ, et la combustion dure vingt-quatre heures.

Une cornue vaut, toute installée, 1,250 à 2,500 fr., suivant les conditions locales et le soin apporté à la construction. Dans ce four, comme dans tous

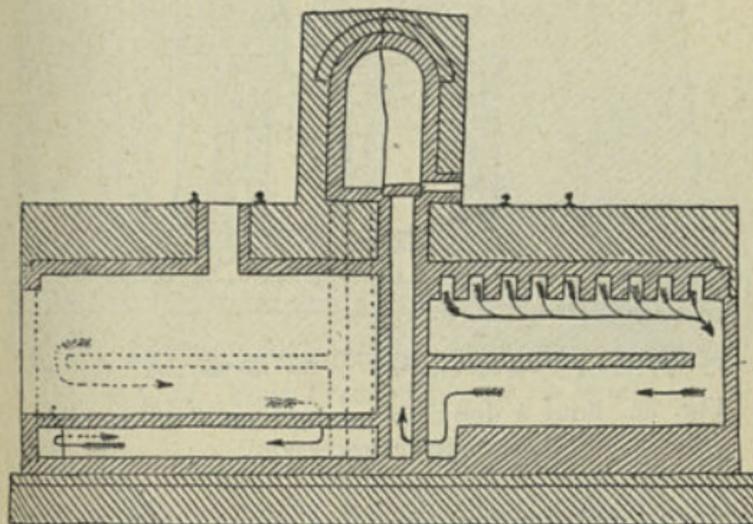


Fig. 74. Four à deux portes, système Smet modifié (coupe longitudinale).

les fours dont les parois sont chauffées par les gaz d'un four voisin, il y a une entrée directe d'air.

Les figures 74 et 75 représentent le four belge, type Smet, modifié.

Four François. — Dans ce four, représenté figures 76 et 77, les gaz de la distillation sortent par une série de petites ouvertures A (ordinairement au nombre de quatorze) latérales, et descendent par autant de carreaux latéraux verticaux B, séparés les uns des autres par des cloisons très

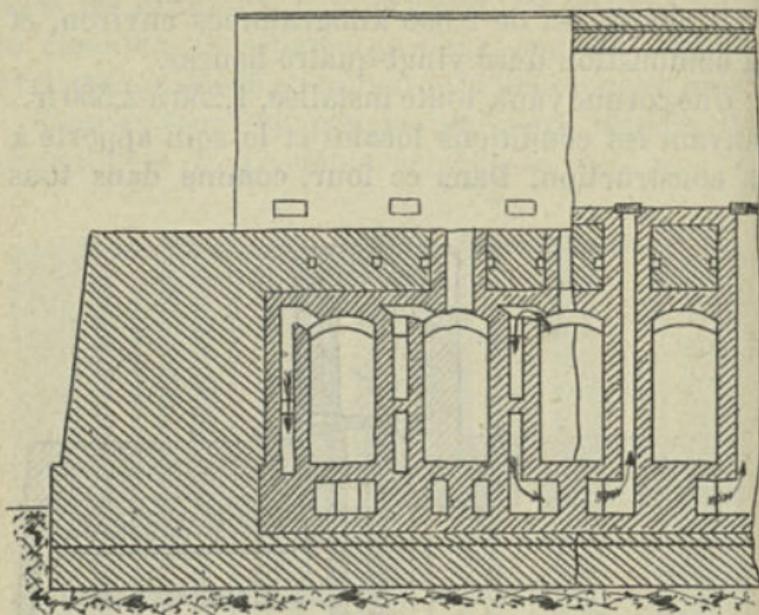


Fig. 75. Four à deux portes, système Smet modifié (coupe transversale).

minces, qui rendent ainsi les parois du four très solides. De ces carneaux B, les gaz passent sous la sole du four qu'ils parcourent dans toute sa longueur, deux fois par les carneaux C et D, et de là ils se rendent dans une galerie souterraine E, qui les conduit à la cheminée.

Au début, ce four ne servait qu'à la combustion des houilles grasses et collantes, et avait 90 centimètres de largeur, avec une durée de cuisson de quarante-huit heures. En réduisant à la suite la largeur à 60 centimètres, on a carbonisé des houilles moins grasses, et la durée de l'opération n'était que de vingt-quatre heures. Telle est la disposition représentée par les figures 78 et 79.

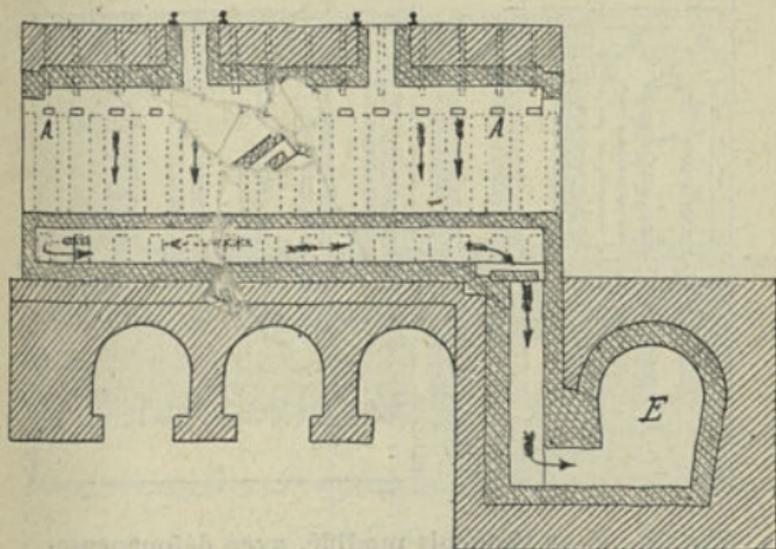


Fig. 76. Four François (coupe en long).

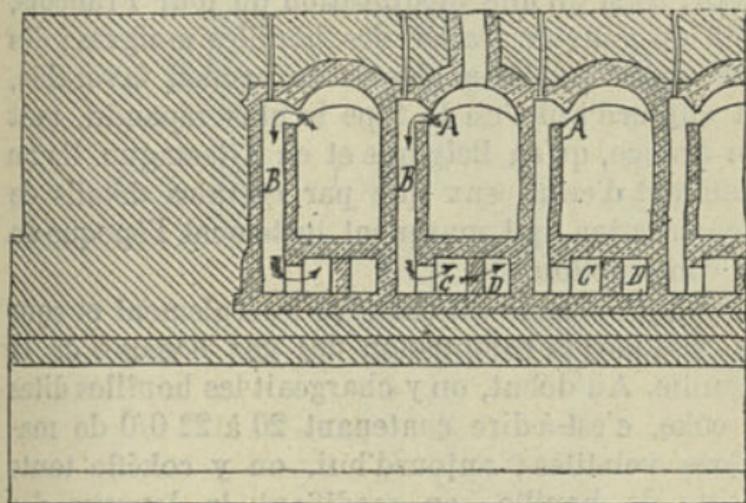


Fig. 77. Four à coke François (coupe en travers).

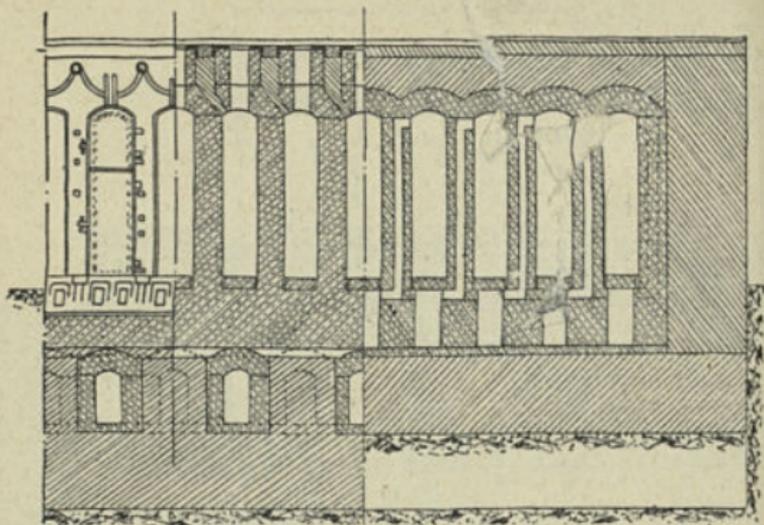


Fig. 78. Four François modifié, avec défourneuse-repoussoir.

Four Coppée. — Ce four, représenté figures 80 et 81, n'est qu'une modification du four François, afin de pouvoir traiter des houilles maigres ; dès son apparition, il a obtenu un accueil favorable, et aujourd'hui c'est le type le plus répandu, tant en France, qu'en Belgique et en Allemagne. Ils ne diffèrent d'entre eux que par certains détails de construction, qui marquent justement l'époque de la construction.

Chaque cornue est chauffée latéralement et sous la sole par la combustion des gaz dégagés de la houille. Au début, on y chargeait les houilles dites à coke, c'est-à-dire contenant 20 à 22 0/0 de matières volatiles ; aujourd'hui, on y cokéfie toute sorte de houille, en modifiant la largeur des cornues.

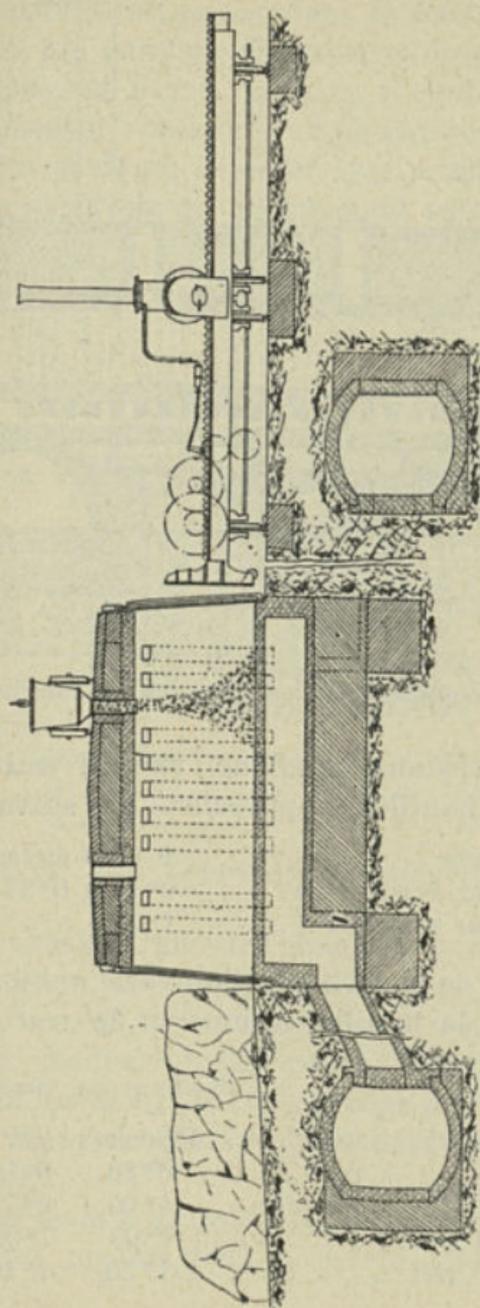


Fig. 79. Four François modifié, avec défourneuse-repoussoir.

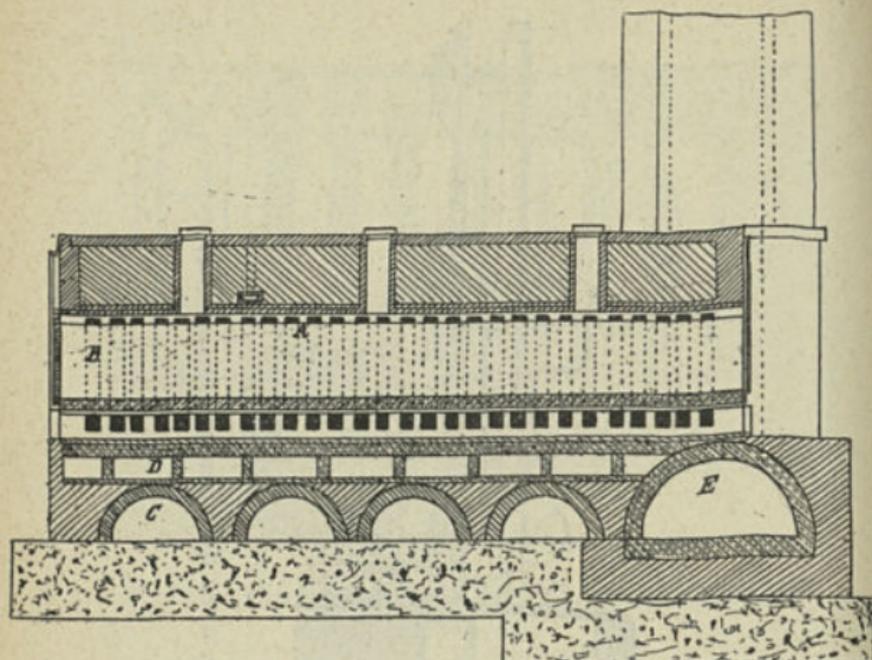


Fig. 80. Four Coppée à deux portes (coupe longitudinale).

Les dimensions, quoique variant suivant la nature des houilles, s'approchent des suivantes :

Longueur	9 à 10 mètres.
Largeur variable de . . .	0 ^m 44 à 0 ^m 55
Hauteur sous clef	1 ^m 30

La durée de la carbonisation varie aussi avec les qualités de la houille, comme on le voit dans le tableau suivant :

	Houille grasse	Houille maigre	
Durée de la carbonisation . . .	48 heures	24 heures.	
Section du prisme {	base	0 ^m 80	0 ^m 40 à 0 ^m 45
	hauteur . . .	1 ^m 00	0 ^m 75 à 0 ^m 80
Longueur du four	7 ^m 00	7 ^m 00	
Hauteur sous clef	1 ^m 50	1 ^m 10 à 1 ^m 20	

Si l'on veut carboniser dans le four Coppée des charbons qui gonflent rapidement et qui risquent de démolir les parois du four, il faut avoir soin de commencer l'opération de la carbonisation très lentement et de ne chauffer que progressivement pour ne pas avoir un dégagement tumultueux de

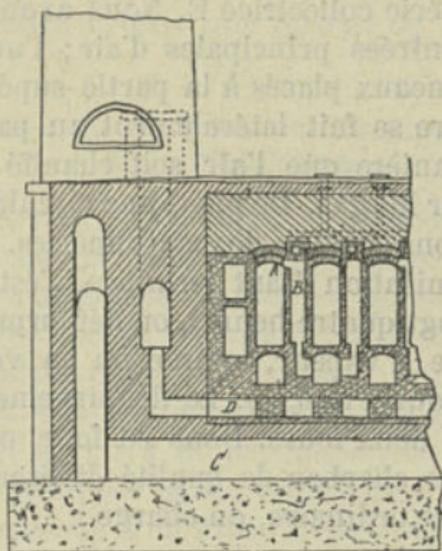


Fig. 81. Four Coppée (coupe transversale).

gaz. Le charbon, aussitôt chargé, est soumis à la carbonisation, soit du fait que le four, sitôt après le défournement, est encore chaud, soit parce que les deux compartiments voisins sont encore en pleine combustion, car on s'arrange pour défourner soit par série de fours impairs, soit par série de fours pairs.

Les gaz de la cornue s'échappent par vingt-huit ouvertures, placées dans la clef de voûte pour les

fours de 9 mètres, et par trente et une ouvertures pour ceux de 10 mètres ; ils passent par des carneaux A horizontaux et s'y enflamment au contact de l'air chaud, dans les carneaux verticaux B, et arrivent sous la sole des fours pairs, puis sous celle des fours impairs, où ils trouvent un nouveau courant d'air qui les brûle. De là, ils passent dans la galerie collectrice E. Nous avons dit qu'il y a deux entrées principales d'air ; l'une se fait par des carneaux placés à la partie supérieure des fours, l'autre se fait latéralement au passage des gaz, de manière que l'air soit chauffé avant de venir brûler les gaz. De plus, une circulation d'air assure la conservation des maçonneries.

La carbonisation étant terminée, c'est-à-dire au bout de vingt-quatre heures, on défourne avec une défourneuse à vapeur, comme on en voit sur la figure du four François. Le défournement se fait de deux en deux fours. Dans ce four, on fait des mélanges de charbon de qualité différente. Ainsi, dans un four ordinaire, on charge :

50 0/0 de charbon à	21-22 0/0 de matières volatiles.
50 — à	9-10 — —

ou encore :

65 0/0 de charbon à	21-22 0/0 de matières volatiles.
35 — à	9-10 — —

Si la teneur en matières volatiles des charbons est très faible, on s'arrangera pour que l'air soit admis en plus grande quantité à la partie supérieure et qu'il vienne se brûler jusque dans les fours.

La charge est de 2,500 à 3,000 kilogrammes pour les houilles à 17-18⁰/0 de matières volatiles, et la cuisson dure vingt-quatre heures. Si les houilles ont 20 à 25 0/0 de matières volatiles, on cuira pendant quarante-huit heures et l'on chargera 5,500 à 6,000 kilogrammes. Si, au contraire, elles contiennent 14 0/0 de matières volatiles, on cuira pendant douze heures une charge de 3,000 kilogrammes.

Fours avec récupération des produits de la distillation

Four Carvès. — Le caractère distinctif du four Carvès est que la combustion se produit en premier lieu sous la sole du four, et au besoin même sur un foyer spécial disposé à cet effet. De là, les gaz se rendent dans des carneaux latéraux horizontaux, et comme ils sont encore assez chauds, ils peuvent servir à la production de la vapeur avant de s'échapper par la cheminée.

Les dimensions d'un four Carvès sont :

Longueur.	7 mètres
Largeur.	0 ^m 50
Hauteur.	2 ^m 00

La largeur a été réduite avec intention pour obtenir du coke plus dense, étant donnée la manière dont s'opère la combustion par zones successives parallèles aux parois mêmes du four. La carbonisation d'une charge de 5,000 kilogr. dure quarante-huit heures.

Le chargement s'opère après la fermeture de la valve qui fait communiquer le four avec les appa-

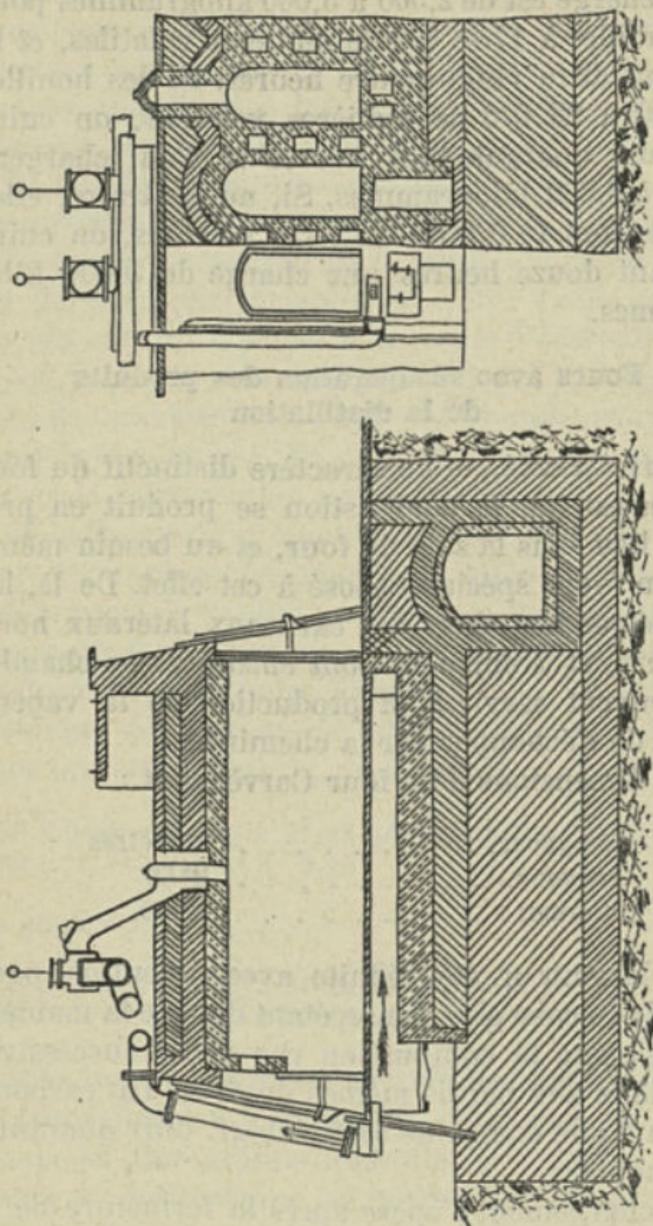


Fig. 82. Four Carvès (coupes longitudinale et transversale).

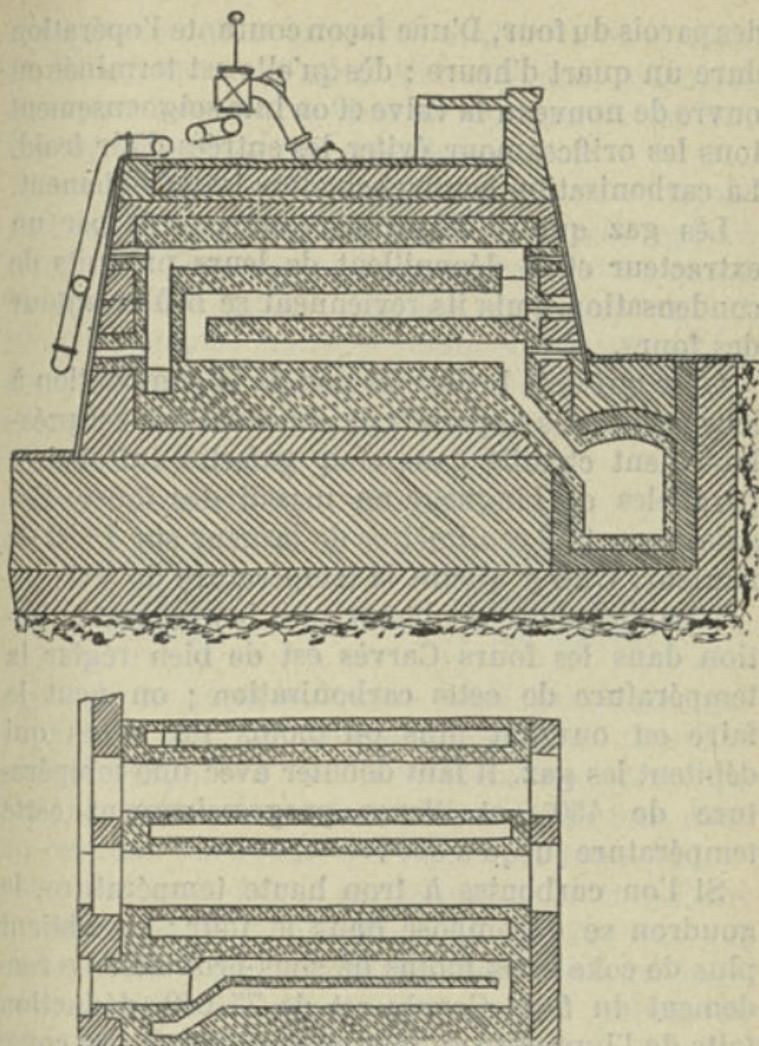


Fig. 83. Four Carvès (coupes longitudinale et horizontale indiquant les carneaux).

reils de distillation ; il doit être effectué le plus rapidement possible, afin d'empêcher le refroidissement, bien que les gaz continuent à brûler le long

des parois du four, D'une façon courante l'opération dure un quart d'heure : dès qu'elle est terminée on ouvre de nouveau la valve et on lute soigneusement tous les orifices pour éviter les entrées d'air froid. La carbonisation commence alors immédiatement.

