

672#BRU

S. BRULLÉ

*Ingénieur-Conseil en matière de Sidérurgie et de Mines de Fer
Ancien Professeur et Répétiteur à l'École Centrale de Paris
Ancien Directeur d'usine Sidérurgique*

LA SIDÉRURGIE

à la portée de tout le monde

MONOGRAPHIE COMPLÈTE

de la Fabrication de l'Acier,
depuis le Minerai de Fer jusqu'au Rail, à la Poutrelle,
et à la Tôle

PREMIÈRE PARTIE

Du Minerai de Fer à la Fonte



Dépôt chez l'Auteur : 124 bis, Avenue de Villiers, à PARIS (XVII^e).
Et dans toutes les Librairies Scientifiques.

ECOLE CENTRALE DE LILLE



D000006775

28 FR. 50

NI 13368

~~Cote 13368.1~~

672 # BRU

S. BRULL

*Ingénieur-Conseil en matière de Sidérurgie et de Mines de Fer
Ancien Professeur et Répétiteur à l'Ecole Centrale de Paris
Ancien Directeur d'usine Sidérurgique*

LA SIDÉRURGIE

à la portée de tout le monde

MONOGRAPHIE COMPLÈTE

de la Fabrication de l'Acier,
depuis le Minerai de Fer jusqu'au Rail, à la Poutrelle,
et à la Tôle