Les gaz qui se dégagent sont aspirés par un extracteur et se dépouillent de leurs produits de condensation, puis ils reviennent se brûler autour des fours.

L'air qui doit brûler les gaz de la combustion à leur retour des appareils de condensation est préalablement chauffé dans cinq galeries inférieures parallèles en longueur au massif des fours. Ces galeries ont 50 centimètres de largeur sur 1^m50 de hauteur. L'air y atteint la température de 300°.

L'important pour obtenir une bonne carbonisation dans les fours Carvès est de bien régler la température de cette carbonisation ; on peut le faire en ouvrant plus ou moins les buses qui débitent les gaz. Il faut débiter avec une température de 450°, et élever progressivement cette température jusqu'à 800°.

Si l'on carbonise à trop haute température, le goudron se décompose dans le four ; on obtient plus de coke mais moins de sous-produits. Le rendement du four Carvès est de 75 0/0, déduction faite de l'humidité de la houille et de celle du coke. On y cokéfie avec avantage des houilles à 25 0/0 de matières volatiles.

Chaque four coûte 5,000 francs, dont 2,000 pour les appareils de condensation ; les frais d'entretien et de réparation sont peu élevés.

Ce four est le premier en date comme four à

récupération et a servi de modèle à une série d'autres fours dont nous allons donner quelques exemples. Les figures 82 et 83 représentent le four Carvès tel qu'il se fait actuellement.

Four Seibel. — Le four Seibel (fig. 84 et 85) est une modification récente du four Carvès, apte à cuire aussi bien les houilles maigres de 14 à 16 0/0 de matières volatiles, que les houilles grasses à 29 0/0 et plus de matières volatiles. Toutefois il est bon d'opérer des mélanges pour avoir un bon coke et pour ramener la teneur moyenne en matières volatiles à 21 ou 24 0/0.

Les dimensions du four sont :

Longueur.	9 à 10 mètres
Largeur.	0 ^m 600 à 0 ^m 625
Hauteur.	1 ^m 930 à 2 ^m 100

Les fours communiquent entre eux, deux par deux, à l'aide de carneaux verticaux formant pieds-droits, afin d'obtenir un chauffage plus régulier. Les carneaux verticaux débouchent tous dans un carneau horizontal qui règne sur toute la longueur des fours à leur partie inférieure et qui sert de chambre de combustion. La marche des gaz est la suivante : les gaz sortent des fours par vingt-huit ouvertures ménagées dans les parois de gauche et se répandent dans la chambre de combustion. Ils descendent par les pieds-droits et gagnent un carneau horizontal établi sous la sole ; là ils cheminent vers l'avant du four, puis ils se mélangent aux gaz du four voisin dans le pied-droit commun et reviennent ainsi à l'arrière du four, où ils trouvent un carneau commun à tous les fours

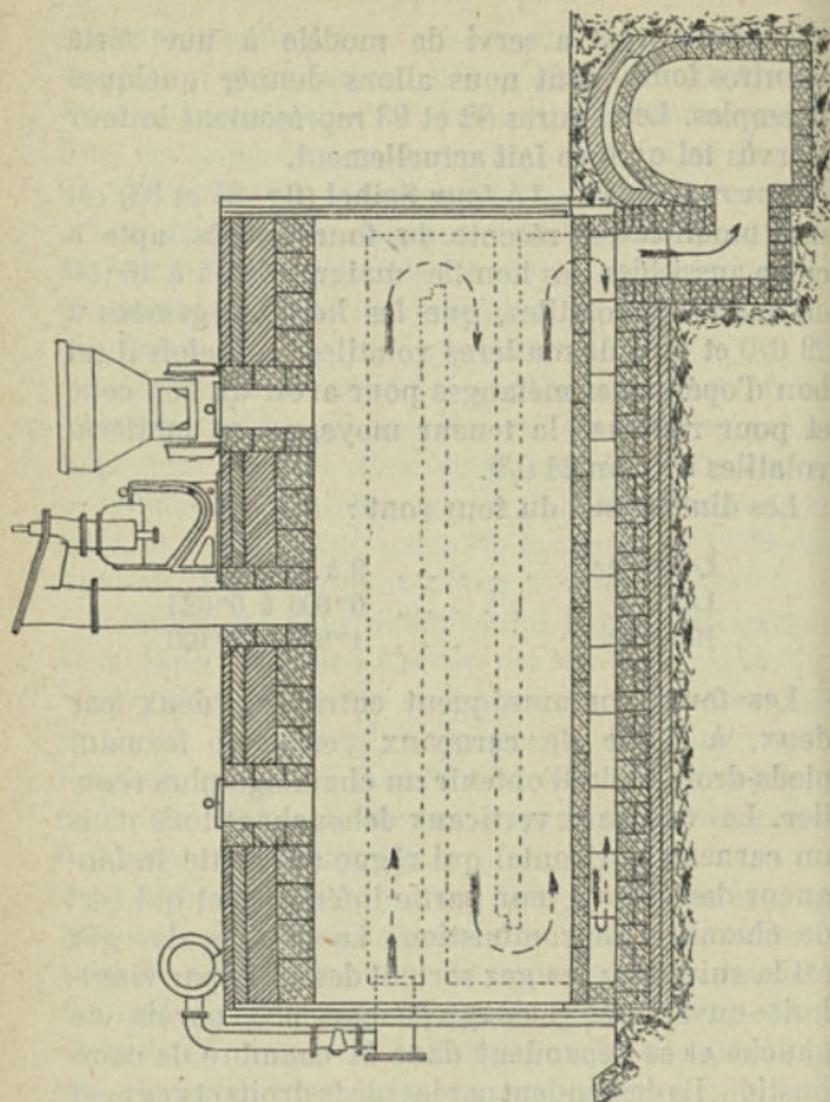


Fig. 84. Four Selbel (coupe longitudinale).

communiquant avec une galerie collectrice. Des registres permettent de régler la circulation des gaz sous les fours et de tenir compte pour cette circulation des diverses phases de la carbonisation

dans chaque four. On arrive ainsi à obtenir une cuisson identique dans les fours pairs et dans les fours impairs qui, comme nous l'avons déjà dit pour le four Coppée, sont chargés successivement et non point simultanément.

En raison de la circulation des gaz sous la

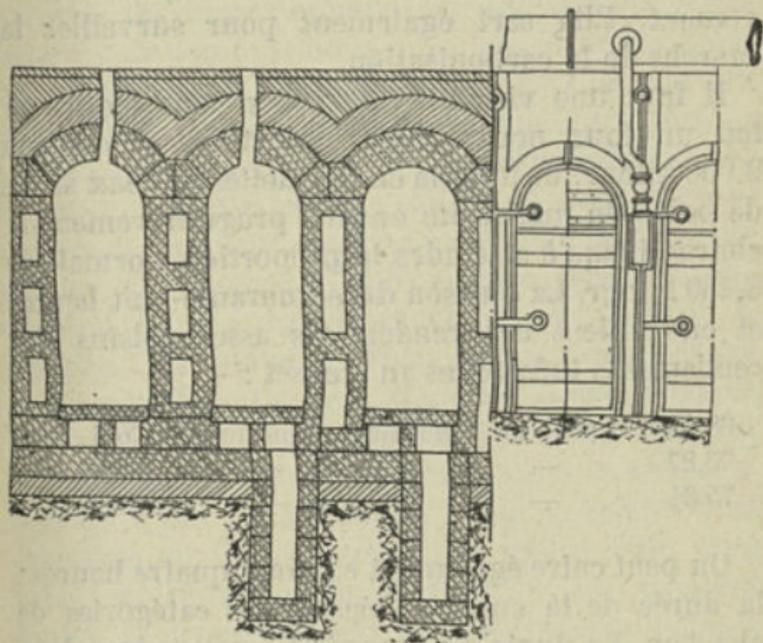


Fig. 85. Four Scibel (coupe transversale).

sole, il faut rafraîchir par une circulation d'air le massif de fondation des fours. Pour cela sur le massif en béton on construit quatre voûtes qui servent de support à un dallage en briques réfractaires surmonté de lignes formées de trois briques à plat avec des ouvertures en chicane. Un tel quadrillage est bien fait pour la circulation de l'air.

Là-dessus on établit la base du four puis la sole et les pieds-droits ; les fours sont fermés par des portes en fonte avec garnissage intérieur en briques réfractaires.

En haut de la porte il y a une ouverture fermée par un clapet permettant de passer une raclette pour égaliser la surface de la houille après le chargement. Elle sert également pour surveiller la marche de la carbonisation.

Il faut une vingtaine de jours pour mettre en feu un four nouvellement construit et environ 9,000 kilogr. de houille en briquettes et deux stères de bois. On augmente ensuite progressivement la charge jusqu'à atteindre la proportion normale de 8,230 kilogr. La cuisson dure quarante-huit heures et on obtient des rendements assez voisins des rendements théoriques au creuset :

68,00	0/0	pour un rendement théorique de	70,5	0/0
75,27	—	—	76,65	—
75,34	—	—	76,92	—

On peut cuire également en vingt-quatre heures ; la durée de la cuisson dépend des catégories de charbon. La durée du four n'est pas la même dans les deux cas ; elle est de dix années pour des cuissons de quarante-huit heures et de quinze ans pour une marche par vingt-quatre heures.

Four Otto-Hoffmann. — Ce four est une modification du four Coppée et du four Carvès, en ce sens que l'air est chauffé avant son mélange avec les gaz. Au lieu d'un foyer comme dans l'appareil Carvès, ce sont des générateurs genre Siemens. Les dimensions de ce four sont les suivantes :

Longueur	10 ^m 00
Largeur	0 ^m 50
Hauteur	1 ^m 80

La charge est de 7,000 kilogr. et on obtient 5,000 kilogr. de coke, soit environ 70 0/0 du poids de la charge.

Le fonctionnement du four Otto-Hoffmann diffère de celui du four Coppée ; les gaz sortent de la chambre de combustion et viennent se brûler dans des carneaux sur une grande longueur le long des parois latérales ou sous la sole ; tous les carneaux verticaux étant reliés par un seul canal horizontal. La sole est divisée par une cloison en deux parties, qui communiquent chacune avec un régénérateur distinct. Les figures 86 et 87 nous montrent la disposition de ces régénérateurs A, qui servent à chauffer l'air destiné à brûler les gaz des appareils à récupération. Ces gaz viennent brûler sous la sole à une température de 1,200 à 1,400 degrés et montent par les carneaux verticaux à la température de 1,100 à 1,200 degrés pour se rendre à la cheminée où ils ont encore au moins 700°. Une valve de renversement permet, à un moment donné, de diriger les gaz en sens inverse suivant l'allure de la carbonisation et de chauffer ainsi les régénérateurs et ultérieurement l'air qui y sera admis.

Les gaz sortant des fours Hoffmann sont exempts de poussière et peuvent servir soit à l'éclairage, soit aux moteurs, car sur le volume total des gaz il reste disponible environ le tiers pour l'éclairage et la force motrice, ce qui viendra en déduction sur le prix de l'installation du four.

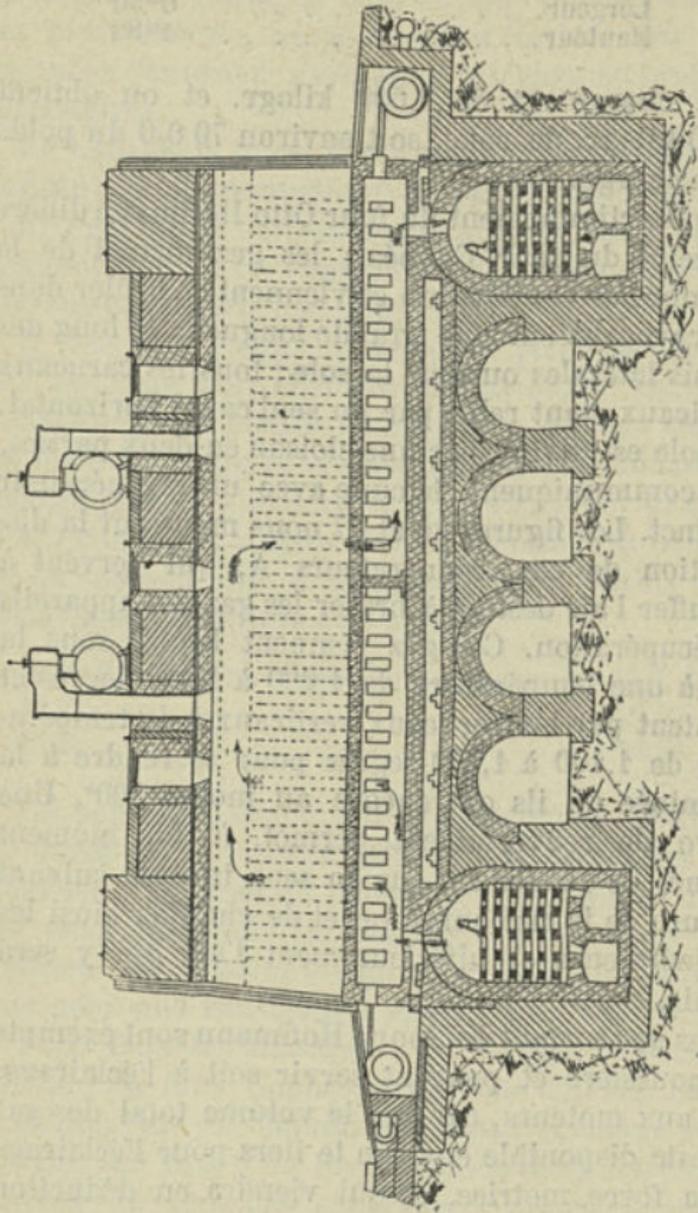


Fig. 86. Four Otto-Hoffmann (coupe en long).

On a cherché à obtenir une combustion complète des gaz et à utiliser le mieux possible leur rendement calorifique ; pour cela, on les fait sou-

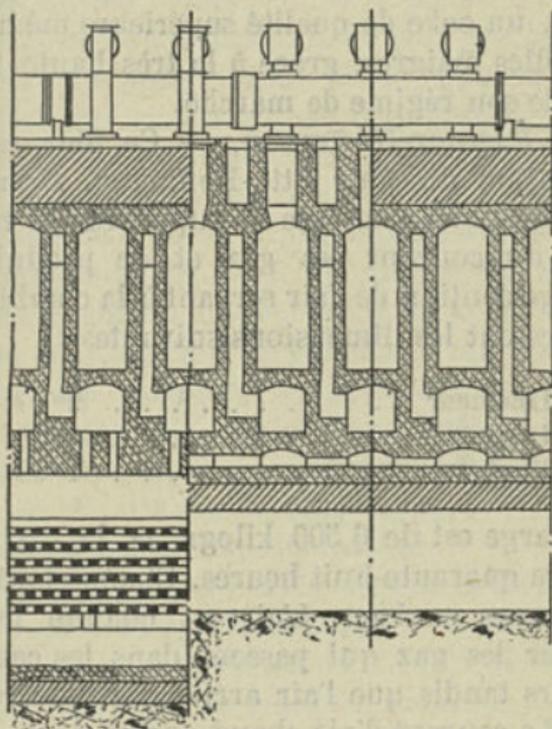


Fig. 87. Four Otto-Hoffmann (coupe en travers).

vent passer dans des brûleurs spéciaux du système *Lürmann*, qui ont pour principaux caractères :

1° D'échauffer à haute température l'air dans les carneaux le long des parois de la chambre de combustion et sur la voûte de celle-ci ;

2° De donner une flamme courte très chaude, par l'arrivée, à un même niveau ou à travers des fentes étroites, du mélange intime des gaz et de

l'air chauffé et par leur combustion dans une grande chambre de combustion placée en avant des chaudières.

On obtient avec le four Otto, malgré sa grande largeur, un coke de qualité supérieure même avec les houilles maigres, grâce à la très haute température de son régime de marche.

Four Festner-Hoffmann. — Ce four est une modification du four Otto-Hoffmann. Il présente sur ce dernier l'avantage de supprimer le renversement du courant des gaz et de produire un chauffage continu de l'air servant à la combustion. Ces fours ont les dimensions suivantes :

Longueur	9 ^m 00
Largeur	0 ^m 58
Hauteur	1 ^m 80

La charge est de 6,500 kilogr. et la carbonisation dure quarante-huit heures. Chaque four coûte 5,000 francs environ. L'air est chauffé latéralement par les gaz qui passent dans les carneaux inférieurs tandis que l'air arrive par d'autres carneaux. Le courant d'air chaud arrive dans le carneau supérieur et se mélange avec les gaz au moment où ils sortent du four ; l'air possède en ce moment une température de 900 degrés au minimum.

IV. CONDITIONS A REMPLIR POUR OBTENIR UN BON COKE

Pour avoir une bonne carbonisation, on doit broyer le charbon en un grain de quatre milli-

mètres. Plus le grain du charbon est fin, plus le coke est compact et plus la perte du combustible est faible. Plus les morceaux se rapprochent les uns des autres ; plus ils sont petits et serrés, mieux ils se carbonisent. Il ne faut pas toutefois exagérer cette pulvérisation et employer à la carbonisation des schlamms qui donneraient un coke compact mais inutilisable en métallurgie.

D'un autre côté, il est bon de mélanger une certaine quantité de gros ; tout dépend du modèle de four qu'on emploie. Ainsi, en Angleterre, avec les fours en ruche on obtient un bon coke avec du charbon dont le grain va jusqu'à 10 millimètres de grosseur. Un mélange de plusieurs qualités de charbons entre eux donne d'excellents résultats. Dans un four Coppée, on mélange 75 0/0 de houille grasse et 25 0/0 de houille maigre et le coke obtenu est d'une très bonne qualité.

En Allemagne, aux charbonnages du *Phœnix*, on mélange 73 à 77 0/0 de charbon à 25 ou 26 0/0 de matières volatiles avec 27 ou 23 0/0 de charbon maigre à 7 ou 8 0/0 de matières volatiles.

L'avantage qu'on trouve en opérant des mélanges de charbons maigres avec les charbons gras est d'augmenter le rendement en coke tout en conservant la qualité ; car nous avons vu que les houilles maigres et les anthracites donnent jusqu'à 85 et 90 0/0 de coke. En outre, le coke fabriqué avec de la houille maigre contient plus d'acide carbonique, tandis que la houille grasse à gaz donne un coke contenant de l'oxyde de carbone, ce qui a une grande importance pour les opérations métallurgiques.

Tableau du rendement en coke des différentes houilles

PROVENANCE DES HOUILLES		RENDEMENT EN COKE POUR 100	
Houilles françaises . . .	Bassin de Valenciennes . . .	Houille grasse	66 à 75
		Houille maréchale	75 à 79
		Houille demi-grasse	75 à 88
		Houille maigre	89 à 93
	Bassin du Pas-de-Calais		62 à 90
	Houilles d'Alais		78
	Houilles de Decazeville		60
	Houilles de Blanzy		56
	Houilles de Commentry		62
	Houilles de Rive-de-Gier		65 à 76
Houilles belges	Mons : fenus secs		63 à 67
	— fenus gras		68 à 71
	— fines forges		74 à 81
	Centre	Houille grasse	80 à 84
		Houille demi-grasse	77 à 85
	Charleroi	Houille grasse	77 à 84
		Houille demi-grasse	79 à 89
		Houille maigre	85 à 92
	Houilles anglaises	Pays de Galles	58 à 83
		Lancashire	52 à 62
Newcastle		51 à 63	
Houilles de la vallée de la Saar (Prusse)	Ecosse	45 à 56	
			57 à 69

Nous résumons, dans le tableau de la page précédente, le rendement en coke des différentes houilles de toutes provenances.

Le rendement dépend d'une manière générale : de la quantité d'oxygène et d'hydrogène du combustible, de la proportion d'humidité et de la teneur en cendres. Le choix du four a aussi une influence sur le rendement en coke. Dans les uns on cuira vite ; dans les autres, au contraire, la cuisson est lente ; on doit faire un choix du four en rapport avec la nature et la qualité des charbons qu'on a à carboniser.

La différence de rendement d'un four provient de la perte en carbone résultant de l'entrée de l'air pendant la carbonisation, de la façon dont on charge le four, de la fermeture plus ou moins bonne des portes et de la marche de la carbonisation ; il y a donc à exercer une surveillance sérieuse à la conduite d'un four à coke si l'on veut obtenir son maximum de rendement.

V. COMBUSTIBLES LIQUIDES

Les combustibles liquides sont en général des hydrocarbures qu'on emploie soit pour le chauffage industriel, soit en métallurgie ; ils sont naturels ou artificiels, c'est-à-dire le produit de la distillation.

En Russie, toutes les opérations métallurgiques se font dans des fours chauffés par le pétrole.

Aux Etats-Unis d'Amérique, il y a eu des usines de fer et d'acier chauffées au pétrole.

Quelle que soit la nature des hydrocarbures, on peut les employer de deux façons différentes :

1° Par vaporisation comme dans le foyer Deville ;
 2° Par pulvérisation avant l'inflammation à l'aide
 d'un pulvérisateur à jet d'air chaud ou de vapeur.

La puissance calorifique des combustibles liquides
 est assez grande, ainsi on note :

Pétrole brut.	}	11,000 à 12,000 cal. (puissance théorique)
		7,000 calories (puissance réelle)
Goudron de gaz . . .	}	9,000 calories (puissance théorique)
		8,500 calories (puissance réelle)
Huile de houille :		8,500 calories environ (puissance réelle)

VI. COMBUSTIBLES GAZEUX

Il y a plusieurs sortes de combustibles gazeux
 que nous allons parcourir rapidement.

1° *Gaz naturel*. C'est un gaz qui s'échappe de l'in-
 térieur de la terre par des puits creusés dans le
 sol et qu'on conduit aux lieux de consommation
 par des conduites étanches.