PREMIÈRE PARTIE

Du Minerai de Fer à la Fonte



CENTRE

DE DOCUMENTATION



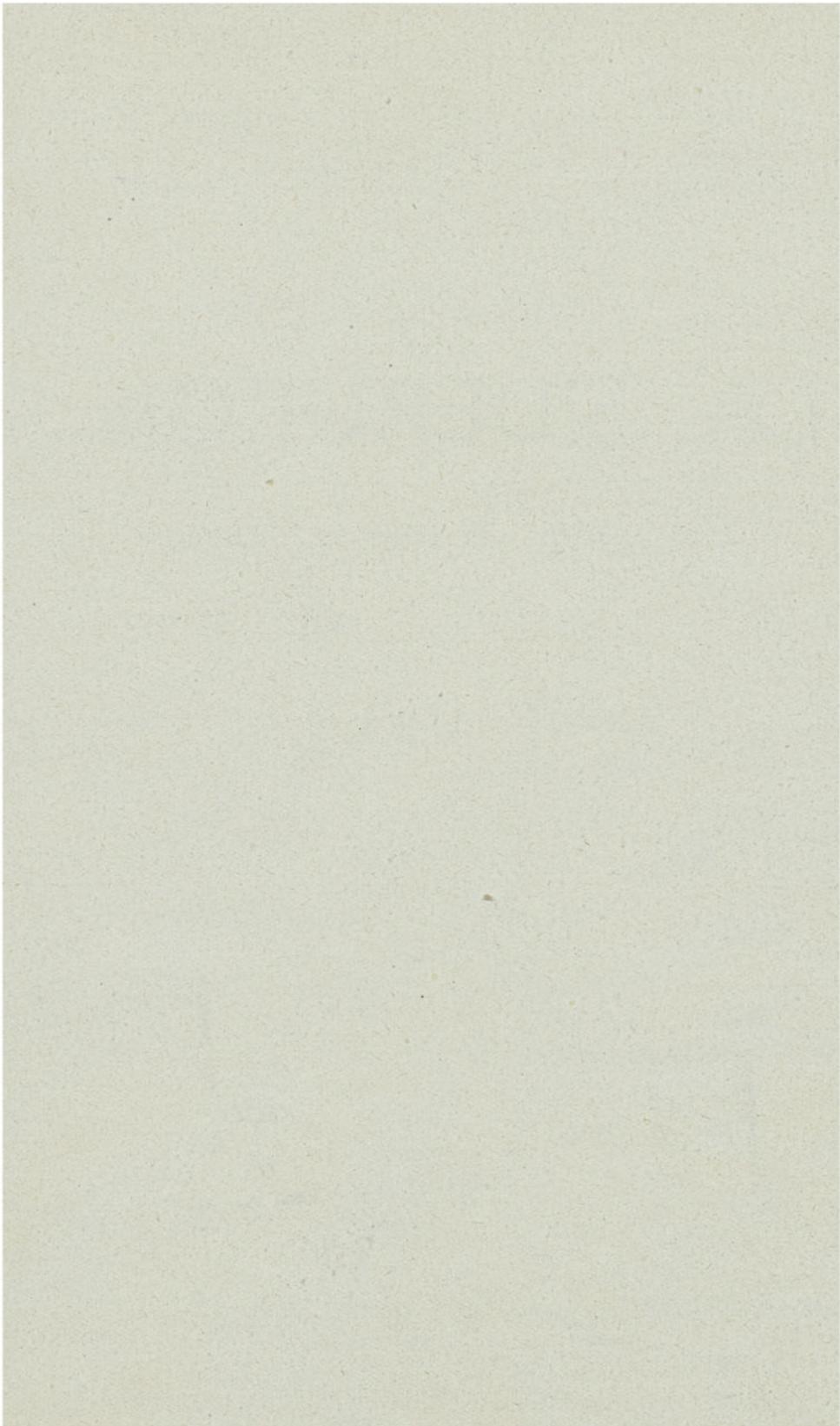
ÉCOLE CENTRALE
D'INGÉNIEURS

Cité Scientifique

59651 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX
FRANCE

Dépôt chez l'Auteur : 124 bis, Avenue de Villiers, à PARIS (XVII^e).

Et dans toutes les Librairies Scientifiques.



A feu mon Père ALBERT BRULL,
auquel je dois tout.

A tous ceux de mes Collaborateurs, Ingénieurs,
Employés de tous ordres, Contremâîtres,
Ouvriers surtout, les plus humbles et les plus attachants,
qui m'ont toujours compris et aidé,
depuis le début de ma carrière.

A tous ceux qui travaillent et qui cherchent à s'élever
par le savoir et la pensée,
je dédie ce livre.

PRÉFACE

« Qui de nous ne s'est demandé à un moment quelconque de son existence, par quelles opérations mystérieuses on passe du minerai de fer qui ressemble à une pierre plus ou moins rouge ou terreuse, à ces tubes d'acier brillants qui constituent les canons, à ces masses lourdes et pointues qui forment les obus destructeurs, à ces rubans polis que l'on dirait sans fin et sur lesquels d'autres masses d'acier trépidantes circulent à des vitesses vertigineuses.

« Quand le hasard des innombrables cours ou leçons de l'enfance, ou de l'adolescence même, effleure ce sujet, on y rencontre une si grande variété de mots tels que sidérurgie, fondant, laitier, scorie, cornue, Thomas, récupérateur, Martin, bloom..., et des applications très nombreuses des sciences les plus diverses : chimie, physique, mécanique, thermo-dynamique, électricité, qu'épouvanté dès le premier abord, on en conclut qu'il faut étudier pendant longtemps pour arriver péniblement à comprendre ce qui se passe.

« Ayant tenté parfois d'expliquer les divers phénomènes de la Sidérurgie à des gens les plus divers : techniciens, amateurs, et même à des enfants, j'ai constaté, avec une heureuse surprise, que tout le monde est apte à les comprendre d'une façon complète, même sans aucune étude préalable.

« Sur les instances de ces personnes et amis, j'ai réuni ces diverses explications en un volume que j'ai essayé de rendre aussi peu aride que le sujet pouvait le comporter.

*« Rien ne me serait plus agréable que d'avoir rendu accessible
« à tous la compréhension de cette industrie de l'acier dont on peut
« dire que le développement mesure la grandeur du pays. »*

Mai-Juin 1914.

*Depuis le moment où cette préface a été écrite, dix-huit ans ont
passé et la guerre a démontré amplement l'influence de l'acier sur la
vie d'une nation.*

*C'est l'union des plus gros producteurs d'acier du monde, et en
particulier des Etats-Unis, qui en tiennent la tête de fort loin, qui a
permis d'achever cette période si triste pour l'humanité et la civilisation.*

*Connaître les éléments de cette puissance des Nations est donc utile
à tous et intéressante à diffuser, et c'est ce qui m'a incité à reprendre
cet ouvrage où point où je l'avais laissé en juillet 1914.*

Au lecteur de juger et de dire si mon effort est justifié.