En Chine, où ils ont été employés, ils sont
 connus sous le nom de *puits de feu*.

En Amérique, on emploie ce gaz naturel, grâce
 aux ressources techniques modernes, pour tous les
 chauffages industriels. Pour cela on a installé des
 puits et des canalisations pour transporter ce gaz
 à de très grandes distances, où on l'emmagasine
 dans des gazomètres. Ce gaz se compose ainsi :

90 0/0 de gaz de marais	$C^2 H^4$
4 0/0 de gaz oléfiant	$C^4 H^4$
4 0/0 d'hydrogène libre	H
1 0/0 d'acide carbonique	CO^2

La puissance calorifique varie de 8,000 à 8,300

calories par mètre cube et de 10,500 à 11,000 calories par kilogramme.

2° *Gaz résidus*, comme par exemple ceux qui sortent des hauts fourneaux, composés d'oxyde de carbone, d'azote et d'acide carbonique.

La puissance calorifique est faible, elle varie de 700 à 800 calories par mètre cube et de 600 à 700 calories par kilogramme.

3° *Gaz préparés*. Ces gaz sont préparés de quatre manières différentes.

a) Par distillation en vase clos d'un combustible composé cru, comme par exemple le gaz d'éclairage.

b) Par combustion incomplète par l'air ; c'est *le gaz à l'air*.

c) Par l'action de la vapeur d'eau sur le carbone qui donne un combustible incandescent renfermant 50 0/0 d'hydrogène et 50 0/0 d'oxyde de carbone avec traces d'acide carbonique ; c'est *le gaz à l'eau*.

d) *Gaz produit par des gazogènes*, c'est-à-dire gaz produit par combustion incomplète avec distillation préalable sous une aire de distillation ; c'est-à-dire qu'il est produit par le mélange des trois modes précédents.

Nous allons donner une description sommaire de ces différents combustibles en nous étendant davantage sur ceux qui sont le plus employés.

VII. GAZ RÉSIDUS

Les fours employés dans les forges pour le puddlage, le réchauffage, etc., les hauts fourneaux etc., en raison de leur disposition et du travail qu'on y effectue, laissent échapper comme produits

Maître de forges. — T. I.

24

de la combustion des gaz possédant une très haute température, et on les emploie pour produire de la vapeur ou au chauffage de l'air. Ces gaz ne sont pas combustibles car ils ne contiennent que très peu d'éléments susceptibles de brûler ; ce sont des *flammes perdues*.

D'après les travaux d'Ebelmen, les gaz sortant des fours à puddler et des fours à réchauffer auraient la composition suivante :

	Fours à puddler	Fours à réchauffer
CO ²	12,5 volumes	17,3
CO	0,2	7,5
Az	78,5	82,0
O	0,2	4,8
H ² O	0	3,0

Les gaz provenant des hauts fourneaux se composent d'une partie de gaz combustibles diluée dans une grande masse de gaz inertes, c'est-à-dire de l'oxyde de carbone, accompagné d'hydrogène et d'hydrogène protocarboné avec de l'azote et de l'acide carbonique.

La proportion de ces divers éléments varie avec la marche des appareils métallurgiques. La composition que nous donnons ci-dessous peut être considérée comme une bonne moyenne, abstraction faite de l'eau en état de vapeur :

	En volume	En poids
Acide carbonique . . .	12	24
Oxyde de carbone . . .	24	17
Azote	60	58
Hydrogène	2	0,2
Protocarbure d'hydrogène	2	0,8

Le mètre cube de ce gaz développe 950 calories.

Le gaz qui sort des fours à coke renferme des éléments combustibles en proportion assez notable et comme il prend naissance à l'abri de l'air, sa valeur n'est pas amoindrie par la présence de l'acide carbonique et de l'azote en grande quantité.

Sa composition est analogue à celle du gaz d'éclairage, c'est-à-dire qu'il est très riche en hydrogène carboné et en hydrogène pur, avec de faibles quantités d'acide carbonique et d'azote. La nature de la houille carbonisée et le procédé de carbonisation ont une influence considérable sur la nature de ce gaz. Ainsi le gaz sortant des fours Otto-Hoffmann a la composition suivante :

Hydrogène	52,69
Protocarbure d'hydrogène CH^4	35,67
Gaz oléfiant CH^2	1,61
Benzine	0,60
Oxyde de carbone	6,41
Acide carbonique	1,39
Hydrogène sulfuré	0,42
Vapeur d'eau	1,21

Les gaz sortant des fours à coke, quand on ne recueille pas les sous-produits de la distillation, brûlent dans les carneaux servant à chauffer les fours, et comme ils possèdent encore une température assez élevée en se rendant à la cheminée, on les utilise à la production de la vapeur avant de les évacuer.

Lorsqu'on recueille les sous-produits, on divise les gaz en deux parties, l'une se rendant dans les carneaux des fours, l'autre servant à la production de la vapeur,

VIII. GAZ A L'AIR

Le gaz à l'air s'obtient par la combustion incomplète d'un combustible solide ; il renferme surtout de l'oxyde de carbone et tout l'azote de l'air ayant servi à la combustion incomplète.

La composition du gaz à l'air, théorique, c'est-à-dire en supposant que la combustion est réellement incomplète, sans formation d'acide carbonique et sans que le combustible renferme de matières volatiles, serait la suivante :

	En volume	En poids
Oxyde de carbone	34,3	34,3
Azote	65,7	65,7

Le poids du mètre cube de ce gaz serait 1 kilogr. 251 et son pouvoir calorifique de 824 calories.

Dans la pratique ces considérations purement théoriques ne se réalisent pas d'une façon complète.

Les combustibles carbonisés renferment presque tous de l'hydrogène et de l'azote, l'air renferme une certaine quantité de vapeur d'eau qui au contact du carbone incandescent se décompose en donnant naissance à de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone ; il est en outre difficile d'éviter la formation de l'acide carbonique, même en petite quantité. De toutes ces considérations résulte que l'on obtient un gaz de composition différente de celle que nous avons donnée plus haut.

D'après les analyses d'Ebelmen on a les compositions suivantes :

	Gaz produit avec du charbon de bois		Gaz produit avec du coke	
	En poids	En volume	En poids	En volume
Oxyde de carbone.	34,1	33,3	33,8	33,6
Azote	64,9	63,4	64,8	64,2
Acide carbonique.	0,8	0,5	1,3	0,7
Hydrogène	0,2	2,8	0,1	1,5
	100,0	100,0	100,0	100,0

Lorsque la fabrication du gaz à l'air se fait dans des mauvaises conditions, la proportion de l'acide carbonique est plus élevée, en même temps que celle de l'azote, tandis que celle de l'oxyde de carbone diminue.

Il y a deux faits tout à fait particuliers ayant une influence assez marquée sur la composition du gaz à l'air. D'abord, la température qui règne dans la chambre où se produit la combustion incomplète, autrement dit le *gazogène*, et d'autre part la porosité plus ou moins grande du combustible.

Si la température est bien élevée, la quantité de carbone qui s'unit à l'oxygène augmente et transforme, par conséquent, en oxyde de carbone l'acide carbonique qui a pris naissance au moment où l'air arrive en contact avec le carbone. Pour que cette transformation puisse se réaliser, il faut que l'air traverse une couche épaisse de combustible.

Nous avons dit qu'on devait donner la préférence aux combustibles carbonisés pour la fabrication du gaz à l'air, toutes les fois que ces combustibles sont des sous-produits d'autres opérations comme, par exemple, dans les usines à gaz. Dans le cas contraire, on se sert des combustibles crus

tels que le bois, la tourbe, le lignite, car une carbonisation préalable de ces combustibles augmenterait inutilement le prix de revient du gaz et ensuite on sacrifie l'hydrogène, les carbures d'hydrogène, l'oxyde de carbone qui se dégagent à la distillation et qui ont un pouvoir calorifique considérable, en même temps qu'ils augmentent les gaz réellement combustibles au milieu desquels se trouve noyé l'azote.

Donc, le gaz obtenu avec les combustibles crus est de qualité meilleure que celui obtenu avec les combustibles carbonisés ; sa composition dépend également de la température du gazogène et de l'état physique du combustible et principalement de la teneur en matières volatiles.

La composition suivante peut être prise comme une moyenne :

	En volume	En poids
Oxyde de carbone	25,5	29,5
Protocarbure d'hydrogène	2,0	1,3
Hydrogène	8,3	0,6
Acide carbonique	4,8	8,9
Azote.	59,4	59,7
	<hr/> 100,0	<hr/> 100,0

La teneur en acide carbonique varie en plus ou en moins de 8 0/0 à 0,5 0/0, suivant que la carbonisation a lieu dans des conditions plus ou moins défavorables.

Le poids du mètre cube de ce gaz est de 1 kilogr. 179 à 0° et 0^m 760 de pression ; son pouvoir calorifique est de 1,035 calories.

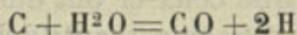
Lorsqu'on fabrique du gaz à l'air il se produit au

commencement une *distillation*, c'est-à-dire une séparation de la partie fixe des éléments volatils, suivie de la transformation du carbone en oxyde de carbone. Cette dernière opération, dite *gazéification*, dégage de la chaleur dont une partie est employée pour la distillation.

Les produits de distillation renferment une proportion considérable de goudron, si on opère en basse température; ils sont, au contraire, très riches en gaz utilisables, si la température est plus élevée.

La vapeur d'eau contenue dans l'air a une grande influence sur la composition du gaz. Si elle traverse une couche épaisse de combustible, elle se décompose au contact du carbone incandescent en produisant de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone qui se mélangent au gaz et l'enrichissent, puisque la quantité d'azote n'a pas changé. Cette décomposition de l'eau absorbe une quantité de chaleur assez considérable.

En effet, la réaction qui s'opère est la suivante :



un kilogramme de vapeur transforme en gaz les 2/3 kilogr. de C; d'autre part, la décomposition de l'eau absorbe autant de chaleur qu'en a dégagée sa formation. Or, l'eau se compose en poids de 1/9 d'hydrogène et de 8/9 d'oxygène, par conséquent, la décomposition de 1 kilogr. de vapeur d'eau exigera :

$$\frac{28.780}{9} = 3.198 \text{ calories}$$

et les $\frac{2}{3}$ de C en s'oxydant dégagent :

$$\frac{4.947}{3} = 1.649 \text{ calories}$$

$$3.498 - 1.649 = 1.849 \text{ calories}$$

représente donc le refroidissement causé par la décomposition de 1 kilogr. de vapeur d'eau. Il en résulte donc un refroidissement de la température du gazogène et si celui-ci se trouve à la température strictement nécessaire pour produire le minimum d'acide carbonique, l'introduction de l'eau a un très fâcheux résultat.

Tous les combustibles solides peuvent être utilisés pour la production du gaz à l'air mais on n'obtient ni les mêmes quantités, ni la même qualité des gaz, lesquelles dépendent de la composition chimique de la matière employée.

Le bois, la tourbe et, en général, tous les combustibles qui contiennent de grandes quantités d'eau, même après séchage à l'air, fournissent peu de gaz une fois que ceux-ci ont été dépouillés par condensation de l'énorme quantité de vapeur d'eau qu'ils entraînent.

L'oxygène en excès se combine avec l'hydrogène pour former de l'eau diminuant encore le volume de gaz utile ; les combustibles très hydrogénés fournissent un gaz riche en hydrogène et en hydrocarbures.

La houille à flamme courte produit un gaz pauvre en produits hydrogénés, aussi ce sont les houilles sèches à longue flamme que l'on choisit de préférence pour la fabrication qui nous occupe ;

les houilles grasses donnent un très bon gaz, mais elles présentent l'inconvénient de s'agglomérer en masses énormes à travers lesquelles l'air passe très difficilement.

Les houilles maigres à courte flamme donnent un gaz moins riche ; et d'une façon générale, plus le combustible renferme d'eau, plus la température du gazogène est basse et le gaz qu'on obtient renferme de l'acide carbonique en plus grande quantité.

Les combustibles crus produisent un gaz contenant moins d'azote que ceux carbonisés et cela se comprend facilement, parce que, à la distillation, se dégagent des carbures d'hydrogène et qu'il ne faut fournir de l'air qu'à la quantité de carbone fixe restant ; le charbon de bois et le coke ne donnent que de l'oxyde de carbone, par conséquent ils ont besoin d'une plus grande quantité d'air. Le tableau suivant donne les poids et volumes du gaz exempt de vapeur d'eau produit par 1 kilogr. de divers combustibles supposés secs et sans cendres :

Nature du combustible	Volume	Poids
Bois	2 ^m 2	2 ^k 8
Tourbe et lignite récemment formé.	2 8	3 4
Lignite d'ancienne formation.	3 4	4 0
Houille	4 5	5 4
Coke et charbon de bois	6 5	8 0

Les gaz sortant du gazogène possèdent une température très élevée, variant de 300 à 1,000 degrés, suivant qu'ils proviennent de combustibles crus très chargés d'eau ou de combustibles carbonisés,

IX. GAZOGÈNES

On appelle gazogènes ou générateurs de gaz, les appareils servant à la fabrication du gaz à l'air. La partie essentielle d'un gazogène est une chambre A (fig. 88), munie d'une ou plusieurs ouver-

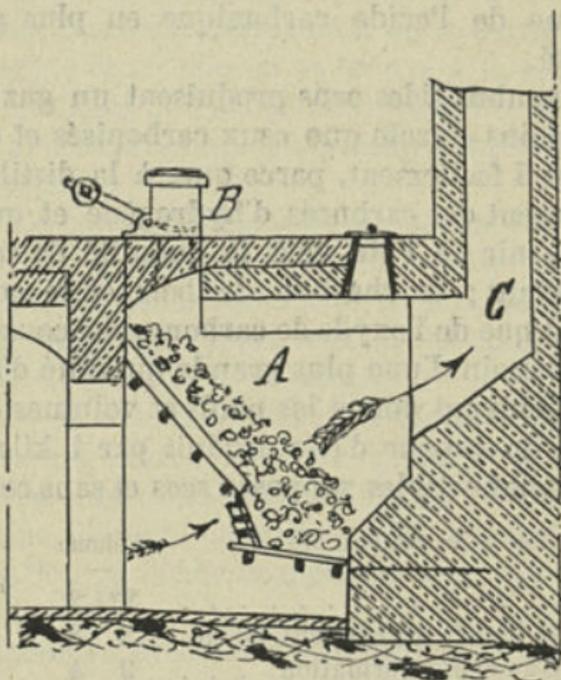


Fig. 88. Composition d'un gazogène.

tures de chargement B du combustible solide, à fermeture étanche ; d'une entrée pour l'air destiné à produire la combustion incomplète, qui d'ordinaire, est formée par l'espace vide entre les barreaux de la grille, car l'air doit traverser la couche de

combustible de bas en haut; d'un orifice C pour la sortie du gaz produit.

La formation du gaz s'opère à l'endroit où le combustible incandescent est rencontré par l'air introduit : la chaleur dégagée par cette combustion partielle, est employée en partie à évaporer l'eau en présence, en partie à opérer la distillation des composés volatils. Les produits gazeux sortant du gazogène emportent l'excédent comme chaleur sensible. Les gazogènes ont une marche continue, à condition qu'ils soient alimentés de combustible et que l'air y arrive sans interruption.

La circulation des gaz, tant dans l'appareil que dans les conduites qui se dirigent vers les fours, est produite, soit par simple tirage naturel, soit par une machine soufflante, qui envoie l'air dans le gazogène sous une certaine pression.

Aujourd'hui, on a abandonné tous les appareils à tirage naturel, qui ont l'inconvénient de donner des résultats bien différents, suivant que les conditions atmosphériques varient elles-mêmes.

Nous avons déjà dit qu'une forte pression favorise la formation de l'oxyde de carbone, tandis qu'au contraire, une faible pression donne lieu à la production de l'acide carbonique. Or, dans un appareil à tirage naturel, la pression est au-dessous de la pression atmosphérique; le vent soufflé donne au contraire une pression supérieure et réglable à volonté, ce qui assure au gazogène une allure convenable.

En dehors de ces considérations théoriques, il y a aussi la question de l'installation des appareils, les uns par rapport aux autres.

Le gazogène à tirage naturel doit être installé plus bas que le four qu'il alimente, pour que les gaz chauds circulent par leur force ascensionnelle seule. Cette obligation conduit par conséquent à placer les gazogènes au-dessous du sol, ce qui est une complication sérieuse, et entraîne à une dépense supplémentaire.

Les gazogènes soufflés se placent n'importe où, car la circulation des gaz est assurée par un courant d'air à pression constante.

L'air injecté arrive sous la grille et pénètre à travers les barreaux ; il faut donc que le cendrier soit hermétiquement clos, soit à l'aide d'une porte, soit à l'aide d'une cloche, comme dans les gazogènes cylindriques (fig. 89), le joint étant hydraulique en haut et en bas et la cloche équilibrée. Le vent arrive par un canal souterrain et débouche tout autour de la grille.

Nous verrons plus loin qu'on peut supprimer la grille des gazogènes et la remplacer par un tas de mâchefers ; dans ce cas, l'air doit arriver au-dessus de ce tas.

Dans bien des cas, on emploie des gazogènes sans grilles, soufflés comme les hauts fourneaux, au moyen de tuyères disposées à une certaine hauteur au-dessus de la sole ; il est alors nécessaire que les cendres du combustible se transforment en scories liquides, pour les faire écouler par un orifice situé au point le plus bas, et ordinairement bouché par un tampon d'argile.

Pour rendre ces scories liquides, il suffit d'ajouter à chaque charge de combustible une petite quantité de calcaire, calculée d'après la nature des cendres.

Le soufflage par tuyères présente les avantages suivants :

1° Pas de perte de combustible à travers des grilles ;

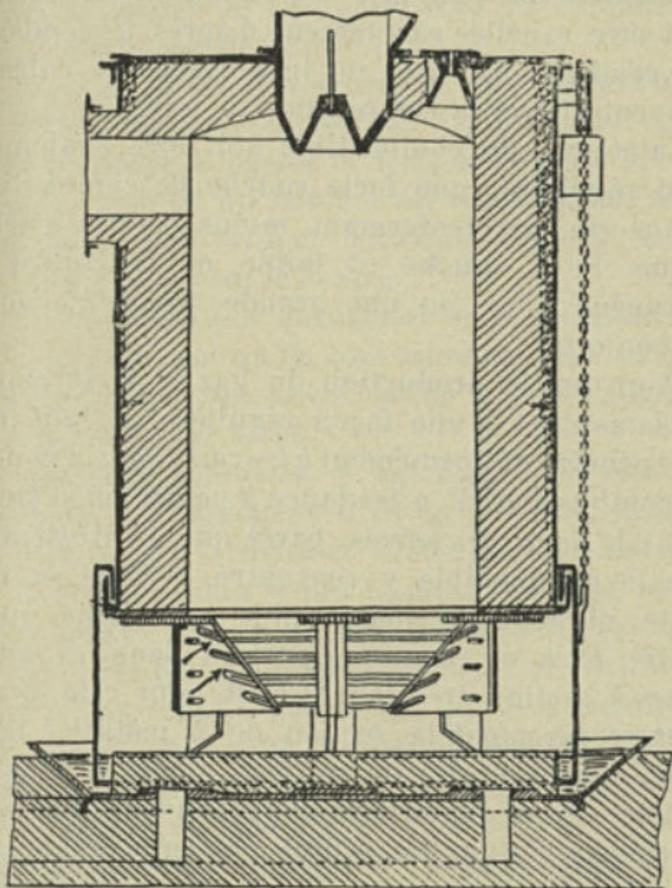


Fig. 89. Gazogène cylindrique.

2° Soufflage continu, tandis qu'avec les grilles, il faut arrêter de temps à autre pour opérer le décrassage ;

Maître de forges. — T. I.

25

3° Le calcaire ajouté sert en même temps de désulfurant, ce qui n'est pas indifférent pour certaines opérations métallurgiques. Néanmoins, on ne peut employer qu'un combustible dont la teneur en cendres est régulière, car l'addition du calcaire doit être calculée exactement d'après le poids de ces cendres; un excès ou insuffisance de calcaire peuvent altérer la composition du gaz.

La couche du combustible doit être également bien régulière; une forte couche de combustible donne un gaz renfermant moins d'acide carbonique. Si la couche est faible, on rencontre de l'oxygène libre, ou une grande quantité d'acide carbonique.

Pour que la production du gaz se fasse convenablement et d'une façon régulière, il faut que l'air pénètre uniformément à travers toute la couche de combustible. Il a tendance à passer plus facilement le long des parois, parce que le frottement que le combustible y rencontre, retarde sa descente et rend la masse plus perméable qu'au centre. Cela se remarque surtout dans les gazogènes à section très large; c'est pour cela qu'on dépasse rarement la section de 2 mètres à l'endroit le plus étroit; on se tient même à 1^m 50 et 1 mètre. Si la quantité de gaz est insuffisante pour la consommation, on réunit plusieurs gazogènes en batterie.

La répartition du courant gazeux est meilleure quand on rétrécit la chambre vers le bas, c'est-à-dire vers le point où l'air vient en contact avec le combustible. De cette façon, l'air se trouve plus au centre de la masse et ne peut gagner les parois

qu'en faisant un plus long parcours. Cette disposition ne convient pas aux houilles grasses, qui descendent irrégulièrement.

On obtient également un résultat analogue en plaçant l'entrée de l'air d'un côté de l'appareil et la sortie du gaz de l'autre côté.

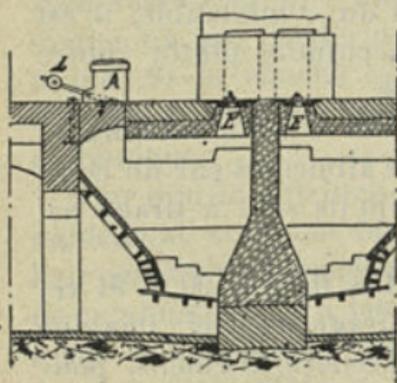
La position des ouvertures de chargement a son influence sur la composition du gaz. L'air ayant une tendance à passer le long des parois et à se soustraire ainsi au contact du combustible, il est préférable que celui-ci s'accumule plutôt contre les parois que vers le centre.

Les modèles des gazogènes sont nombreux et diffèrent suivant qu'ils sont alimentés par un combustible ou par un autre, qu'ils sont à tirage naturel ou à tirage forcé.

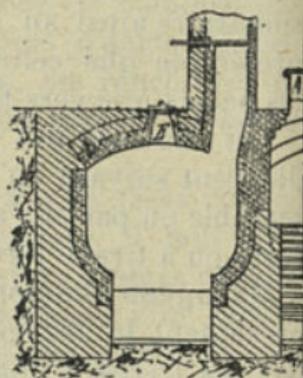
Gazogène Siemens. — Les figures 90 et 91 représentent le gazogène à tirage naturel, imaginé par les frères William et Frédéric Siemens, pour brûler des houilles et des lignites, employé encore aujourd'hui dans un grand nombre d'usines. Ils sont réunis par groupes de quatre, et établis au-dessous du sol; les gaz de ces quatre chambres se réunissent dans une même cheminée verticale, située au centre du massif. La paroi intérieure de la chambre, du côté du chargement, est inclinée suivant un angle de 50 à 70°, et se termine en bas par une grille à gradins. Le combustible est chargé par une trémie, ou boîte de chargement A, composée d'une caisse en fonte, pourvue d'un couvercle dont les bords plongent dans une rigole remplie d'eau ou de goudron, pour rendre la fermeture hermétique. Au fond de la boîte, se trouve une

valve V qu'on manœuvre du dehors au moyen d'un levier à contrepoids L.

La boîte étant remplie de combustible, on place le couvercle, et après cette opération seulement on actionne le levier pour ouvrir la valve et faire tomber le combustible dans la chambre où il se convertit en gaz ; on évite ainsi toute perte de gaz et toute introduction d'air. Le combustible chargé



90



91

Fig. 90 et 91. Gazogène Siemens.

glisse le long du plan incliné et s'étale sur la grille à gradins, formant une couche qui est traversée par l'air.

Sur le toit se trouvent trois orifices E, par où on passe les piques destinées à égaliser le combustible et briser les voûtes qui peuvent se former.

La manœuvre et le service de la grille se font par la fosse F, couverte par une voûte présentant les ouvertures nécessaires à la manœuvre ; les fosses des gazogènes voisins communiquent entre elles.

Ces gazogènes peuvent fonctionner à tirage forcé ; il suffit de fermer les cendriers avec des portes en tôle et amener le vent sous la grille.

Gazogène Sailleurs. — Ce gazogène, représenté figure 92, a été employé avec des houilles collantes. Les cendres du combustible sont fondues et s'écoulent à l'état liquide par des trous D, ménagés à cet effet dans la partie basse de la chambre.

La chambre est plus large en bas qu'en haut, ce qui facilite la descente des houilles qui ont tendance à se coller aux parois ; les tuyères B font saillie à l'intérieur pour que le vent atteigne plus sûrement le milieu de la chambre ; elles sont à courant d'eau ; sans quoi elles ne résisteraient pas à la température de cette région.

De plus une série de caisses C à eau logées dans les parois mêmes de la chambre protègent ces dernières contre l'action des scories rendues plus fluides par l'addition du calcaire. Une ouverture O, fermée habituellement, sert en cas de réparations dans la chambre.

La boîte de chargement est fermée par un couvercle qui se manœuvre au moyen d'une chaîne et de contrepoids ; à sa partie inférieure la boîte se termine en entonnoir dont les bords portent sur un cône qui remplit le rôle de soupape. Ce mode de chargement a l'avantage d'accumuler la houille le long des parois, c'est-à-dire dans la région où les gaz ont le plus de tendance à passer.

On donne au vent une pression de 10 à 20 centimètres d'eau pour qu'il puisse traverser la masse plus ou moins agglomérée. La température des gaz à la sortie du gazogène varie entre 700 et 900°.

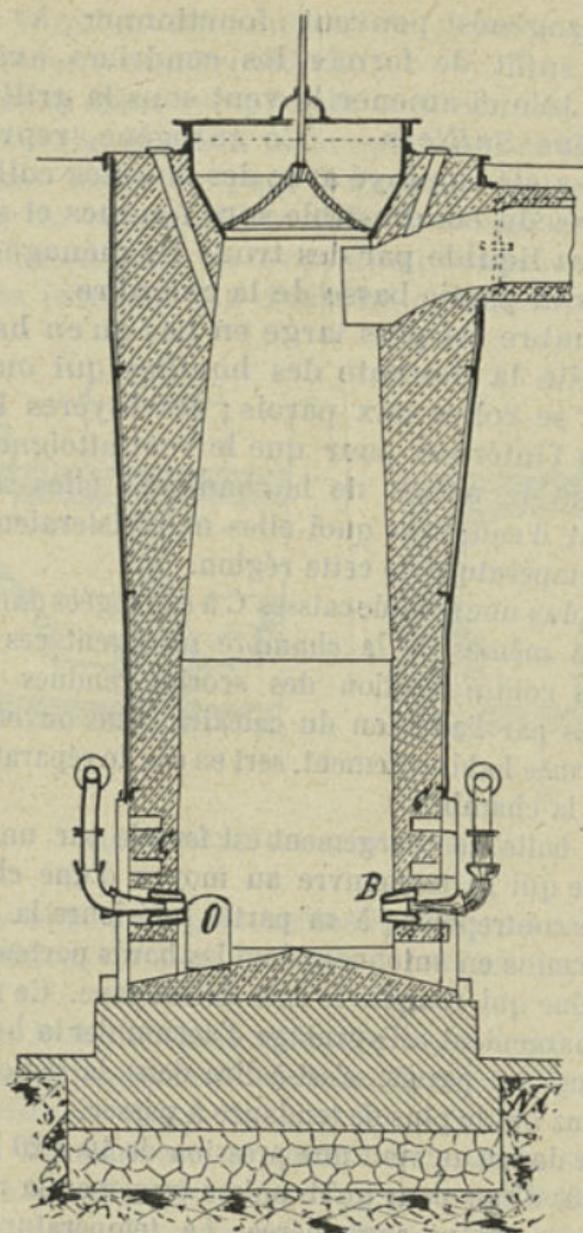


Fig. 92. Gazogène Saillers,

ils contiennent de 1 à 2 0/0 d'acide carbonique:

Gazogène de l'aciérie du Phœnix. — La figure 93 représente le gazogène employé aux aciéries du Phœnix. La chambre est formée d'un cylindre terminé par une partie conique arrivant à la grille. Le vent est amené sous la grille par deux buses. Au sortir de la chambre, le gaz passe par un

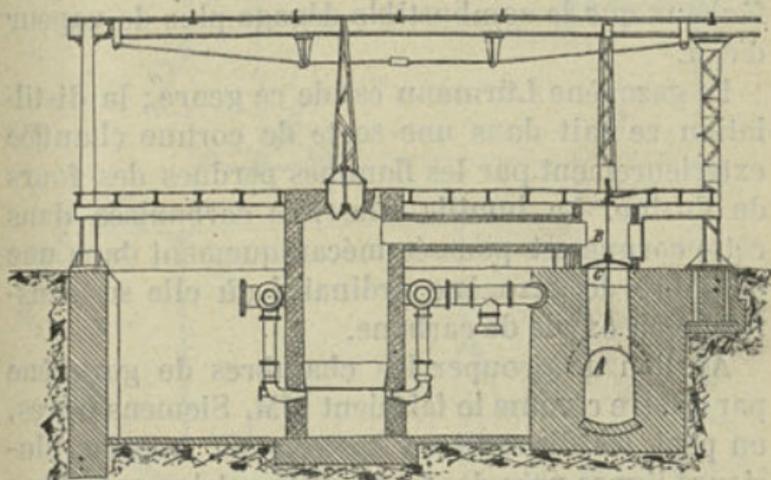


Fig. 93. Gazogène soufflé du Phœnix.

conduit B muni d'une soupape C, qui permet d'isoler le gazogène lorsque cela est nécessaire, aboutissant à un conduit plus grand A commun à tous les gazogènes. La boîte de chargement est du même système que dans le gazogène Saillers. Le vent est fourni sous les grilles avec une pression de 85 millimètres d'eau ; cette pression diminue dans la traversée de la chambre et n'est plus que 50 millimètres près des fours. On mélange au vent une petite quantité de vapeur pour empêcher la

formation des mâchefers sur les grilles et aussi pour fournir un gaz plus riche en hydrogène.

On a souvent essayé de construire des gazogènes dans lesquels la zone de distillation fût séparée de celle de gazéification ; on voulait ainsi éviter l'effet produit sur la nature du gaz par le refroidissement provenant de l'introduction d'une charge nouvelle et de sa distillation, effet d'autant plus fâcheux que le combustible dégage plus de vapeur d'eau.

Le gazogène Lürmann est de ce genre ; la distillation se fait dans une sorte de cornue chauffée extérieurement par les flammes perdues des fours de l'usine. La houille une fois carbonisée dans cette cornue est poussée mécaniquement dans une chambre de gazogène ordinaire où elle se transforme en oxyde de carbone.

Au lieu de grouper les chambres de gazogène par quatre comme le faisaient MM. Siemens frères, on peut les disposer en batterie sur une ou plusieurs lignes près des fours utilisant les gaz. Avec le vent forcé on n'a pas à se préoccuper du niveau auquel on doit les placer et on les place, pour la facilité de la manœuvre, de telle façon que la plate-forme supérieure des gazogènes soit au niveau du plancher de travail des fours. Au devant des grilles on installe une voie permettant le rapide enlèvement des cendres et des mâchefers ; une autre voie au-dessus du plancher supérieur amènera le combustible soit sur la plate-forme, soit dans des magasins situés au-dessus des boîtes de chargement.

Il est bon que chaque four ait ses gazogènes indépendants, la production de gaz et sa consom-

mation étant surveillées par les mêmes hommes ; on attribue donc à chaque four le nombre nécessaire de gazogènes plus un qui reste en attente ou en nettoyage. Le décrassage se fait alternativement

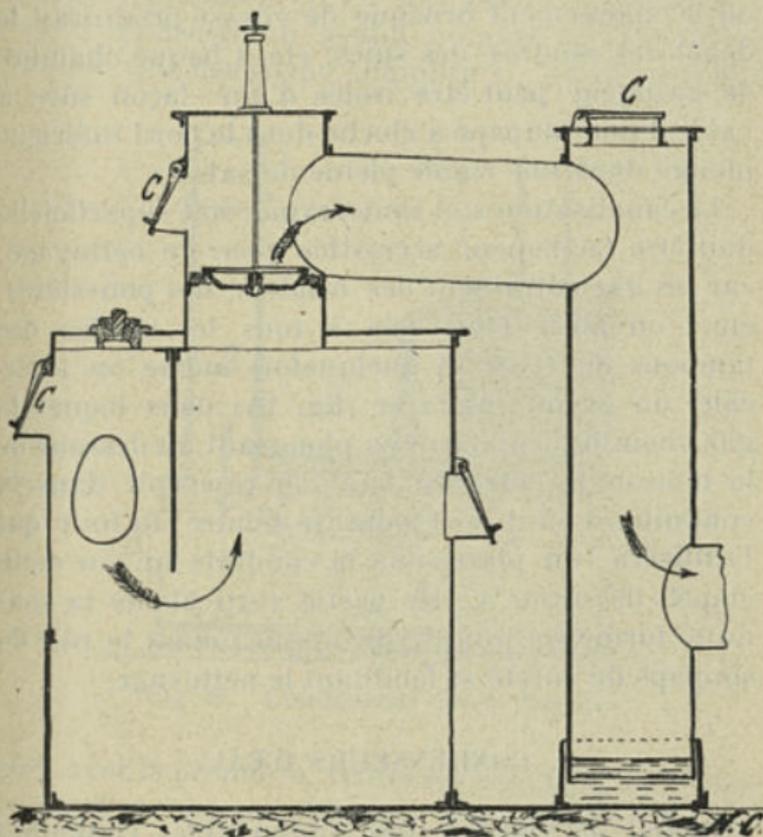


Fig. 94. Conduite avec réservoir de sûreté.

sur chaque grille isolée du groupe momentanément, sans qu'il se produise de modification dans l'allure ou la composition du gaz.

Le gaz de tous ces gazogènes serait versé dans

un collecteur placé entre le producteur du gaz et l'appareil consommateur. On divise ce collecteur en deux parties par une cloison verticale ne montant pas jusqu'au plafond ; l'arrivée du gaz est disposée en plongeant vers le bas du premier compartiment où le changement brusque de vitesse produirait le dépôt des cendres, des suies, etc. Chaque chambre de gazogène peut être isolée d'une façon sûre à l'aide d'une soupape à cloche dont le bord inférieur plonge dans une rigole pleine de sable.

La canalisation soit souterraine, soit superficielle doit être facilement accessible pour le nettoyage, car les gaz entraînent des cendres, des poussières, etc. ; on place pour cela à tous les coudes des tampons de visite et quelquefois même on intercale un grand réservoir (fig. 94) dans lequel le gaz chemine lentement en plongeant au-dessous de la cloison et entre en haut du réservoir dans la conduite, d'où il sort pour se rendre au four qui l'utilisera ; on place sous la conduite un ou deux clapets de sûreté C. La partie verticale de la conduite forme un joint hydraulique jouant le rôle de soupape de sûreté et facilitant le nettoyage.

X CONDENSEURS D'EAU

Quand on emploie des combustibles contenant beaucoup d'eau, il peut être avantageux d'installer des appareils condenseurs afin de donner au gaz le maximum de température. Quelquefois il suffit de faire passer le gaz dans un simple tuyau de grand diamètre exposé à l'air ; le gaz y circule lentement en se refroidissant.

On obtient un résultat plus complet en mettant le gaz en contact avec de l'eau pulvérisée et souvent renouvelée. La figure 95 représente le laveur-condenseur Zandin, composé d'une grande chambre A dans laquelle arrive le gaz par la conduite B, et où il rencontre un grand nombre de filets d'eau froide. Une deuxième chambre C, en communica-

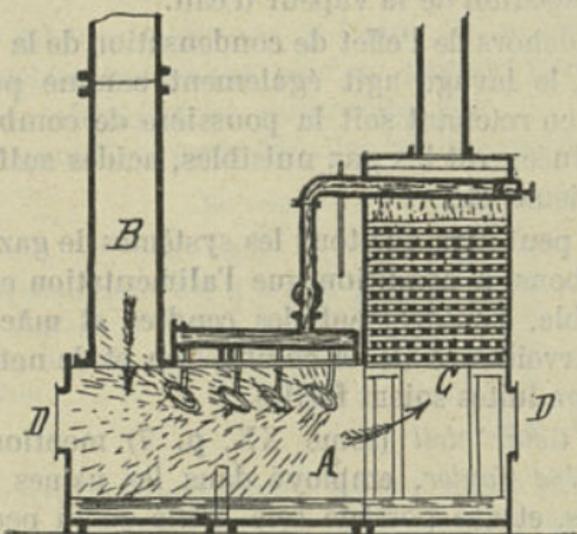


Fig. 95. Condenseur d'eau Zandin.

tion avec la première, renferme une série de grilles en fer disposées en chicanes et constamment arrosées. Le gaz passe au travers de ces grilles et l'eau de lavage mélangée avec le liquide condensé s'écoulent ensemble par un trou ménagé en bas de l'appareil. Des trous d'hommes D permettent le nettoyage des chambres A et C.

Le refroidissement du gaz est une perte de chaleur et, par conséquent, il faut l'éviter toutes les

fois qu'il n'y a pas un excès de vapeur d'eau à éliminer.

Aujourd'hui, lorsque le gaz provient de houille ou de lignite ancien, on ne le refroidit pas, mais quand on veut obtenir de hautes températures de combustion avec du gaz de bois, de tourbes ou de lignites ordinaires, il faut absolument opérer la condensation de la vapeur d'eau.

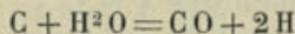
En dehors de l'effet de condensation de la vapeur d'eau, le lavage agit également comme purificateur, en retenant soit la poussière de combustible entraînée, soit les gaz nuisibles, acides sulfureux, arsénieux, etc.

On peut dire que tous les systèmes de gazogènes sont bons, à condition que l'alimentation en combustible, l'enlèvement des cendres et mâchefers, la surveillance de la combustion et le nettoyage des conduites soient faciles.

Le *Génie civil* (tome XX, p. 7) mentionne le *gazogène Taylor*, employé dans les usines américaines, et qui possède une grille qu'on peut animer d'un mouvement de rotation intermittent ou continu, dont l'effet est d'expulser les mâchefers et les escarbilles qui s'accumulent au bas de l'appareil.

Gaz à l'eau

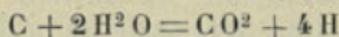
Le gaz à l'eau est obtenu par la décomposition de l'eau par le carbone incandescent :



on aura ainsi un gaz dont la composition sera :

	En volume	En poids
Hydrogène.	50	6.70
Oxyde de carbone.. . . .	50	93.30
	<u>100</u>	<u>100.00</u>

Cette réaction ne se produit qu'au rouge blanc ; à 500 degrés, c'est-à-dire au rouge sombre, on a :



Pour fabriquer du gaz à l'eau, on se sert de combustibles contenant peu ou pas de matières volatiles, tels que coke, anthracite, etc.

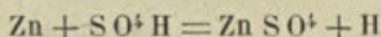
Sa composition varie dans les limites suivantes :

	En volume		En vol.	En poids
Azote. de	8 à 1	} soit en moyenne	4.5	7.8
Acide carbonique .	4.5 à 6		3.5	9.9
Gaz des marais. .	4 à 0		1.0	1.0
Oxyde de carbone.	45 à 40		43.0	75.4
Hydrogène	44 à 53		48.0	5.9
			<u>100.0</u>	<u>100.0</u>

Le pouvoir calorifique de ce gaz serait de 3.630 calories, et un mètre cube pèserait 0,71 kilogr. ; sa température de combustion est de 2.740 degrés, au lieu de 1.950 degrés que donne le gaz à l'air ; il produit en brûlant 2.580 calories.

Le gaz à l'eau possède donc un pouvoir calorifique plus considérable, et il ne contient pas, ou du moins très peu d'azote ; sa combustion donne par conséquent de très hautes températures sans chauffage préalable.

On a essayé d'obtenir le gaz à l'eau par la décomposition de l'eau par le zinc, en présence de l'acide sulfurique, suivant la formule :



Pour un mètre cube d'hydrogène, comme on peut faire le calcul d'après cette formule, il faut 4 kg. 412 d'acide sulfurique à 66° et 2 kg. 929 de zinc, et l'on a pour résidu 7 kg. 724 de sulfate de zinc anhydre, ou 13 kg. 251 de sulfate hydraté à sept équivalents d'eau. Si, au lieu d'employer le zinc on se sert du fer, pour un mètre cube d'hydrogène il faut 2 kg. 518 de fer et 4 kg. 409 d'acide sulfurique, avec un résidu de 13 kg. 216 de sulfate hydraté.

Nous donnons plus loin les procédés actuellement en usage pour la fabrication du gaz à l'eau.

XI. DÉCOMPOSITION DE LA VAPEUR D'EAU PAR LE FER OU LE CHARBON EN IGNITION

Décomposition par le fer. — On fait passer à travers une cornue chauffée au rouge et chargée de fer en petits morceaux, de la vapeur d'eau par l'une des extrémités de la cornue et on recueille à l'autre, au moyen d'un tube de dégagement, de l'hydrogène; l'oxygène de l'eau se combine au fer pour faire de l'oxyde de fer, $\text{Fe}^3 \text{O}^4$, on obtient environ 53,8 mètres cubes d'hydrogène par 100 kilogrammes de fer.

On peut remplacer le fer par le charbon et on obtient, suivant la conduite de l'opération, les deux résultats extrêmes suivants :

Si tout l'oxygène est transformé en oxyde de carbone, on a, pour 1 kilogramme de carbone :

1,853 mètre cube d'oxyde de carbone ;

1,853 — d'hydrogène.

Dans le cas où l'oxygène est transformé en acide carbonique, 1 kilogramme de carbone donne :

1,833 mètre cube d'acide carbonique ;
Et 3,706 — d'hydrogène.

Dans la fabrication industrielle du gaz à l'eau, on a adopté ce dernier procédé : on fait passer de la vapeur d'eau sur du coke en ignition, dans des appareils *ad hoc*, et c'est précisément la détermination de l'appareil convenable pour ce but, qui a

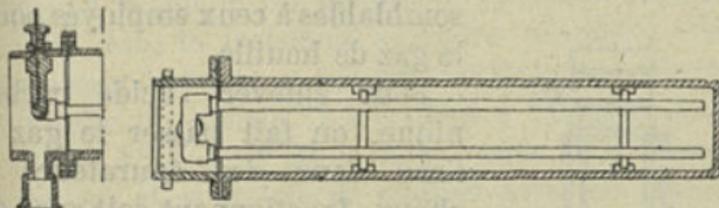


Fig. 96. Gaz à l'eau. Cornue en fer avec tuyau de vapeur.

donné lieu à des essais nombreux, qui ont abouti seulement il y a peu de temps.

On a employé d'abord des cornues en fer (fig. 96), avec tuyau d'arrivée de vapeur, puis ensuite les cubilots.

Marche du cubilot. — Le coke étant bien en feu dans le cubilot, on ferme l'ouverture du sommet et on introduit de la vapeur d'eau par le bas ; la vapeur parcourt la colonne de charbon incandescent de bas en haut ; elle se décompose, et les produits de cette décomposition (hydrogène, oxyde de carbone, acide carbonique) se dégagent par un tuyau d'échappement du gaz qui se trouve en haut

de l'appareil. Mais bientôt le tout se refroidit, la surface des morceaux de coke devient noire et la décomposition cesse. On interrompt alors le jet de vapeur en même temps qu'on enlève l'obturateur du trou supérieur par où se fait le chargement ; on ouvre le robinet à air, et on fait agir un ventilateur, quand la masse de charbon est rallumée, on replace l'obturateur, on ferme le robinet à air, on fait arriver de nouveau la vapeur, etc.

Les gaz, à la sortie de la cornue ou du cubilot, sont envoyés dans un barillet et un condenseur, semblables à ceux employés pour le gaz de houille.

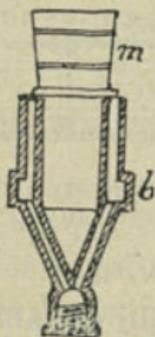


Fig. 97.

Bec avec mèche
de platine.

Pour enlever l'acide carbonique, on fait passer le gaz à l'eau dans des épurateurs à chaux, fonctionnant soit avec de la chaux sèche, soit avec des laits de chaux.

Les gaz hydrogène et oxyde de carbone n'étant pas éclairants par eux-mêmes, on interpose dans leur flamme un corps solide. On se sert d'un bec rond de forme ordinaire, surmonté d'une mèche de platine qui produit la lumière (fig. 97). *m*, mèche en fil de platine très fin, formant un cylindre un peu conique, fixé au bec par trois ou quatre petits fils de platine. Le bec est à double courant d'air, le panier du bec est en platine ; le bec a vingt trous percés sur une circonférence de 20 à 23 millimètres, ils ont $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre. Pour avoir un bel éclai-

rage, il faut que le gaz arrive sous une pression d'au moins 50 millimètres. L'éclat de la lumière augmente avec la pression, il ne faut pourtant pas aller à l'excès, parce que l'on risque de fondre le panier de platine.