Novembre 1932.

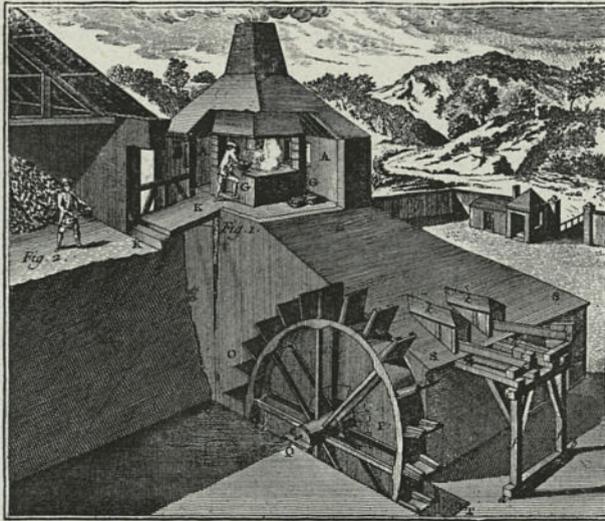


FIG. 1
HAUT FOURNEAU ANCIEN.

Cette figure montre le chargement au gueulard du fourneau G, le charbon venant de la halle apporté dans des paniers au-dessus du pont K. On voit aussi la roue hydraulique O, P, Q, actionnant les balanciers des soufflets dont on aperçoit la charpente a, b, c, d, f, h, k.

CHAPITRE PREMIER

La Sidérurgie (du grec sideros : fer, et ergon : travail), est l'art de fabriquer et de travailler le fer. Elle a pour base la chimie, science dont nous connaissons les lois les plus importantes, et qui intervient dans une foule de phénomènes qui se passent chaque jour sous nos yeux. Ainsi, l'opération qui consiste à brûler du charbon pour se chauffer est une *opération chimique*.

Son étude va nous fournir l'occasion d'apprendre quelques termes techniques et quelques lois simples dont la connaissance est indispensable pour la compréhension de ce qui suit.

Nous savons que l'air est un mélange de plusieurs gaz dont les deux principaux sont l'azote et l'oxygène, mélange dans lequel l'oxygène joue le rôle actif ⁽¹⁾ ;

(1) 100 litres d'air sec et pur renferment environ 21 litres d'oxygène et 79 litres d'azote ou 100 gr. d'air sec et pur se composent d'environ 23 gr. d'oxygène pour 77 gr. d'azote. Ces chiffres sont amplement suffisants bien que des analyses plus précises aient donné les chiffres ci-après :

Pour 100 litres d'air	ou	Pour 100 gr. d'air.
21 l. 02 d'oxygène		23 gr. 02 d'oxygène
78 l. 04 d'azote		75 gr. 5 d'azote
0 l. 94 d'argon		1 gr. 5 d'argon

Sous le nom d'argon, on comprend à l'heure actuelle une série de gaz nouveaux dénommés hélium, néon, xénon, crypton.

Habituellement, l'air renferme aussi de la vapeur d'eau en quantité variable avec l'état hygrométrique et de l'anhydride carbonique, 25 à 40 litres par 100.000 litres d'air.

Le poids du litre d'air est de 1 gr.293 à 0° et à la pression d'une atmosphère.

Si nous appelons le charbon *carbone*, et l'action de brûler combustion, l'opération qui consiste à brûler du charbon pour se chauffer peut se traduire ainsi :

La *combustion* du *carbone* par l'*oxygène* de l'air produit de la chaleur en donnant des gaz qui se dégagent.

Ces gaz peuvent être du gaz carbonique, de l'oxyde de carbone, voire un mélange des deux (1).

Nous connaissons les propriétés les plus communes de ces gaz.

Ainsi, on reconnaît le gaz carbonique au picotement si agréable des siphons d'eau de seltz et des boissons gazeuses.

Pris avec modération son absorption peut n'être pas nuisible.

Nous n'en dirons pas autant du gaz oxyde de carbone qui, à côté de ses qualités dont nous verrons plus tard l'utilisation, a le grave inconvénient d'être un poison violent (2).

Sa production cause les funestes accidents des poêles à combustion lente.

Il est l'agent homicide de toutes les asphyxies par réchauds; c'est lui qui occasionne les multiples intoxications qui ont lieu trop fréquemment, hélas ! aux abords des hauts fourneaux dans les usines métallurgiques.

(1) Nous n'avons pas jugé utile d'alourdir cette explication en indiquant la façon de nommer les corps produits chimiquement ou la nomenclature des composés chimiques. Le nom du nouveau corps est un assemblage de ceux qui ont servi à le former. Ainsi, dans ce cas particulier, les corps qui ont agi l'un sur l'autre sont l'*oxygène* de l'air et le *carbone*, le produit s'appellera donc un *carbure d'oxygène* ou un *oxygène de carbone*. C'est le dernier mot qui a prévalu en le raccourcissant un peu, soit *oxyde de carbone*. Mais dans le cas où les mêmes corps peuvent en produire plusieurs autres, il a fallu adopter une règle pour distinguer ces noms. On a admis que celui qui contenait le moins d'*oxygène* se terminerait en « *eux* » et l'autre en « *ique* ». Ce qui ferait donc *oxyde carboneux* et *oxyde carbonique*. Mais les deux corps ayant été trouvés à des époques différentes, et avant qu'on ne connaisse les rapports qui existent entre eux, leurs noms pratiques leur sont restés et on appelle l'un *oxyde de carbone* et l'autre *gaz ou acide carbonique*.

En fait, même si on les appelait *oxyde carboneux* et *oxyde carbonique*, ils seraient mal nommés. On dit, en effet, pour la combinaison de l'*oxygène* avec un corps tel que le *carbone* ou le *soufre*, qu'on obtient un *anhydride* et, par suite, les noms exacts des deux corps résultant de la combinaison du *carbone* avec l'*oxygène* seraient : *anhydride carboneux* et *anhydride carbonique*. Si le *gaz* ou *acide carbonique* est souvent appelé par son nom exact d'*anhydride carbonique*, l'*oxyde de carbone* ne l'est jamais. Mais, au fond, cela n'est qu'une question de mots qui ne change rien à nos connaissances chimiques concernant ces deux gaz.

(2) La quantité moyenne de *gaz carbonique* est de 25 à 40 litres par 100 mètres cubes dans l'air; à Paris, elle est de 33 à 35 litres par 100 mètres cubes; 28 à 30 litres seulement au Parc Montsouris.

Elle atteint 100 à 150 litres par 100 mètres cubes dans les salles de réunion.

Elle varie de 50 à 150 litres par 100 mètres cubes dans le Métropolitain.

Le Conseil supérieur d'hygiène impose une limite de 100 litres de *gaz carbonique* par 100 mètres cubes d'air. Cela n'a rien d'absolu car cette limite est de 80 litres seulement en Angleterre.

1 litre de *gaz oxyde de carbone* sur 100 litres d'air tue un oiseau instantanément.

Si la proportion atteint 2 litres sur 3.000, 25% des globules rouges du sang sont détruits en une demi-heure chez l'homme, alors qu'il faut 30 litres de *gaz carbonique* sur 100 litres d'air pour produire l'asphyxie. On n'est jamais arrivé à des précisions mathématiques concernant l'action des gaz du *carbone* sur l'organisme, bien que de nombreuses expériences aient été faites.

A titre de document on peut dire que :

En ce qui concerne le *gaz oxyde de carbone*, 1 litre par 200 mètres cubes d'air n'a pas d'inconvénient; pour 1 litre par 100 mètres cubes, il faut prendre des précautions; enfin, s'il y a 2 litres d'*oxyde de carbone* par 100 mètres cubes d'air, on doit aviser les Services d'architecture de la Ville qui forcent le propriétaire à faire des réparations. En résumé l'*oxyde de carbone* est considéré comme cent fois plus nocif que le *gaz carbonique*.