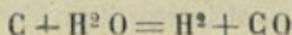
XII. GAZ A L'EAU CARBONÉ

M. Selligie, dès 1834, avait disposé un appareil formé de trois cylindres chauffés au rouge. Les deux premiers, remplis de coke, sont destinés à décomposer l'eau, l'opération se faisant en deux temps; à la sortie du deuxième cylindre, les gaz passent dans le troisième cylindre chauffé à très haute température; on fait arriver dans ce cylindre de l'huile de schiste (4 à 5 litres à l'heure, pour produire 8^m 75 à 10^m 50 de gaz). Cette huile entre en vapeur et se trouve en contact avec les parois chaudes de la cornue, et le gaz à l'eau a une température élevée et donne un gaz très éclairant. Malgré cela, l'industrie de ce gaz a été longtemps à se développer, et il faut arriver jusqu'en 1875 pour lui voir prendre la forme réellement pratique.

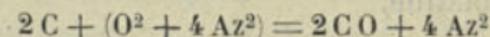
XIII. PROCÉDÉS ACTUELS DE FABRICATION

Nous résumerons un travail sur le gaz à l'eau, présenté par M. Effenterre, à la Société technique du gaz, en 1895.

Lorsque de la vapeur d'eau traverse des couches profondes de charbon incandescent, élevées à une haute température, elle se dissocie :



Dans la pratique, on élève par insufflation d'air la température d'un gazogène, chargé de houille ou de coke, à 1,000° C. environ, et on obtient du gaz de gazogène :



Cinq volumes d'air devraient donner deux volumes d'oxyde de carbone et quatre volumes d'azote ; mais en pratique, on a toujours de l'acide carbonique.

La composition moyenne en volume est la suivante :

26 0/0 d'oxyde de carbone.

68.2 0/0 d'azote.

5.8 0/0 d'acide carbonique.

A 1,000°, on arrête l'insufflation d'air, et on fait arriver de la vapeur dans le gazogène. Cette vapeur se dissocie, et il devrait y avoir production d'un mélange formé en volume de 50 0/0 d'hydrogène et de 50 0/0 d'oxyde de carbone. Mais, en pratique, la composition de ce gaz auquel on a donné le nom de gaz à l'eau, est en moyenne de :

40 0/0 d'oxyde de carbone.

50 0/0 d'hydrogène.

5 0/0 d'azote.

4.5 0/0 d'acide carbonique.

0.5 0/0 d'oxygène.

La dissociation fait baisser la température du gazogène, et lorsque celle-ci est descendue à 500 ou 600°, on ferme le robinet de la vapeur et on recommence l'insufflation d'air. On produit ainsi,

alternativement, du gaz de gazogène et du gaz à l'eau.

On trouve, par le calcul appliqué aux formules chimiques, qu'il faut employer 2 kg. 07 de carbone pour la formation du gaz de gazogène, afin de pouvoir convertir 1 kilogramme de carbone en gaz à l'eau.

On en déduit que pour produire un mètre cube de gaz à l'eau, il faut théoriquement 1^k04 de carbone, et qu'on obtient comme sous-produit 4 mètres cubes de gaz de gazogène.

Les gaz de gazogène forment donc un facteur important dans la fabrication du gaz à l'eau. On peut les employer directement sous les générateurs à vapeur ; mais on les utilise surtout maintenant à élever la température du surchauffeur et du carburateur, comme on le verra plus loin.

Autrefois, on a fait du gaz à l'eau en faisant passer dans des cornues, chauffées extérieurement, de la vapeur d'eau qui se décomposait au contact du charbon incandescent ; les procédés fondés sur ce principe sont complètement abandonnés.

Aujourd'hui, il n'y a plus que deux procédés employés :

1° Celui dans lequel un gaz à l'eau, non éclairant, est produit par un gazogène, puis carburé dans un second appareil ; il comprend deux foyers et deux opérations distinctes ;

2° Le second, dans lequel un gaz à l'eau carburé permanent, est fait en une seule opération et par un seul foyer, généralement par l'intermédiaire d'un surchauffeur.

Dans le premier, les gazogènes sont pourvus de

deux ouvertures de sortie ; l'une mène à la cheminée et l'autre au laveur ; pendant l'insufflation de l'air, la valve de la cheminée est ouverte et l'autre fermée ; pendant la fabrication du gaz à l'eau, c'est l'inverse qui se produit.

Dans le second, le gazogène est relié à une autre chambre, nommée surchauffeur ou chambre de fixation ; cette chambre est pourvue des deux ouvertures de sortie, que nous avons indiquées pour le premier système. Cette chambre de fixation est totalement ou partiellement remplie de matériaux réfractaires, qui doivent emmagasiner la chaleur qui s'échappe du gazogène pendant l'insufflation d'air, chaleur qui sera utilisée pour rendre fixes, c'est-à-dire permanentes, les vapeurs d'hydrocarbures véhiculées par le gaz à l'eau.

La décomposition de la vapeur d'eau, par le carbone incandescent, absorbe beaucoup de chaleur ; pour un kilogramme de carbone transformé en oxyde de carbone par l'oxygène de l'eau, il y a absorption de 2.324 calories ; si ce carbone ne produit que de l'acide carbonique, l'absorption n'est que de 1.513 calories. Dans les deux cas, si on n'a pas recours à une source étrangère de chaleur pour compenser cette perte, la température baisse dans le gazogène et la réaction s'arrête.

Au contraire, dans la fabrication du gaz à l'air, la chaleur dégagée par la combustion incomplète du carbone suffit, non seulement pour distiller les matières volatiles du combustible cru, mais encore pour porter à une température plus ou moins élevée, le gaz produit.

Dans les installations importantes de production

de gaz à l'eau, on se procure la chaleur nécessaire pour la décomposition de l'eau, en fabriquant du gaz à l'air dans le même appareil, qui sert ainsi alternativement à la production des deux sortes de gaz. Dans le gazogène, passent alternativement de l'air et de la vapeur d'eau. C'est une application du principe des courants contraires. La fabrication du gaz à l'air dégage de la chaleur en excès et élève la température du combustible jusqu'au blanc, l'introduction de la vapeur fait baisser rapidement cette température. Le gazogène est chargé avec du coke, de l'antracite ou des houilles antraciteuses très pauvres en matières volatiles ; la chaleur produite est donc employée à élever la température pendant que se produit le gaz à l'air.

La quantité de chaleur déagée par la transformation en oxyde de carbone de 0,9 kilogr. de carbone est égale à celle qui est absorbée par la transformation de 1 kilogr. de carbone en gaz à l'eau, mais comme il se produit inévitablement des pertes dans ces deux opérations, et comme les gaz emportent une quantité importante de chaleur en quittant le gazogène, il en résulte que les $\frac{2}{3}$ ou les $\frac{4}{5}$ du combustible doivent faire du gaz à l'air. Pour un mètre de gaz à l'eau, il faut faire de 4 à 5 mètres de gaz à l'air.

On n'a pas toujours l'emploi utile de cette grande quantité de gaz à l'air, qui est le produit accessoire de la fabrication du gaz à l'eau. Aussi, dans de récentes installations, s'en sert-on pour chauffer des régénérateurs dans lesquels la vapeur d'eau à décomposer se trouve surchauffée. Ce surchauffage réduit à 300 grammes la consommation théo-

rique du carbone nécessaire pour compenser la chaleur absorbée par la transformation de 1 kilogr. de carbone en gaz à l'eau. Grâce à cet artifice, la quantité de gaz à l'eau qu'on obtient avec une quantité donnée de charbon est égale à deux fois et demie celle qu'on obtient sans cela. Si on réunit les deux gaz dans un gazomètre, on obtient ce qu'on appelle *le gaz mixte*.

Les frais de fabrication du gaz à l'eau sont élevés et l'installation des appareils plus coûteuse que quand on prépare du gaz à l'air ; les combustibles qui conviennent le mieux à la production du gaz à l'eau coûtent plus cher que les autres. Toutes les tentatives faites pour remplacer le gaz à l'air par celui qu'on obtient de la vapeur d'eau, dans les appareils métallurgiques, n'ont donné que de l'augmentation de prix de revient.

XIV. GAZ MIXTE

En 1869, M. Lürmann proposa de mélanger, au gaz à l'air provenant des gazogènes à marche très chaude, de la vapeur d'eau qui se décompose au moyen du carbone par l'excès de chaleur. On obtient ainsi un gaz plus riche en éléments combustibles. Ce gaz mixte est également connu sous le nom de *gaz Dawson* ou *gaz de force*. Les combustibles qui conviennent le mieux à la fabrication du gaz mixte sont ceux qui, dans les gazogènes ordinaires, développent les températures les plus élevées, c'est-à-dire ceux qui contiennent le moins de matières volatiles, tels que les combustibles carbonisés et les anthracites.

Les houilles riches en matières volatiles ne conviennent pas pour cette fabrication, car l'intervention de la vapeur d'eau favorise la formation des goudrons.

La composition du gaz mixte varie considérablement suivant la température du gazogène et la proportion de vapeur d'eau qu'on y introduit.

Les gazogènes pour gaz mixte sont semblables à ceux qu'on destine à préparer du gaz à l'air ; il suffit d'ajouter un tuyau pour amener la vapeur au point convenable, pour transformer un appareil et le rendre propre à la fabrication du gaz mixte.

Ce gaz mixte n'est guère employé dans les différentes opérations de la fabrication du fer.

CHAPITRE VI

Des fours

SOMMAIRE. — I. Fours découverts ou bas foyers. — II. Fours à cuve. — III. Fours à réverbère. — IV. Appareils de renversement. — V. Brûleurs. — VI. Laboratoire. — VII. Fours à gaz sans régénérateurs. — VIII. Fours rotatifs et fours oscillants. — IX. Construction des fours.

Un four est un appareil dans lequel on brûle un combustible quelconque, en utilisant la chaleur qui résulte de cette combustion, pour chauffer une matière quelconque.

On classe les fours d'après leur forme et d'après

la façon de les chauffer, et s'il existe plusieurs types de fours où l'on puisse faire une opération métallurgique, on doit choisir celui qui assure le meilleur effet utile, c'est-à-dire celui pour lequel le rapport entre la chaleur absorbée par le corps chauffé et la quantité totale développée est le plus avantageux.

Ainsi, quand on fond de la fonte, on consomme 0,15 kilogr. de coke par kilogramme de métal, la chaleur utilisée est celle qui a été absorbée par la fonte et les scories ; la chaleur développée est celle qui provient de la combustion du coke.

La première de ces quantités se mesure à l'aide d'un calorimètre où l'on verse une certaine quantité de fonte et des scories correspondantes, au moment où elles sortent du four ; la seconde est obtenue en multipliant le poids consommé, diminué des cendres et de son eau hygrométrique, par le pouvoir calorifique du coke.

On distingue ainsi les fours suivants :

Fours découverts ou bas foyers ;

Fours à cuve ;

Fours à réverbère.

I. FOURS DÉCOUVERTS OU BAS FOYERS

Ce sont les plus anciens. Nous verrons plus loin, dans la description des procédés de fusion, comment ils sont construits.

Les frais d'installation sont très petits et on les emploie encore aujourd'hui, quand on ne doit chauffer à la fois qu'une petite quantité de métal ou de minerai.

II. FOURS A CUVE

Les fours à cuve sont des bas foyers entourés d'une enceinte qu'on élève assez haut et dans lesquels on fait arriver le vent par le bas. L'axe de ces fours est vertical, le vide intérieur porte le nom de cuve et est tantôt cylindrique, tantôt conique ; les sections horizontales sont le plus souvent des cercles.

Dans les fours à cuve, la combustion se fait dans la partie inférieure avec du combustible solide ou avec du gaz qui pénètre par des orifices placés près des entrées d'air, de façon à obtenir un mélange aussi complet que possible des deux éléments.

Le combustible solide est chargé par l'orifice supérieur qu'on nomme *le gueulard* ; il descend peu à peu et est remplacé par d'autre au fur et à mesure qu'il se consume à la partie inférieure.

Dans ces fours, les éléments gazeux qui arrivent, ou qui se forment au bas de l'appareil, par le fait de la combustion, et qui ont absorbé la plus grande partie de la chaleur développée, cheminent de bas en haut et s'échappent par le gueulard. Il se produit, en même temps, un courant descendant des matières solides chargées, en sens contraire à celui du gaz, ce qui est une condition éminemment favorable à une bonne utilisation de la chaleur.

L'effet utile des fours à cuve, à action directe, atteint souvent 30 0/0 et dépasse quelquefois ce chiffre.

Le rendement est, au contraire, bien inférieur

quand l'action est indirecte, parce que les matières ne sont pas chauffées graduellement à l'avance en descendant dans la cuve et parce que la chaleur pénètre beaucoup plus difficilement jusqu'à elles; il atteint rarement 4 0/0.

III. FOURS A RÉVERBÈRE

Les fours à réverbère, d'invention plus récente, sont employés assez fréquemment pour utiliser les combustibles crus produisant de la flamme, tout en préservant le corps qu'on veut chauffer de tout contact immédiat avec le combustible solide.

Un four à réverbère consiste, en quelque sorte, en une galerie horizontale ou inclinée, mettant en communication un foyer placé à une de ses extrémités avec une cheminée placée à l'autre. La galerie où se charge la matière est élargie et porte le nom de *laboratoire*. La charge est placée à la partie la plus chaude de l'appareil et la flamme est encore à une température assez élevée quand elle quitte le four; il en résulte que les produits de la combustion emportent, hors du four, une grande partie de la chaleur développée par la combustion.

Ce défaut de ce type de fours est en partie compensé par l'utilisation des flammes perdues pour le chauffage des générateurs.

Les fours à réverbère sont soit à *chauffage direct par grilles*, soit au gaz.

Fours à réverbère à chauffage direct, pourvus de grilles. — Un four à réverbère se compose de trois parties principales, savoir :

Du foyer F (fig. 98) avec sa grille pour le com-

bustible, du laboratoire C où s'effectue la fusion, et de la cheminée B. La grille peut être horizontale, inclinée, à gradins, etc., suivant la nature et l'état physique du combustible employé; le tissard A est l'ouverture par laquelle on introduit le combustible sur la grille; la sole G est plane, horizontale ou inclinée lorsque les matières chargées doivent être simplement chauffées et non fon-

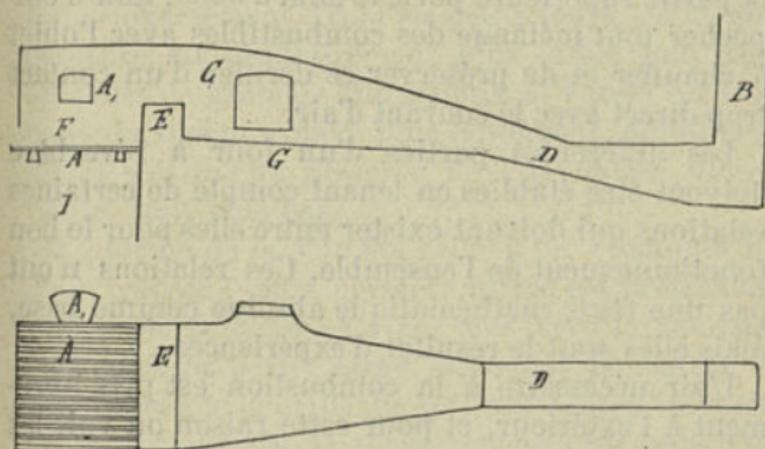


Fig. 98. Four à réverbère à chauffage direct.

dues; on la fait creuse pour le cas où on veut opérer une fusion. Le rapport entre la surface de la grille et celle de la sole est généralement compris entre $1/2$ et $1/4$, dans les fours employés à la métallurgie du fer. La longueur de la sole dépend de celle de la flamme, elle ne dépasse jamais 4 mètres pour que la température soit uniforme dans toute son étendue.

Le foyer F et le laboratoire C sont couverts par une même voûte qui vient s'appuyer sur la chemi-

née B, laissant la communication de cette dernière avec l'intérieur du four libre à l'aide d'un canal de raccordement D, dit *rampant*. On place la cheminée à l'extrémité opposée au foyer, de façon que la flamme et les gaz puissent traverser le four dans toute sa longueur et produire ainsi le maximum d'effet utile. La grille et le laboratoire sont séparés par une petite cloison transversale E, dont la partie supérieure porte le nom d'*autel*, afin d'empêcher tout mélange des combustibles avec l'objet à chauffer et de préserver ce dernier d'un contact trop direct avec le courant d'air.

Les différentes parties d'un four à réverbère doivent être établies en tenant compte de certaines relations qui doivent exister entre elles pour le bon fonctionnement de l'ensemble. Ces relations n'ont pas une règle mathématique absolue comme base, mais elles sont le résultat d'expériences.

L'air nécessaire à la combustion est pris librement à l'extérieur, et pour cette raison on voit les fours à réverbère installés au dehors des halles de moulage, communiquant avec ces dernières seulement par l'endroit où l'on puise la fonte. Au-dessous de la grille, on établit une fosse I qui a une certaine profondeur afin que les charbons embrasés qui s'y entassent, en passant à travers la grille, ne puissent échauffer l'air environnant. On donne aux barreaux un écartement de 12 à 20 millimètres suivant la grosseur et la nature du combustible employé.

La distance de la grille à la surface supérieure de l'autel dépend également de la nature de la houille et de la longueur du fourneau ; si la houille

est grasse, à longue flamme, et la longueur du four moyenne, on baisse la grille par rapport à l'autel pour éviter l'effet immédiat de la flamme et la perte de calorique par la cheminée; si, au contraire, la houille est maigre, on élève la grille le plus possible pour mieux utiliser la chaleur du combustible. La hauteur de l'autel au-dessus de la sole varie de 15 à 30 centimètres, mais il faut la déterminer exactement. Dans les petits fours, où la température est ordinairement plus faible que dans les fours de grandes dimensions, si l'autel est trop haut, la fusion s'opère plus lentement, quoique le métal soit mieux préservé de l'oxydation que si l'autel était plus bas.

La forme de la sole est celle d'un rectangle ou d'un trapèze; cette dernière forme est préférable, car le rétrécissement ainsi créé vers le rampant permet à la partie large, recevant la charge et placée près de la grille, de recevoir toute l'intensité de la chaleur. Si la forme adoptée est celle d'un rectangle, on devra faire son raccordement avec la largeur de la cheminée par deux tracées courbes, afin d'éviter la création d'un ventre qui, non seulement compliquerait la construction du four et nuirait à sa solidité, mais en outre ne serait d'aucune utilité pour le chauffage.

Les dimensions de la sole, longueur et largeur, doivent être établies dans un rapport en analogie avec la meilleure utilisation de la chaleur développée par le combustible; l'expérience a prouvé qu'on pouvait établir ces deux dimensions dans le rapport de 2 à 1, pour les cas où on brûle de la houille maigre, et dans celui de 3 à 1 pour les

houilles grasses à longue flamme. Dans les cas de houille maigre, certains constructeurs poussent le rapport à 3 contre 2. Néanmoins, il ne faut pas trop exagérer ce rapport, car une sole trop courte conduirait immédiatement la plus grande partie de la flamme, et par conséquent de la chaleur, dans la cheminée sans être utilisée; si, au contraire, la sole est trop longue il y a refroidissement.

L'inclinaison de la sole a son importance aussi. Beaucoup de constructeurs préfèrent la sole horizontale ou d'une très faible inclinaison vers le trou de coulée; d'autres préfèrent les soles inclinées: la consommation de combustible est moindre dans un four à sole inclinée que dans un four à sole horizontale; de l'inclinaison de la sole dépend celle de la voûte, qu'on baisse cependant davantage vers le rampant, car la température tend à s'abaisser dans les environs de la cheminée. Une voûte trop élevée au-dessus de la sole concentre mal la chaleur; une voûte trop abaissée empêche de charger convenablement le four et d'y placer la quantité de métal que le combustible peut fondre. La règle habituellement suivie pour tracer la voûte est celle qui donne une hauteur de voûte au-dessus de la sole, telle que la section verticale du four soit au moins les trois quarts de la surface de chauffe.

Quand la longueur de la sole est trop grande, on fait une double voûte au-dessus, pour rapprocher la flamme de la surface du bain; plus la voûte est cintrée et plus la chaleur réfléchie se concentre au milieu de la sole, au détriment de son égale répartition.

On ménage dans les murs latéraux des ouvertures ou portes, fermées par des parties mobiles, par lesquelles on introduit les matières à chauffer.

La section du rampant est égale au maximum au $\frac{1}{6}$ de la surface de la grille ; plus elle est petite et plus le tirage de la cheminée doit être puissant pour vaincre les résistances ; lorsqu'un rampant est large, la flamme reste fumeuse.

On alimente souvent les fours de ce type avec du vent forcé en faisant arriver, dans le cendrier, fermé par des portes, le vent des machines soufflantes ; on arrive ainsi à réaliser une économie de combustible.

Fours à réverbère chauffés au gaz. — Le seul gaz employé au chauffage des fours à réverbère est le gaz à l'air. Le gaz naturel n'est guère employé que dans l'Amérique du Nord ; les gaz des hauts fourneaux ne servent qu'au chauffage du vent et à produire la vapeur.

Les fours à gaz généralement employés aujourd'hui sont du système Siemens, c'est-à-dire que l'air est chauffé dans les parties mêmes du four qu'on a préalablement chauffé.

Fours Siemens à chaleur régénérée. — Vers 1860, les frères William et Frédéric Siemens ont pris un brevet pour un four muni de quatre chambres de régénération ou récupération, disposées par paires ; ces chambres, construites en briques réfractaires, sont remplies de briques empilées de façon à présenter une grande surface au gaz ou à l'air qui les traversent, tout en laissant un passage suffisamment libre.