Mais étudions d'un peu plus près la combustion du carbone par l'oxygène de l'air, et aidons-nous de l'arithmétique.

Des savants ont vérifié que :

12 gr. de carbone, en se combinant avec 16 gr. d'oxygène, donnent 28 gr. d'oxyde de carbone ;

de même 12 gr. de carbone, en se combinant avec 32 gr. d'oxygène, donnent 44 gr. de gaz carbonique.

Nous en concluons de suite que si l'on a du gaz oxyde de carbone, par exemple 28 gr., en le combinant avec 16 gr. d'oxygène, on obtiendra 44 gr. de gaz carbonique.

En langage courant cela veut dire que le gaz oxyde de carbone peut lui-même brûler comme le charbon pour donner du gaz carbonique en dégageant de la chaleur ⁽¹⁾.

Que si on pouvait combiner 44 gr. de gaz carbonique avec 12 gr. de charbon on obtiendrait 56 gr. ou 2 fois 28 gr. d'oxyde de carbone — ce qui signifie qu'en présence d'un excès de charbon le gaz carbonique formé donne de l'oxyde de carbone.

Scientifiquement ces résultats se traduisent comme suit :

I. La combustion incomplète du carbone par l'oxygène donne de l'oxyde de carbone combustible et dégage de la chaleur.

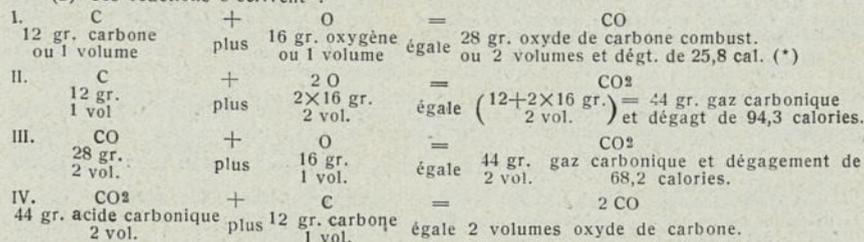
II. La combustion complète du carbone par l'oxygène donne du gaz carbonique qui n'est plus combustible et dégage de la chaleur, mais plus que dans le cas précédent.

III. La combustion de l'oxyde de carbone par l'oxygène donne du gaz carbonique qui n'est plus combustible et dégage une quantité de chaleur qui est la différence des précédentes.

IV. Le gaz carbonique se transforme en oxyde de carbone en passant sur du carbone en excès ⁽²⁾.

(1) Ce phénomène très simple, que nous étudierons plus complètement, a reçu d'innombrables applications en sidérurgie par la création des « gazogènes ». Ces appareils ont pour rôle de transformer le charbon, combustible solide, incommode à manipuler et à doser, en « combustible gazeux » (oxyde de carbone principalement) qu'une simple tuyauterie permet d'amener au point choisi pour l'utilisation et dont on peut facilement régler le débit donc la consommation au moyen d'un robinet comme pour le gaz d'éclairage. Enfin le gaz ainsi obtenu s'il est chauffé avant l'emploi permet de réaliser de hautes températures dans les fours où il est utilisé au lieu de charbon.

(2) Ces réactions s'écrivent :



(*) Pour mesurer les différences de températures, on se sert du thermomètre, qui est

Les savants ont aussi examiné les mêmes phénomènes en n'envi-
sageant que les volumes et ils ont constaté que :

12 gr. de carbone combinés à 11 l. 16 d'oxygène donnent 22 l. 32
d'oxyde de carbone.

12 gr. de carbone combinés à 22 l. 32 d'oxygène donnent 22 l. 32
de gaz carbonique.

22 l. 32 d'oxyde de carbone combinés à 11 l. 16 d'oxygène don-
nent 22 l. 32 de gaz carbonique.

Ces chiffres dont les derniers, en particulier, peuvent paraître
anormaux, s'expliquent très bien. Un morceau de sucre mis dans un
verre d'eau y disparaît sans que le volume d'eau en soit modifié.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que de combustion par l'oxygène
pur. Or, dans la pratique, ce cas est exceptionnel et les combustions
ont lieu le plus souvent par l'oxygène dilué dans un gaz neutre, l'azote
et formant avec lui un mélange qui constitue l'air atmosphérique
comme nous l'avons vu page 1. Cela ne change pas grand chose aux
résultats précédents. Nous savons en effet (renvoi, page 1) que l'air
contient environ 1/5 de son volume d'oxygène ou 1/4 de son poids.