Les figures 99 à 102 représentent un four Si-

mens. $A A_1$ $B B_1$ sont les régénérateurs ; A et A_1 ont des dimensions moindres et sont destinés au passage du gaz combustible, $B B_1$ à celui de l'air. L'air arrive dans la boîte en fonte C (fig. 102) et le

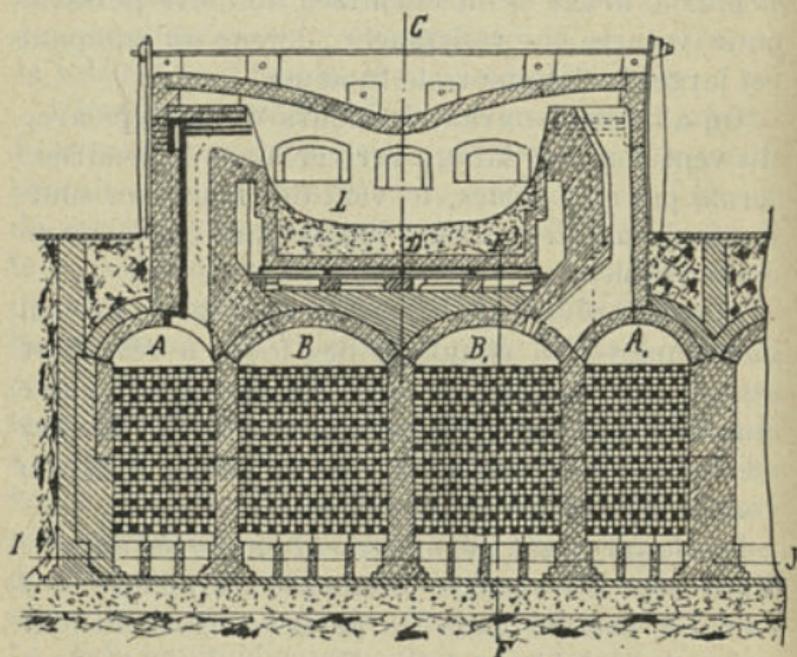


Fig. 99. Four Siemens à chaleur récupérée.

gaz combustible dans la boîte D , quand on soulève les vannes ou soupapes disposées à l'entrée ; des valves placées au-dessous servent à diriger les courants tantôt dans les conduits E et F , tantôt dans ceux G et H . Ces valves sont manœuvrées par des leviers et des bielles.

Dans la position indiquée sur la figure 102, le gaz passe par le conduit F , traverse le régénéra-

teur A, l'air passe par le conduit E et se rend dans la chambre B où ils cheminent et viennent se rencontrer dans le laboratoire L où se fait la combus-

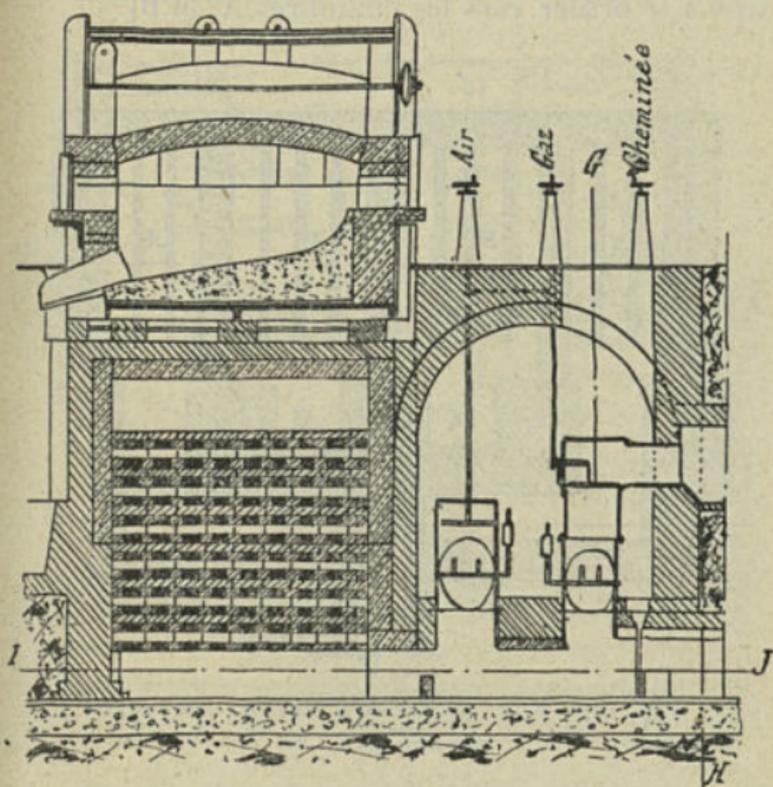


Fig. 100. Four Siemens à chaleur récupérée
(coupe verticale par C D E F).

tion ; les produits de cette combustion descendent alors dans les chambres A₁ et B₁, traversent les conduits G et H, les boîtes à valves C et D et se rendent à la cheminée. Au bout d'un temps déterminé, lorsque la température des chambres A₁ et B₁

est assez élevée, on agit sur les leviers de manière à faire tourner les valves de 90° ; on oblige ainsi les gaz de la combustion à cheminer vers les chambres A et B; le gaz combustible et l'air destiné à le brûler vers les chambres A₁ et B₁.

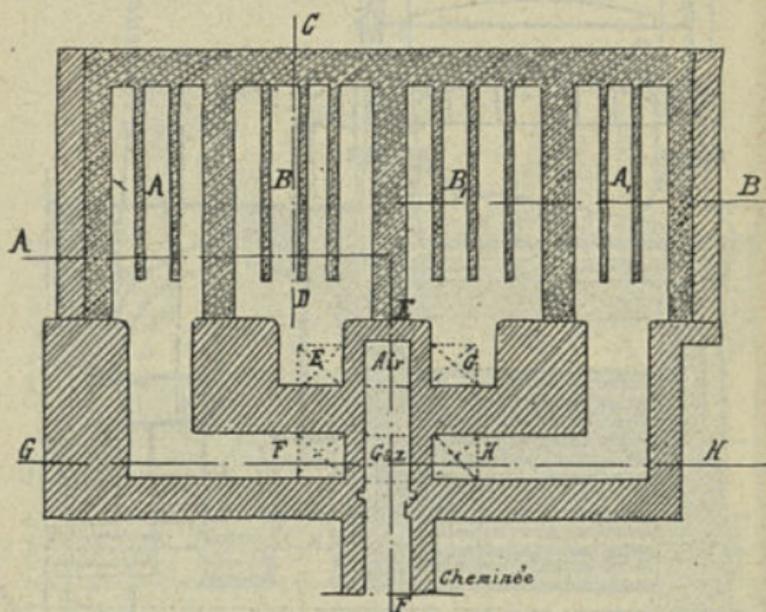


Fig. 101. Four Siemens à chaleur récupérée (coupe par IJ).

Le renversement des courants se fait quand toute la chaleur emmagasinée dans les chambres est épuisée; il en résulte que lorsqu'on met un four en feu il y a augmentation de température après chaque renversement. Au début, l'air et le gaz sont froids lorsqu'ils se rencontrent et la combustion est incomplète; les produits de cette combustion chauffent les chambres qu'ils traversent, mais ils ne

peuvent y laisser plus de chaleur qu'ils n'en possèdent eux-mêmes à la sortie du laboratoire. Après le premier renversement, l'air et le gaz sont moins froids et la température provenant de leur combustion sera plus élevée et la chaleur ira ainsi

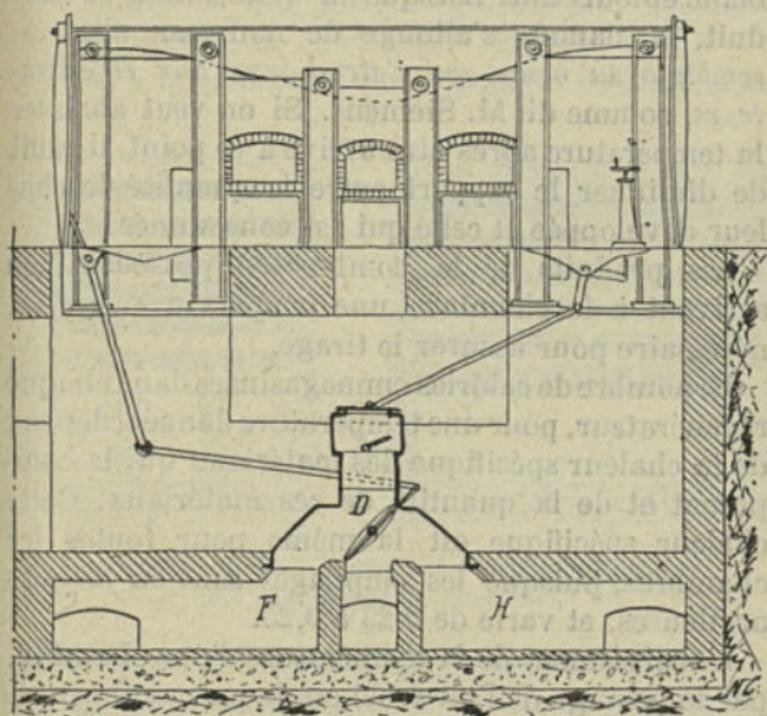


Fig. 102. Four Siemens à chaleur récupérée.
(coupe par G H).

en augmentant jusqu'à ce que la dissociation vienne limiter les élévations de température.

Les avantages de ces fours ne peuvent, par conséquent, se manifester qu'au bout d'un temps assez long ; ils ne conviennent donc pas à des opérations discontinues.

On voit les phénomènes de la combustion par l'aspect de la flamme. Au moment de la mise en feu, la flamme est rouge sombre et longue; après le premier renversement, elle devient plus courte et plus vive; elle arrive de proche en proche au blanc éblouissant. Lorsque la dissociation se produit, la flamme s'allonge de nouveau, *elle ressemble à un nuage qui s'étend jusqu'aux régénérateurs*, comme dit M. Siemens. Si on veut abaisser la température après être arrivé à ce point, il suffit de diminuer le rapport entre la quantité de chaleur développée et celle qui est consommée.

Les produits de la combustion possèdent, en arrivant à la cheminée, une température de 150°, nécessaire pour assurer le tirage.

Le nombre de calories emmagasinées dans chaque régénérateur, pour une température donnée, dépend de la chaleur spécifique des matériaux qui la composent et de la quantité de ces matériaux. Cette chaleur spécifique est la même pour toutes les chambres, puisque les empilages sont en briques argileuses, et varie de 0,23 à 0,25.

L'abaissement de la température d'une chambre, par le passage de l'air froid ou du gaz combustible sera d'autant plus lent, que le nombre des calories emmagasinées à une température donnée, sera plus considérable. D'autre part, l'efficacité d'une chambre augmente avec la surface qu'elle offrira au contact des produits de la combustion, puisqu'elle les dépouillera mieux de la chaleur qu'ils apportent; les empilages se chaufferont plus uniformément et restitueront plus facilement ensuite cette chaleur à l'air et au gaz qui les traversent.

Pour obtenir ce résultat il faut donner aux régénérateurs le maximum de surface sans mettre obstacle au passage du gaz. Les figures 103 et 104 montrent la disposition qui est le plus fréquemment adoptée. Le gaz ou l'air arrive au régénérateur par les conduits A, qui servent également au passage des produits de la combustion lorsque ceux-ci se rendent à la cheminée. On couvre ces conduits par

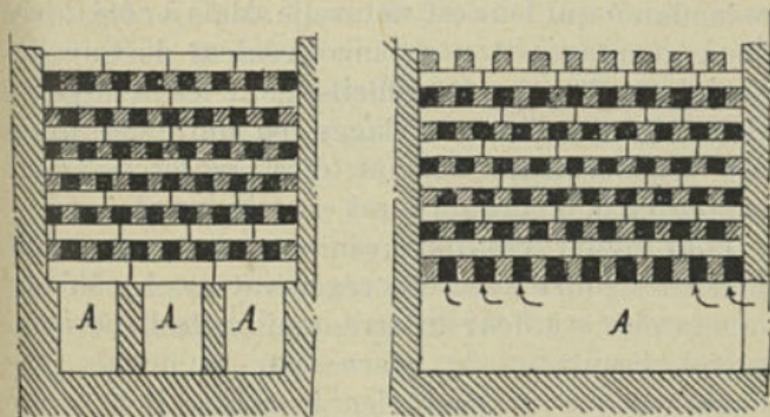


Fig. 103 et 104. Disposition des empilages des régénérateurs Siemens.

des briques de dimensions courantes placées sur champ, entre lesquelles on laisse un intervalle de 0,065 pour le passage du gaz ; sur ce rang de briques, on en place un second à angle droit sur le premier et dans lequel les briques sont établies parallèlement les unes aux autres et distantes de 0,065. Sur ce deuxième rang on pose un troisième de la même manière à angle droit sur le second et de façon que le plein corresponde comme aplomb au vide du premier rang, de façon à forcer le contact plus intime avec le gaz. C'est la pose en

chicané. Les briques pour régénérateurs ont des dimensions variables entre $65 \times 65 \times 230$ et $85 \times 85 \times 230$ millimètres.

Le four représenté par les figures 99 à 102 a ses régénérateurs disposés sous le laboratoire et assez profondément enfouis dans le sol, ce qui a l'avantage de les préserver contre le refroidissement et permettre aux gaz chauds de suivre la marche ascendante qui leur est naturelle. Mais à côté de ces deux avantages il y a l'inconvénient d'avoir des chambres d'un accès difficile pour les nettoyages et la réfection des empilages, en outre les murs des régénérateurs doivent être renforcés pour supporter le laboratoire qui est très lourd.

Pour éviter ces inconvénients on a construit plusieurs fours avec des régénérateurs à côté du laboratoire et à fleur de terre, mais cette disposition prend beaucoup de place, car au-dessus des chambres on ne peut rien installer. Pour cette raison on préfère la disposition précédente.

En Angleterre on dispose des chambres régénératrices cylindriques établies aux extrémités du laboratoire et revêtues d'une enveloppe en tôle ; les carneaux mettant en communication les régénérateurs avec le laboratoire sont également enveloppés de tôles.

Chaque paire de régénérateurs doit contenir 50 à 60 kilogrammes de briques par kilogramme de houille consommée entre deux renversements, qui doivent se faire d'heure en heure. La densité des briques étant 1,8 le volume de 60 kilos est 0,033 du mètre cube et comme il y a autant de vides que de pleins, il faut que chaque paire de régénérateurs

ait un volume représenté par autant de fois $0^m 3066$ qu'on a consommé de kilogrammes de houille par heure. Comme on sait combien ces fours doivent consommer d'après leur production, il est facile de calculer le volume des chambres.

Les régénérateurs doivent avoir une section libre suffisante pour que la circulation du gaz ne rencontre pas trop d'empêchements; on donne d'habitude à la paire $2^m 50$ à 3 mètres carrés par 100 kilos de houille consommée par heure; les briques des empilages occupent la moitié de ces surfaces; dans les régénérateurs horizontaux, cette surface est encore plus petite.

La chambre à air a une section plus grande que celle au gaz, car ce dernier arrive plus chaud que l'air et aussi parce qu'on admet de l'air en excès. Généralement, on les construit dans le rapport de $4/3$ et $3/2$. Connaissant le volume et la section, on déduit la hauteur ou profondeur qui dépasse rarement $2^m 50$ à 3 mètres, non compris la hauteur des conduits d'arrivée et l'espace libre au-dessus des empilages.

JV. APPAREILS DE RENVERSEMENT

Nous avons dit que Siemens a adopté pour le renversement des courants gazeux un appareil composé d'une valve mobile autour de son axe, de manière à occuper deux positions symétriques faisant entre elles un angle de 90° . La valve est formée d'une plaque de fonte renforcée par des nervures et logée dans une boîte en fonte qui porte à sa partie supérieure une soupape réglant à

volonté l'entrée de l'air ou du gaz. Ces valves peuvent être à axe horizontal ou vertical et sont commandées par des leviers à contrepoids. Ces valves ont l'inconvénient de se gauchir et de ne plus fournir une fermeture suffisante.

Au lieu des valves, on emploie l'appareil suivant, placé au-dessus du sol et manœuvré à la main.

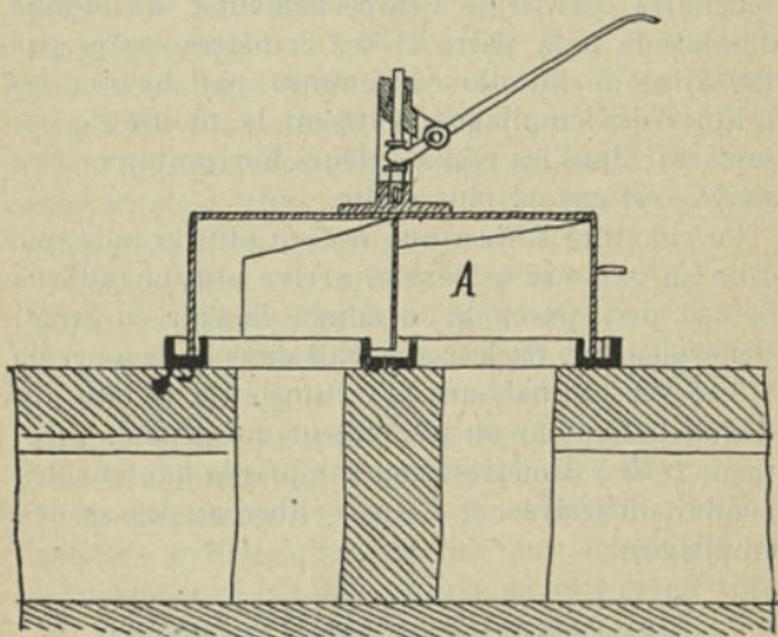


Fig. 105. Appareil de renversement avec valve à arc vertical.

C'est une cloche (fig. 105 et 106) cylindrique A en tôle divisée en deux parties par une cloison passant par l'axe. Les bords inférieurs de la cloche et de la cloison reposent dans une série de rigoles ayant la forme d'une circonférence et de deux diamètres perpendiculaires l'un à l'autre,

remplies d'eau et supportées par des murs correspondant à quatre compartiments et à quatre galeries ; B est réservé au gaz combustible dans une des cloches et à l'air de la combustion dans l'autre, C et D sont en relation avec les régénéra-

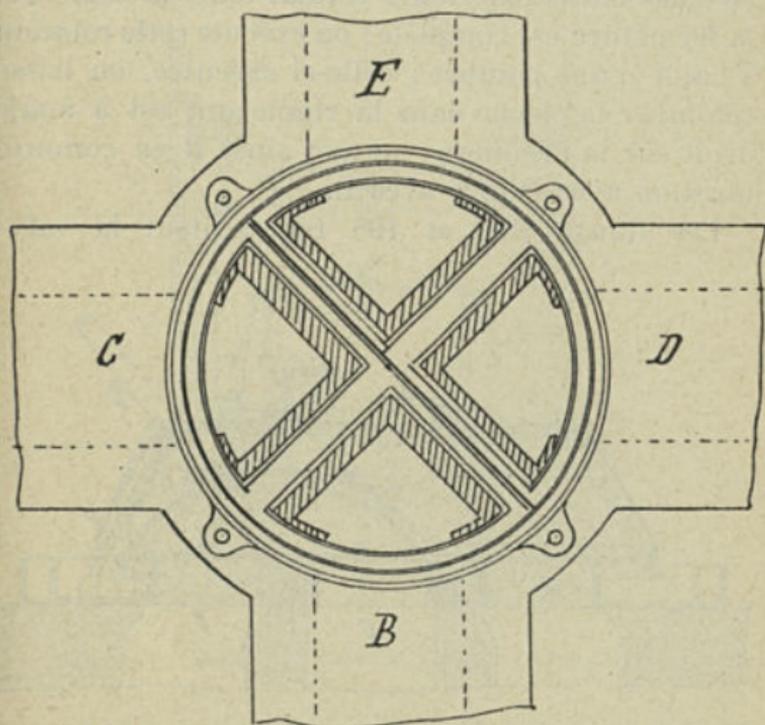


Fig. 106. Appareil de renversement avec valve à arc vertical.

teurs, E avec la cheminée. Dans la position de la figure, le gaz combustible ou l'air arrivant par B va par C au régénérateur où il prendra de la chaleur, tandis que les produits de la combustion reviennent à l'appareil de renversement par D et se rendent à la cheminée par E ; pour changer le

sens des courants, on soulève légèrement la cloche au moyen du levier de façon que le bord inférieur de la cloison, qui descend moins bas que celui de la partie cylindrique, dépasse les bords de la rigole, et on fait tourner à la main la cloche de 90°. Les bords extérieurs restent dans la rigole et la fermeture est complète; on exécute cette rotation à l'aide d'une poignée; celle-ci exécutée, on laisse retomber la cloche dans la rigole qui est à angle droit sur la première; on met ainsi B en communication avec D et C avec E.

Les figures 107 et 108 représentent la valve

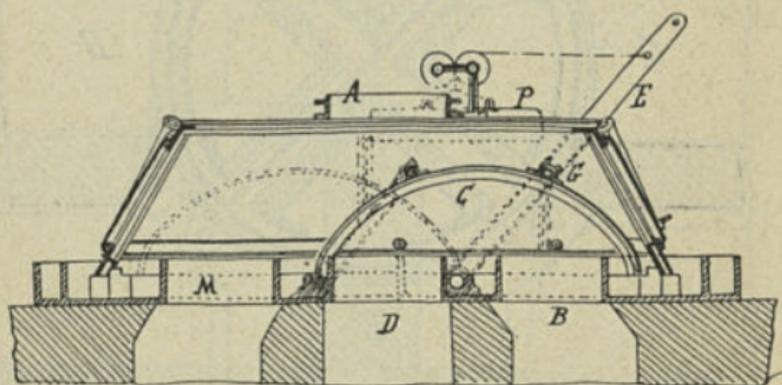


Fig. 107. Valve de Forter (coupe verticale).

inventée par M. Forter, plus simple et en usage dans un grand nombre d'usines récentes; elle comporte un cadre en fonte muni de rebords saillants formant rigoles qu'on maintient pleines d'eau et dans lesquelles trempent les bords inférieurs des autres pièces. Les bords inférieurs des pièces ne reposent pas au fond des rigoles mais sur des

petites saillies venues de fonte afin de laisser un espace libre pour enlever, en marche, les poussières et les goudrons qui s'accumulent dans les rigoles.

Comme on voit l'appareil (fig. 107), le gaz ou l'air arrive par l'ouverture A de la grande cloche,

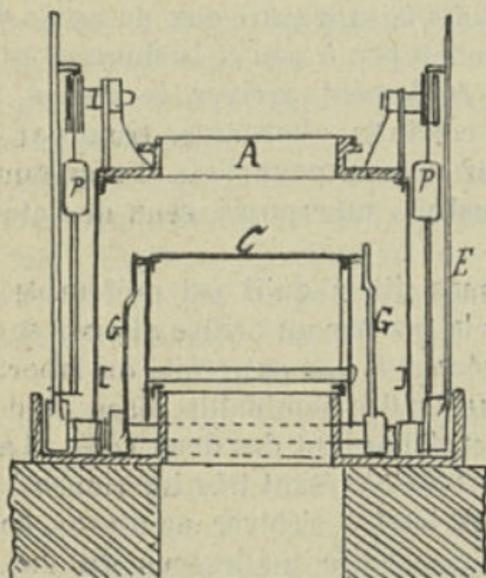


Fig. 108. Valve de Forter (coupe transversale).

puis il plonge à gauche M pour gagner le laboratoire du four, les produits de la combustion arrivent par le conduit B sous la cloche mobile C et se rendent vers la cheminée par le conduit central D. Si, à l'aide du levier E portant des guides G, on amène la cloche dans la position pointillée, on renverse le sens des courants; la manœuvre du levier est facilitée par les contrepoids P.

V. BRULEURS

Le mélange de gaz et d'air doit être intime pour avoir une combustion complète ; si ce mélange se fait très rapidement, la flamme sera courte.

On fait habituellement arriver le gaz et l'air par deux conduits faisant entre eux un angle de 60° ; le mélange se fait peu à peu et la flamme est longue.

On fait également arriver le gaz et l'air par plusieurs conduits alternants, trois par exemple pour le gaz et deux pour l'air. Fréquemment, on met ces conduits superposés, ceux de l'air étant en dessus.

F. Siemens dit « qu'il est préférable de faire déboucher le gaz par un orifice allongé et de faible hauteur ménagé à une extrémité du laboratoire, et l'air par un orifice semblable placé au-dessus du précédent et débordant des deux côtés. La densité du gaz combustible étant très inférieure à celle de l'air, ce gaz tend à s'élever au-dessus de l'air et celui-ci à descendre au-dessous du gaz, ce qui provoque le plus souvent un mélange assez rapide et assez complet ».

Pour une consommation de 100 kilogrammes de houille à l'heure, on donne, en moyenne, une section de $0^{\text{m}^2}07$ aux orifices d'air et 0,06 à ceux du gaz, mais les dimensions de ces parties du four varient beaucoup d'un four à l'autre.

VI. LABORATOIRE

La section du laboratoire où l'air et le gaz se réunissent et se combinent ne doit pas être trop

petite ; la voûte doit être élevée pour laisser un large espace à la flamme pour se développer. Dans les fours construits de cette façon, les gaz éprouvent moins de frottements contre les parois et, par suite, moins de tendance à se dissocier, et la durée de la voûte est plus grande.

La cheminée doit être suffisante pour assurer un bon tirage et vaincre les différentes résistances que les gaz rencontrent dans les appareils et produire une combustion vive.

On a cherché à simplifier l'installation des fours Siemens en supprimant les deux chambres à gaz qu'on fait pénétrer directement des gazogènes dans le four, vu que les gaz provenant des gazogènes soufflés sont très chauds.

VII. FOURS A GAZ SANS RÉGÉNÉRATEURS

Dans tous les fours de cet espèce, les gazogènes sont accolés aux fours ; l'air destiné à la combustion n'est pas chauffé dans des régénérateurs, mais dans des carneaux ménagés dans l'épaisseur des murs. Les produits de la combustion possèdent une haute température en quittant le laboratoire et peuvent être utilisés à la production de la vapeur.

On ne peut recourir à ces fours lorsqu'on a besoin d'une très haute température, puisque l'air et le gaz y arrivent beaucoup moins chauds.

Parmi les différents fours de ce genre, nous allons donner les fours Boëtius et Bicheroux, les plus employés jusqu'ici.

Four Boëtius. — Il est représenté figures 109

et 110. Le gazogène A a 1^m80 à 2 mètres de hauteur sur 0^m90 de large. En arrière et au-dessus de

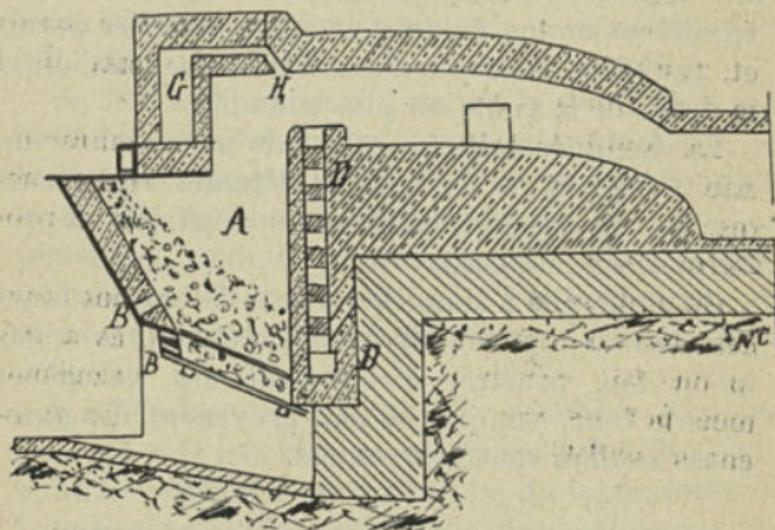


Fig. 109. Four Boëtius (coupe en long).

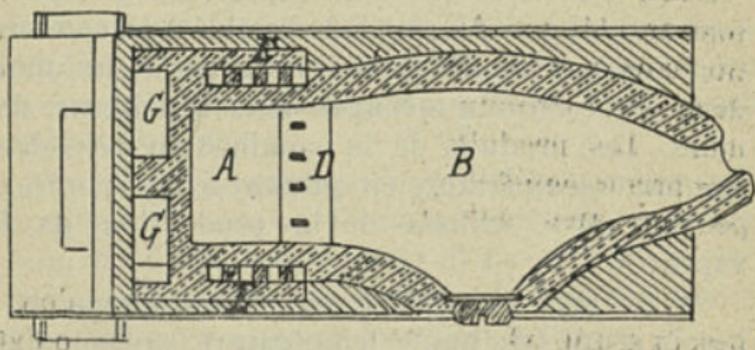


Fig. 110. Four Boëtius (vue en plan).

la grille inclinée se trouve un mur en pente laissant à la partie supérieure une trémie de chargement du combustible qu'on accumule au-dessus

pour empêcher l'accès de l'air; des trous B servent pour l'introduction de l'air et des outils pour piquer le feu; l'air nécessaire à la combustion s'échauffe en partie dans une série de carneaux D qui montent en serpentant dans le mur de l'autel et sort par des fentes F sur la face supérieure de l'autel en venant frapper verticalement le courant de gaz horizontal; une autre partie de ce même air circule dans les carneaux E disposés dans les parois latérales des gazogènes, se rassemble dans le carneau collecteur G placé à l'arrière du foyer et plonge de la voûte du four par les fentes H₁, en frappant obliquement le courant gazeux.

Il a été construit un assez grand nombre de ces fours de 1860 à 1880, mais, aujourd'hui, on ne les emploie plus dans les nouvelles installations.

Four Bicheroux. — Ce four se distingue du four Boëtius par la plus grande capacité du gazogène et par la disposition des carneaux par lesquels passe l'air destiné à brûler les gaz qui se trouvent placés dans les parois du laboratoire et le plus souvent sous les plaques de fonte qui portent la sole. Les figures 111 et 112 représentent un four Bicheroux dans lequel la circulation de l'air est indiquée par les flèches; quand il arrive à l'autel, il se partage en deux courants et vient au conduit F situé au-dessus du gazogène, et, de là, il sort par deux rangées d'ouvertures et frappe à angle droit le courant gazeux qui sort du gazogène. Le four Bicheroux se prête très bien au réchauffage progressif de grosses masses de métal fondu que l'on enfourne à l'extrémité la plus froide et que l'on rapproche successivement de l'autel.

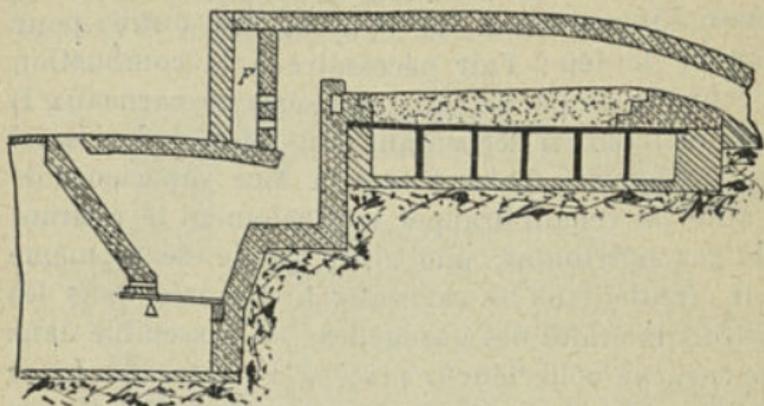


Fig. 111. Four Bicheroux (coupe longitudinale).

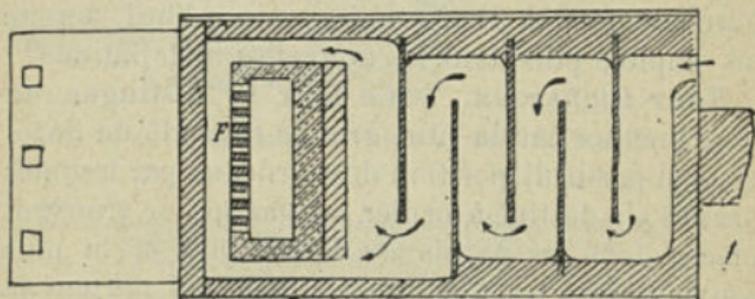


Fig. 112. Four Bicheroux (vue en plan).

VIII. FOURS ROTATIFS ET FOURS OSCILLANTS

On a créé plusieurs types de fours à sole mobile, soit rotatifs, soit oscillants, pour économiser la main-d'œuvre quand on veut soumettre à des actions chimiques les matières placées sur la sole d'un four à réverbère, en les mélangeant avec des réactifs solides ou liquides; malheureusement, tous ces fours sont très coûteux de construction et

d'entretien et exigent une force mécanique. Aussi sont-ils rarement adoptés, et quelquefois même ils ont été abandonnés pour revenir aux fours fixes.

L'effet utile des fours à réverbère, à chauffage direct, varie de 8 à 10 0/0; celui des fours Siemens et autres établis sur le même principe va jusqu'à 18 0/0.

IX. CONSTRUCTION DES FOURS

Jusqu'à présent, nous nous sommes spécialement occupés de la forme des fours et de l'utilisation des chambres où se produisent le dégagement ou la transmission de la chaleur.

Les différentes capacités d'un four sont limitées par des murs en maçonnerie exécutés avec soin. Il faut que toutes les parois puissent résister aux actions chimiques et physiques, dilatations ou contractions, etc. Il faut que les matériaux puissent résister aux hautes températures qu'on développe dans l'intérieur de ces fours et ne pas fondre; on doit donc construire avec des matériaux réfractaires toutes les parois qui doivent dépasser le rouge sombre. Pour arriver à ce résultat, on est forcé d'établir dans l'épaisseur des murs des circulations d'air ou y introduire des pièces en fonte creuses à circulation d'eau, car on ne connaît pas de matières réfractaires pouvant résister à ces températures.

L'épaisseur des murs se détermine en tenant compte des conditions de stabilité, de la durée du travail et des pertes par rayonnement. Cependant, aujourd'hui, dans la pratique, les métallurgistes déterminent cette épaisseur sans se préoccuper des

pertes par conductibilité et en tenant compte uniquement de ce qui est nécessaire à la durée de la construction ; on obtient ainsi des appareils légers et plus économiques.

Les fours sont renforcés par des armatures en fer ou en fonte qui maintiennent la forme du four, malgré les mouvements qui se produisent dans la maçonnerie par les variations de température.

CHAPITRE VII

Matériaux réfractaires

SOMMAIRE. — I. Généralités. — II. Propriétés réfractaires de certaines matières entrant dans la composition des matériaux réfractaires. — III. Lois de Richters et du D^r Bischof. — IV. Matériaux réfractaires basiques. — V. Briques au carbone. — VI. Mortiers réfractaires.

I. GÉNÉRALITÉS

On désigne sous le nom de matériaux réfractaires, les matières employées pour la construction du four et qui doivent résister à toute action de température élevée et de refroidissement ; il faut, en outre, qu'elles résistent à l'action corrosive, soit des cendres combustibles, soit des matières en traitement. Ces matières sont soumises dans les fours à des températures qui produisent la fusion,

la contraction ou la dilatation de ces matières. Souvent aussi elles se trouvent en contact avec des corps fortement chauffés ayant des affinités chimiques pour ces matières, et pouvant par conséquent donner lieu à des combinaisons chimiques fusibles. Par conséquent, on doit choisir la matière réfractaire à employer d'après l'opération métallurgique que l'on doit faire. Ainsi une matière qui peut très bien résister à la chaleur dans certaines conditions, peut être absolument impropre dans une autre circonstance, soit parce que la température qui se produit dans cette circonstance est bien plus élevée que dans l'autre cas, soit parce qu'il se produit une action chimique d'une certaine nature particulière ayant de l'influence sur les composants de la matière réfractaire.

Un corps peut être infusible quand il est seul ; il devient fusible souvent si on le met en contact avec un autre corps, comme par exemple avec une scorie de composition spéciale.

Nous pouvons donc dire que le choix des matériaux réfractaires doit être subordonné au genre d'opération auquel ils doivent servir, ou autrement dit on doit tenir compte à la fois de la température et des actions chimiques qui pourraient se produire, et auxquelles ils doivent résister.

Les matériaux réfractaires qu'on trouve dans la pratique ne sont jamais absolument purs ; ils renferment des alcalis, des oxydes de fer et de manganèse, de la chaux, de la magnésie, etc.

Ces corps étrangers peuvent occasionner avec une grande énergie des actions chimiques et exercer une influence considérable sur la fusibilité.

Ainsi, par exemple les alcalis, les oxydes de fer et de manganèse qu'on y rencontre souvent, sont nuisibles à un tel point que les matières qui en contiennent une certaine quantité ne peuvent pas être classées parmi les matériaux réfractaires.

Une argile complètement infusible en état de pureté, devient fusible du moment qu'elle renferme une certaine quantité d'alcalis, d'oxyde de fer, de la chaux, de la magnésie ou même un excès de silice à l'état de sable intimement mélangé.

La chaux et la magnésie, infusibles à l'état de pureté, perdent cette qualité dès qu'on les mélange avec un peu de silice ou de l'oxyde de fer.

Ces corps étrangers ont une influence d'autant plus grande qu'ils sont en plus grand nombre dans la matière réfractaire.

II. PROPRIÉTÉS RÉFRACTAIRES DE CERTAINES MATIÈRES ENTRANT DANS LA COMPOSITION DES MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES.

Carbone. — Le carbone aurait parfaitement satisfait aux conditions de réfraction s'il ne fondait pas lui-même quand la température devient très grande. La plombagine résiste bien à l'action de la chaleur, mais sa fabrication n'est pas assez répandue pour pouvoir être employée à la confection des fourneaux.

Le graphite naturel donne des cendres en proportion variant de 3 à 25 0/0 composées de silice et d'alumine. L'inconvénient est qu'il coûte très cher, surtout le fameux graphite Faber, et on emploie de préférence celui de Ceylan.

Le charbon de cornue renferme beaucoup de cendres ; l'anhracite n'est pas employé ; le coke pulvérisé fait des garnitures, mais leur résistance n'est pas grande, c'est la *brasque légère*. On le mélange quelquefois avec de l'argile pour lui donner de la cohésion et on a ainsi la *brasque forte*.

Le charbon de bois de buis entre souvent dans la constitution des briques, mais tous ces produits charbonneux ont une action réductrice ; pour l'éviter on a cherché à les enduire d'un vernis.

Silice. — Le quartz pur, c'est-à-dire ne contenant ni mica, ni feldspath, ni du calcaire, peut très bien servir, mais si on le soumet au chalumeau oxydrique la silice fond. Elle est en outre sujette à éclater au feu. Les matériaux de construction naturels ou artificiels dont elle est l'élément principal sont généralement les plus réfractaires, surtout s'ils ne sont pas mis en contact avec des corps qui peuvent avoir sur eux une action chimique. Ils sont donc très bons pour les voûtes des fours à réverbère et pour la partie la plus exposée à la chaleur des chambres de régénérateurs, parce que dans ces conditions, les matériaux ne sont en contact qu'avec les flammes.

Parmi les roches qui appartiennent à cette classe de matériaux et qui sont employées dans la métallurgie du fer, les plus importantes sont les suivantes :

Grès. — Le grès est une roche formée de petits cristaux de quartz réunis entre eux par un ciment argileux ; on l'emploie pour la construction des hauts fourneaux au bois et d'autres appareils dans

lesquels les parties réfractaires ne doivent pas être en contact avec des scories basiques qui dissoudraient rapidement la silice.

Les grès présentant des taches brunes ferrugineuses doivent être rejetés, et dans la pose de ces pierres on doit faire attention de les placer de façon que les plans suivant lesquels elles peuvent se fendre se trouvent perpendiculaires aux faces intérieures des parois, pour éviter les éclats par plaques sous l'action de la chaleur.

Ganister. — C'est une roche contenant :

97,5	de silice
1,5	d'alumine
1,25	de chaux

qu'on trouve notamment aux environs de *Sheffield*, interposée entre des couches de houille; on la rencontre également près de *Dusseldorf*. Elle est souvent employée pour le revêtement des cornues Bessemer en la réduisant en poudre fine qu'on mélange avec une petite quantité d'argile pour lui donner de la cohésion et en ajoutant un peu d'eau; on emploie cette matière comme du pisé.

Schiste siliceux. — C'est une roche formée de grains de quartz qu'on rencontre en Silésie, où elle est très employée pour la construction des fours et principalement des voûtes des fours à réverbère.

Gaize. — C'est un grès particulier, une sorte de silice grattée, qui est très souvent employé.

Kieselguhr. — C'est une matière siliceuse très légère formée principalement de silice. Les briques faites avec cette matière sont très réfractaires et très légères. On leur fait absorber pendant l'agglomération

mération des matières organiques qui s'en vont pendant la cuisson; le seul inconvénient qu'elles présentent, c'est qu'elles sont attaquables par les fondants alcalins.

Briques de Dinas. — Ce sont des produits réfractaires à base de silice, ainsi dénommés parce que les roches de Dinas ont servi les premières à les fabriquer. Elles sont formées par le produit du broyage de ces roches qu'on mélange avec 10/0 de chaux vive; on pétrit le mélange avec un peu d'eau et on moule comme les briques ordinaires. On peut remplacer la chaux par de l'argile et on cuit au rouge blanc. Ces briques sont, comme d'ailleurs toutes les briques réfractaires, supérieures aux roches siliceuses naturelles, parce qu'il est facile pendant la fabrication d'éliminer les corps étrangers qu'on rencontre.

Elles résistent très bien aux températures élevées, mais il faut éviter de les employer là où il y aurait contact avec des corps pouvant avoir une action chimique sur elles, et où elles seraient exposées à des variations brusques de température.

Alumine. — L'alumine pure est plus réfractaire que la silice, elle résiste même au chalumeau oxydrique, mais elle ne se rencontre pas dans la nature en abondance. M. Deville a fait des creusets de laboratoire en alumine mélangée avec un peu de silice gélatineuse. L'argile est un silicate d'alumine hydraté qui perd son eau sous l'action de la chaleur et qui résiste très bien aux hautes températures lorsqu'elle est absolument pure.

Les matériaux réfractaires à base d'argile résis-

tent mieux que les précédents au contact des corps basiques et mieux que les matériaux basiques à l'action de la silice. Quand la fabrication est bien conduite on obtient des briques argileuses qui sont moins sensibles que les pierres siliceuses et que les briques de Dinas, aux changements brusques de température.

Toutes ces raisons font que souvent on leur donne la préférence aux matériaux siliceux; quoiqu'il soit plus difficile de trouver une matière première absolument pure; aussi, dans le cas de températures très élevées et quand les actions chimiques ne sont pas à redouter, on emploie les briques siliceuses.

Pour le revêtement des cornues Bessemer et pour les soles des fours Siemens, on fait usage des sables siliceux purs ne contenant que des traces d'alumine et d'oxyde de fer. Sous l'action de la chaleur l'argile perd son eau de constitution et ses propriétés changent; pour cette raison, on n'emploie jamais les matières réfractaires argileuses sans leur faire subir une préparation préalable.

La *bauxite* est une argile extra-alumineuse renfermant 60 à 70 d'oxyde $Al^2 O^3$; elle est colorée en rose ou en rouge par le sesquioxyde de fer. Quand elle est pâle, elle est très réfractaire, son seul défaut est qu'elle prend un retrait considérable et ne prend pas facilement de la cohésion par la cuisson.

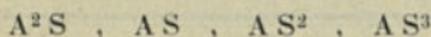
M. Chambier est pourtant parvenu à l'agglomérer.

Son principal gisement est dans le pays des Baux, près d'Arles.

L'argile qu'on trouve dans la nature contient en dehors de son élément constitutif qui est le silicate d'alumine, un certain nombre de corps étrangers, tels que sable, quartz, oxyde de fer, alcalis et terres alcalines. La présence de ces corps augmente la fusibilité de l'argile.

L'argile employée à la confection des briques ordinaires est tellement impure qu'au rouge vif, elle se scorifie, elle se ramollit ou même elle fond complètement.

M. Brongniart a considéré le silicate Al^2S^3 comme le plus réfractaire; il renferme 57,5 0/0 de $Si O^2$. Berthier a fait des expériences pour fondre du sable blanc avec de l'oxyde $Al^2 O^3$ pur dans les proportions :



$A S^2$ et $A S^3$ sont ceux qui se sont le plus ramollis dans les fours. Il a conclu qu'aucun des silicates n'était fusible et que $A S^2$ et $A S^3$ étaient les moins réfractaires.

La composition de ces deux derniers est :

$A S^3$	27	d'alumine et	73	de silice
$A S^2$	36	—	et 64	—

Si on y ajoute soit de la silice, soit de l'alumine, on augmente la réfraction.

III. LOIS DE RICHTERS ET DU D^r BISCHOF

M. Richters a établi par de nombreuses expériences et analyses, la loi suivante : *Des quantités équivalentes de bases fondantes ont la même influence*

sur la fusibilité de l'argile. En outre, la quantité d'une base fondante nécessaire pour accroître la fusibilité de l'argile jusqu'au même degré diminue à mesure que la teneur en silice augmente.

Bischof, de son côté, a posé que la détermination de la proportion de l'alumine par rapport à la base fondante est celle de la silice par rapport à Al^2O^3 :

$$a (Al^2 O^3 + b Si O^3) + Ro$$

Ro étant la base fondante; $\frac{a}{b}$ est l'indice de résistance au feu.

Le tableau suivant donne la composition de quelques argiles réfractaires d'après Bischof :

	Alumine	Silice combinée	Sable	Terres et alcalis	Perte au feu
Argile réfractaire de Saarau. . .	36.60	38.94	4.90	1.26	17.78
Argile réfractaire de Bohême. . .	38.54	40.53	5.15	2.04	13.00
Argile moyennement réfractaire du Palatinat. .	35.05	39.05	8.01	6.75	10.51
Argile peu réfractaire de Siegen.	28.05	30.71	27.61	4.75	8.66

De toutes ces argiles, la moins réfractaire est celle qui contient le plus de sable. On doit donc, lorsqu'on analyse une argile pour savoir à quel

usage elle est propre, bien distinguer la silice combinée de celle qui est libre.

Toutes les argiles additionnées d'eau deviennent plastiques et les pièces qu'on en fabrique deviennent dures par la cuisson. Leur volume diminue et le retrait qu'elles éprouvent détermine souvent des fentes; après la cuisson, l'argile ne reprend plus sa plasticité en présence de l'eau et soumise à une nouvelle cuisson elle ne prend plus de retrait.

Si donc on voulait se servir de l'argile crue et pure pour la fabrication des pièces réfractaires, on n'obtiendrait que des produits médiocres et fendillés. On corrige ce défaut en mélangeant à celle-ci des corps pulvérisés, infusibles par eux-mêmes, incapables de produire avec l'argile des mélanges fusibles et ne prenant pas de retrait. On rend ainsi la pâte plus maigre et il ne se produit plus de crevasses au séchage et à la cuisson.

L'effet de l'introduction des matières destinées à amaigrir la pâte se comprend facilement; pour un même volume, il y a d'autant moins d'argile crue produisant le retrait, que la proportion de ces matières est plus grande; en même temps la contraction de la partie crue du mélange, par le séchage et la cuisson, se produisant entre les grains inertes qu'elle enveloppe, laisse des vides donnant à l'ensemble une certaine porosité; celle-ci favorise l'échappement de la vapeur d'eau et permet aux pièces ainsi fabriquées de supporter plus facilement les changements de température.

On doit donc étudier la nature de l'argile qu'on a sous la main, pour déterminer la proportion de matière maigre qu'on doit introduire dans le mé-

lange; plus une argile sera grasse et plus elle supportera de partie maigre; le rapport de la première à la seconde est souvent de 1 à 2.

Pour amaigrir la pâte argileuse, on se sert de l'argile réfractaire cuite ayant perdu la propriété de prendre du retrait par la chaleur. Dans la fabrication des pièces réfractaires argileuses, on n'ajoute à l'argile cuite que la quantité d'argile crue absolument nécessaire pour rendre la pâte plastique. On soumet les briques ainsi moulées à une cuisson.

Souvent, au lieu de mouler l'argile en briques, on l'emploie sous la forme de pisé pour faire des revêtements; dans ces conditions, le séchage et la cuisson se font sur place.

Les briques provenant d'anciennes constructions ainsi que les pisés à moitié usés, étant débarrassés des scories qui y sont demeurées fixées, étant broyés, peuvent servir comme de l'argile cuite.

IV. MATÉRIAUX RÉFRACTAIRES BASIQUES

Les parties des fours devant être en contact avec des scories basiques qui attaquent le quartz et l'argile réfractaire sont garnies avec des matériaux réfractaires basiques.

Dans certains cas, on emploie comme matières basiques, l'oxyde de fer, battitures ou scories riches, pour garnir les fours, lorsqu'il est nécessaire de maintenir une scorie très ferrugineuse, dont le contact avec d'autres matières réfractaires, abaisserait la teneur en fer; les oxydes de fer résistent mal à l'action de la chaleur, par consé-

quent, on ne peut pas les employer quand la température dans le four doit être assez élevée.

Le fer chromé, dont la formule est $\text{Fe Cr}^2 \text{O}^4$, est plus réfractaire et on l'a appliqué à la construction des fours Martin à haute température; mais son prix est trop élevé pour qu'on trouve une compensation dans l'économie que peut procurer son emploi.

A vrai dire le fer chromé n'est pas une matière basique, il peut être mis en présence de la silice ou des scories siliceuses sans être notablement attaqué; de même, il résiste à la corrosion par les bases terreuses chaux et magnésie; pour ces deux raisons on le désigne sous le nom de matière réfractaire *neutre*.

On l'emploie soit sous forme de blocs réunis par un mortier réfractaire, soit sous forme de pisé ou de briques qu'on obtient en mélangeant du fer chromé réduit en poudre avec du goudron, de la chaux et de la magnésie. Le broyage du fer chromé ne doit pas être poussé trop loin, car les produits qu'on obtient après cuisson sont alors très poreux. De cette façon, on construit actuellement la sole et les pieds-droits des fours Martin, tant en France qu'à l'étranger.

La matière réfractaire basique la plus importante est le *carbonate de magnésie*, ou un mélange de carbonate de chaux et de magnésie. Cette matière a été employée pour la première fois pour la construction des appareils *Thomas et Gilchrist*, c'est-à-dire le Bessemer basique, car la déphosphoration n'est possible qu'avec une garniture de ce genre.

Nous avons vu que la chaux et la magnésie en état de pureté sont infusibles, qu'elles soient séparées ou mêlées ensemble. La silice et l'alumine en faible quantité ne diminuent guère leur degré de réfraction; mais, si la proportion devient importante elle les rend fusibles.

La présence de l'oxyde de fer produit le même effet que la silice et l'alumine, parce qu'il forme avec la chaux et la magnésie des composés fusibles. Cependant, une petite quantité de cette matière provoque une certaine agglomération pendant la calcination.

La matière réfractaire dont on se sert le plus souvent pour fabriquer ces sortes de matériaux est la *dolomie*. Elle est composée de :

Chaux	30
Magnésie	20
Silice.	1 à 2
Alumine.	2
Acide carbonique.	45
Oxyde de fer et matières étrangères.	2 à 1

Si elle renferme plus de 2 0/0 de silice ou plus de 3 0/0 d'oxyde de fer, elle ne pourrait être employée. Plus la teneur en magnésie est élevée, plus la dolomie est réfractaire.

La préparation de la dolomie consiste en une cuisson poussée jusqu'à l'agglomération dans des fours analogues à ceux qui servent pour la fabrication de la chaux, ou encore dans des fours spéciaux analogues aux cubilots. Cette cuisson est indispensable, pour diminuer la tendance de la matière à absorber de nouveau, au contact de

l'air, de l'eau et de l'acide carbonique qui la rendraient inutilisable. On dit alors qu'elle est *frittée*; il en est de même pour les carbonates de chaux et de magnésie.

La dolomie frittée contient 50 à 55 0/0 de chaux, 35 0/0 de magnésie, 5 0/0 de silice et traces d'oxyde de fer, de manganèse et d'alumine.

Voici la composition de la dolomie frittée de Duisburg :

Chaux.	55.27
Magnésie.	35.12
Silice.	5.58
Alumine	1.34
Peroxyde de fer	2.84

La dolomie extraite des carrières est broyée sous des meules verticales ou par tout autre moyen, tamisée et mélangée à une petite proportion de goudron variant de 2 à 8 0/0 qui permet de l'agglomérer. La quantité du goudron varie avec sa nature et aussi avec l'emploi auquel on destine le mélange.

Cette opération du mélange se fait, soit à la pelle, soit dans des malaxeurs, ou encore sous les meules mêmes qui ont servi au broyage. La matière ainsi préparée est employée, soit à faire un pisé pour le revêtement des fours, soit sous forme de briques. Avant de se servir de ces briques, on leur fait subir une deuxième cuisson qui les débarasse des parties volatiles du goudron; le carbone de ce dernier reste et sert de liant aux grains de dolomie. Au commencement de la cuisson, la matière se ramollit sous l'influence de la chaleur,

puis elle acquiert la dureté de la pierre. On peut également s'en servir en état de pisé ou en briques crues et les faire cuire sur place; il faut chauffer pendant douze heures à la température de 300° les briques d'un poids moyen de 25 kilogr. Les pièces plus volumineuses doivent rester jusqu'à sept jours dans le four à recuire et être chauffées jusqu'au rouge.

On peut également employer tout calcaire dolomitique mélangé de carbonate de chaux et de dolomie dans lequel la proportion de silice ne dépasse pas 2 à 3 0/0. Dans certaines usines on emploie de la dolomie broyée qu'on humecte avec de l'eau et de la mélasse et qu'on moule sous forme de briques cuites à haute température, de manière à fritter la matière. On broie à nouveau cette matière, on la mélange avec 8 à 10 0/0 de goudron et on la moule pour former des briques qu'on emploie à l'état cru.

A la place de la dolomie on se sert souvent de la magnésie pure, ou en mélange avec la dolomie et si on ne le fait pas d'une façon plus courante, c'est que la magnésie est plus rare et par conséquent plus chère; la magnésie calcinée est supérieure à la dolomie, car elle est moins susceptible d'absorber de l'eau à la température ordinaire et parce qu'elle résiste mieux à l'action de la silice et des scories siliceuses à haute température. Les fours garnis avec cette matière durent plus longtemps, surtout s'ils ont à résister à des actions chimiques.

Les gisements les plus importants de carbonate de magnésie sont; celui de la vallée de la Veitsch

en Styrie, celui de l'île Eubée et celui de Frankenstein en Silésie.

Le carbonate de la Styrie renferme de 90 à 96 0/0 de carbonate pur, un peu de chaux, 1 0/0 de silice et 3 à 4 0/0 de protoxyde de fer; après calcination, il donne :

Magnésie.	85
Chaux	2
Oxyde de fer.	8
Silice	2.5
Manganèse, acide carbonique.	traces

Pour la cuisson du carbonate de magnésie on se sert des mêmes fours que pour la dolomie. La préparation de la magnésie se fait de deux façons différentes : 1° On calcine jusqu'au rouge sans la fritter, on la broie, on la moule en briquettes à la presse hydraulique et on cuit les briques au blanc vif; 2° On mélange la magnésie calcinée et non frittée avec une certaine quantité de carbonate fritté. Ces opérations se font sur le lieu d'extraction lui-même, car les briques sont assez résistantes pour supporter un long voyage; 3° On peut se servir du carbonate comme pisé après l'avoir calciné et fritté.

On peut également mélanger le carbonate fritté avec du goudron ou encore remplacer le goudron, dont le prix est relativement élevé, par un lait de dolomie ou de magnésie qu'on obtient en traitant par l'eau les carbonates calcinés sans frittage.

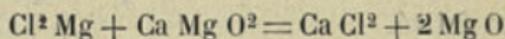
La fabrication des briques de magnésie demande des soins particuliers; en Styrie, on commence par concasser le carbonate et par éliminer tous les

morceaux dans lesquels on reconnaît la présence des matières étrangères, puis on cuit la matière au blanc dans un four revêtu de matières magnésiennes. La magnésie ainsi obtenue est triée à nouveau et séparée des poussières du combustible et de la chaux qui s'éteint d'elle-même sous l'influence de l'air humide. On broie ensuite la matière dans des moulins broyeur et on moule dans des moules en acier sous une très forte pression. Les briques ainsi moulées sont soumises à une deuxième cuisson dans le même four, et on répète cette cuisson deux ou trois fois suivant les besoins.

On fabrique des briques de magnésie à l'île d'Eubée, mais le carbonate de magnésie qu'on y extrait est de composition très variable, et par conséquent, la qualité des briques également.

Comme les gisements de carbonate de magnésie sont peu nombreux, on a cherché à tirer profit du chlorure de magnésium, produit sans aucune valeur et résidu de la fabrication du chlorure de potassium.

Le procédé Clisson consiste à traiter la dissolution du chlorure de magnésie par la dolomie calcinée :



On obtient ainsi un précipité blanc de toute la magnésie contenue dans le chlorure et dans la dolomie, avec formation de chlorure de calcium.

On filtre ce précipité hydraté, on le lave, on le presse et on le calcine; on le moule dans des moules en acier, et on le soumet à la cuisson.

On peut également traiter la dolomie calcinée

par de la mélasse et un peu d'eau ; il se forme un sucrate de chaux soluble et un précipité insoluble de magnésie. On régénère la dissolution sucrée en précipitant la chaux du sucrate par un courant d'acide carbonique, et on peut s'en servir une deuxième fois. Ces deux procédés ne sont guère pratiques, et sont déjà depuis longtemps abandonnés.

V. BRIQUES AU CARBONE

Le carbone étant infusible aux plus hautes températures, on a proposé de faire des briques en agglomérant du coke ou du graphite pulvérisé, par de l'eau chargée d'argile ou du goudron. Vers 1880, on a employé en France, dans des fours à très hautes températures, du graphite de cornues à gaz, aggloméré avec du brai. L'emploi de ces sortes de matériaux réfractaires s'est depuis développé, surtout pour les hauts fourneaux, à la suite des perfectionnements apportés à leur fabrication par Burger, et des essais très longs ayant prouvé la valeur réelle de ces produits.

D'après Burger, on peut remplacer le graphite, dont le prix est trop élevé, par du coke pur et sec, broyé et mélangé avec $\frac{1}{5}$ de son poids de goudron. Cette pâte est moulée sous forme de briques, qu'on sèche à une température douce pendant quinze jours, puis on les cuit dans des fours à moufle à l'abri de l'air. Il faut éviter de les mettre en contact avec des gaz oxydants chauffés à haute température et en contact avec des scories riches en oxyde de fer, qui serait réduit aux dépens des briques. Il faut également les mettre à l'abri du

contact du fer peu carburé, qui dissoudrait le carbone des briques.

VI. MORTIERS RÉFRACTAIRES

Les briques réfractaires sont liées ensemble par des matières également réfractaires et infusibles aux températures auxquelles les briques sont soumises. Il est inutile de faire observer que les joints doivent être aussi minces que possible, et les surfaces en contact bien dressées ; pour cela, souvent on prend la précaution de les roder en frottant les briques les unes contre les autres avant de les mettre en place ; on enduit alors de mortier la surface de contact de la brique à poser, et on la fait glisser deux ou trois fois dans la place qu'elle doit occuper, pour que le contact soit plus complet.

Le mortier réfractaire se prépare ordinairement avec les mêmes matières que les briques qu'il doit relier, auxquelles on ajoute certains corps étrangers, ayant une propriété liante.

La poussière qui provient du dressage des briques réfractaires argileuses donne un bon mortier, mélangée avec de l'argile réfractaire crue ; de même, l'argile cuite broyée et mélangée avec de l'argile crue et de l'eau, peut servir pour faire les joints.

Pour les matériaux non basiques, Lürmann conseille d'employer un mélange de sable, de calcaire et de ciment, ou bien du laitier de haut fourneau, du verre pilé, de l'argile cuite, le tout finement pulvérisé et employé avec de l'eau en quantité

convenable. Le mortier qu'on obtient de cette façon adhère bien aux surfaces avec lesquelles il est en contact.

Pour les briques basiques, on emploie un mortier formé de goudron et de dolomie ou de magnésie calcinée, que l'on pose à chaud. On peut également se servir de la magnésie calcinée, broyée et criblée, délayée dans de l'eau ou du lait de dolomie.

Souvent on se contente de remplir les joints avec de la poussière fine de magnésie posée à sec.

Pour les briques de carbone, on se sert d'un mortier formé de quatre parties de coke pulvérisé et une partie d'argile crue délayée dans un peu d'eau.

Pour les briques au fer chromé, on emploie un mortier formé de ce minerai pulvérisé et de la chaux éteinte, ou de magnésie en poudre ; la chaleur produit une demi-fusion, qui transforme ce mélange en une roche très dure, infusible et poreuse.

Pour tous autres renseignements sur la fabrication des briques, consulter le *Manuel du Briquetier-Tuilier* (Encyclopédie-Roret).

FIN DU TOME PREMIER

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME PREMIER

	Pages
PRÉFACE.	v
Des matières premières	
CHAPITRE PREMIER. — <i>Des minerais de fer</i>	2
I. Classification des minerais de fer.	5
Fer spathique carbonaté	7
Fer oligiste	13
Fer hydraté.	16
Fer oxydulé.	22
Produits riches en fer provenant d'opérations diverses.	24
Minerais de manganèse	27
II. Docimasia.	28
Essai au chalumeau	29
Essai aux acides.	37
Essai proprement dit.	38
Analyse.	43
III. Exploitation des minerais	50
Exploitation à ciel ouvert.	53
Travaux souterrains.	54
Abatage.	57
Boisage.	58

Aérage	60
Transports	62
IV. Préparation des minerais.	63
Cassage.	63
Triage	64
Lavage et débouillage	67
Grillage.	70
Grillage en tas et en stalles	77
Grillage dans les fours.	80
Four de Siégen	84
Four Borrie.	85
Four Gjers.	87
Four de grillage des hauts fourneaux de Ria ou four F. Wagner	89
Four Westman	91
Four Allevard.	96
Macération et lavage chimique	98
CHAPITRE II. — <i>De l'air atmosphérique.</i>	100
I. Calcul de la quantité de vent à insuffler dans les hauts fourneaux	103
Vitesse et pression du vent injecté.	110
Du tirage des fourneaux	112
II. Des machines soufflantes.	115
Des soufflets proprement dits.	118
Soufflet Rabier.	121
Soufflets à piston	124
Machines soufflantes à piston.	126
III. Disposition des obturateurs et mode de leur construction.	127
IV. Des régulateurs	133
Régulateurs à capacité constante	135
Régulateurs à capacité variable.	137
V. Air chaud.	141

VI. Appareils à chauffer l'air.	149
Appareils en fonte.	150
Appareil Taylor. Tuyaux horizontaux.	150
Appareil Calder.	150
Appareil à tuyaux horizontaux à cloison.	154
Tuyaux verticaux pendants.	157
Tuyaux verticaux débout.	159
Tuyaux verticaux à siphons.	160
Appareils en briques.	163
Appareil ou récupérateur Siemens.	163
Appareil Cowper et ses dérivés.	167
Appareil Cowper perfectionné par M. Lencau- chez.	171
Appareil Whitwell et ses dérivés.	174
Appareil Whitwell modifié.	176
Appareil Macco.	178
Soupapes et valves pour appareils à briques.	179
Soupape Burgers.	181
Lunette de Schmidt.	183
Soupape Lister.	184
VII. Conduite et distribution du vent.	186
VIII. Porte-vent et tuyères.	190
IX. Pyromètres.	196
CHAPITRE III. — <i>Combinaisons du fer avec cer- taines matières agissant plus ou moins directement sur ce métal et en modifiant les caractères naturels</i>	
I. De la chaleur.	201
II. Du carbone.	210
III. De l'oxygène.	221
IV. De la silice.	229
V. De l'alumine.	234
VI. De la chaux.	236
VII. De la magnésie.	239

VIII. Du soufre.	241
IX. De l'eau.	247
X. Du phosphore	254
XI. Du manganèse.	255
CHAPITRE IV. — <i>Des fondants et additions diverses</i>	258
I. Calcul du lit de fusion.	272
II. Calcul stoechiométrique	273
III. Méthode de Mrazek	275
IV. Calcul des lits de fusion des hauts fourneaux par la méthode Platz.	287
CHAPITRE V. — <i>Des combustibles.</i>	297
I. Combustibles naturels solides.	300
Bois.	300
Dessiccation et torréfaction du bois.	309
Tourbe	313
Du lignite.	320
De la houille	330
De l'anthracite.	341
II. Comparaison des combustibles solides natu- rels.	351
III. Combustibles carbonisés	351
Carbonisation du bois	357
Carbonisation en meules	361
Carbonisation dans les fours	367
Carbonisation en vase clos	370
Propriétés du charbon de bois	372
Carbonisation de la tourbe.	374
Carbonisation de la houille.	375
Carbonisation en meules	378
Carbonisation dans les fours	381
Fours de boulangers.	382
Fours nouveaux.	386
Four belge Smits	387
Four Appolt.	387

Four Smet ou four belge.	395
Four François.	397
Four Coppée.	400
Fours avec récupération des produits de la distillation	405
Four Carvès.	405
Four Seibel.	409
Four Otto-Hoffmann.	412
Four Festner-Hoffmann	416
IV. Conditions à remplir pour obtenir un bon coke	416
V. Combustibles liquides	418
VI. Combustibles gazeux.	420
VII. Gaz résidus	421
VIII. Gaz à l'air.	424
IX. Gazogènes.	430
Gazogène Siemens	435
Gazogène Saillers	437
Gazogène de l'aciérie Phœnix.	439
X. Condenseurs d'eau.	442
XI. Décomposition de la vapeur d'eau par le fer ou le charbon en ignition.	446
Décomposition par le fer.	446
Marche du cubilot.	447
XII. Gaz à l'eau carboné	449
XIII. Procédés actuels de fabrication	449
XIV. Gaz mixte.	454
CHAPITRE VI. — <i>Des fours</i>	455
I. Fours découverts ou bas foyers.	456
II. Fours à cuve	457
III. Fours à réverbère	458
Fours à réverbère à chauffage direct pourvus de grilles	458

Fours à réverbère chauffés au gaz.	463
Fours Siemens à chaleur régénérée	463
IV. Appareils de renversement.	471
V. Brûleurs.	476
VI. Laboratoire.	476
VII. Fours à gaz sans régénérateurs.	477
Four Boétius	477
Four Bicheroux	479
VIII. Fours rotatifs et fours oscillants	480
IX. Construction des fours.	481
CHAPITRE VII. — <i>Matériaux réfractaires.</i>	482
I. Généralités	482
II. Propriétés réfractaires de certaines matières entrant dans la composition des matériaux réfractaires	484
Carbone.	484
Silice.	485
Grès	485
Ganister.	486
Schiste siliceux	486
Gaize.	486
Kieselguhr.	486
Briques de Dinas	487
Alumine	487
Bauxite.	488
III. Lois de Richters et du D ^r Bischof	489
IV. Matériaux réfractaires basiques.	492
V. Briques au carbone	499
VI. Mortiers réfractaires.	500

FIN DE LA TABLE DU TOME PREMIER

ENCYCLOPÉDIE-RORET
COLLECTION
DES
MANUELS-RORET

FORMANT UNE
ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES & DES ARTS

FORMAT IN-18

Par une réunion de Savants et d'Industriels

Tous les Traités se vendent séparément.

La plupart des volumes, de 300 à 400 pages, renferment des planches parfaitement dessinées et gravées, et des vignettes intercalées dans le texte.

Les Manuels épuisés sont revus avec soin et mis au niveau de la Science à chaque édition. Aucun Manuel n'est cliché, afin de permettre d'y introduire les modifications et les additions indispensables.

Cette mesure, qui met l'Éditeur dans la nécessité de renouveler à chaque édition les frais de composition typographique, doit empêcher le Public de comparer le prix des *Manuels-Roret* avec celui des autres ouvrages, tirés sur cliché à chaque édition, et ne bénéficiant d'aucune amélioration.

Pour recevoir chaque volume franc de port, on joindra, à la lettre de demande, un mandat sur la poste (de préférence aux timbres-poste) équivalant au prix porté au Catalogue.

Cette franchise de port ne concerne que la **Collection des Manuels-Roret** et n'est applicable qu'à la France et à l'Algérie. Les volumes expédiés à l'Étranger seront grevés des frais de poste établis d'après les conventions internationales.

Bar-sur-Seine. — Imp. v^o C. SAILLARD.