Donc, 12 gr. de carbone combinés à 11 l. 16 \times 5 soit 55 l. 8 d'air
donnent 22 l. 32 d'oxyde de carbone et de l'azote ;

12 gr. de carbone combinés à 22 l. 32 \times 5 soit 111 l. 6 d'air don-
nent 22 l. 32 de gaz carbonique et de l'azote ;

22 l. 32 d'oxyde de carbone combinés à 5 \times 11 l. 16 = 55 l. 8
d'air donnent 22 l. 32 de gaz carbonique et de l'azote.

Nous pouvons mettre ces chiffres sous une autre forme qui nous
sera plus utile en disant :

1 kg. de charbon nécessite 12 kg. ou 9.250 litres d'air pour former
du gaz carbonique, 9 m³ 250 pesant 13 kg.

1 kg. de charbon nécessite 6 kg. ou 4.625 litres d'air pour former
de l'oxyde de carbone.

1 kg. d'oxyde de carbone nécessite 2 kg. 56 ou 1.980 litres d'air
pour être transformé en gaz carbonique ; ou

1 litre de gaz carbonique nécessite 2 l. 5 d'air pour être trans-
formé en gaz carbonique ⁽¹⁾.

connu de tout le monde. Pour mesurer les quantités de chaleur, on se sert d'une unité nom-
mée « la Calorie, » qui est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température
de 1 kilogramme d'eau. On l'appelle aussi la grande Calorie. Pour les petites quantités de
chaleur, on se sert parfois d'une unité mille fois plus petite (comme le mètre et le millimè-
tre), la petite calorie ou calorie gramme. C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever
de 1° la température d'une quantité d'eau égale à 1 gramme.

(1) En tenant compte des chiffres précis de la page 1 (1) les résultats s'expriment ainsi
qu'il suit :

1 kg. de charbon nécessite 11 kg. 58 d'air (ou 7.666 litres), et donne par combustion
12 kg. 58 (7.666 litres) d'un mélange contenant 3 kg. 66 (1.860 litres) de C O₂ et 8 kg. 92
(5.806 litres) d'azote.

1 kg. de charbon nécessite 5 kg. 79 d'air (ou 3.833 litres), pour donner 6 kg. 79
(4.763 litres) d'un mélange contenant 2 kg. 33 (1.860 litres) d'oxyde de carbone et 4 kg. 46
(3.833 litres) d'azote.

Mais les résultats donnés dans le texte sont suffisamment approchés pour les besoins de
la pratique.

Nous venons d'exposer ainsi la théorie complète de la combustion du charbon. Examinons maintenant quelques applications pratiques.

Prenons d'abord le bon vieux poêle d'antan où l'on mettait une faible couche de charbon à chaque charge et qu'on garnissait à intervalles rapprochés (*fig. 2*).

On constate que dans ces appareils il y a une arrivée d'air et un départ à la cheminée à clef.

Si on bouche l'arrivée d'air, le poêle s'éteint (ceci est évident puisque la combustion s'arrête par manque d'oxygène). Dans ces sortes d'appareils le charbon est rouge blanc et la flamme parfois bleuâtre à son extrémité. C'est que le charbon, au contact de l'oxygène, s'est

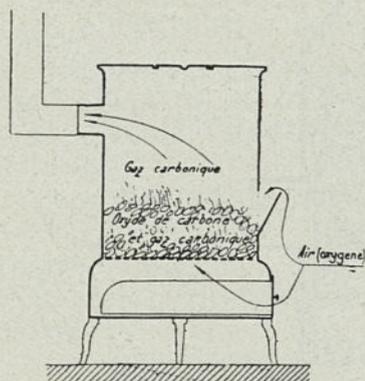


FIG. 2.
POÊLE COURANT
(Combustion vive)

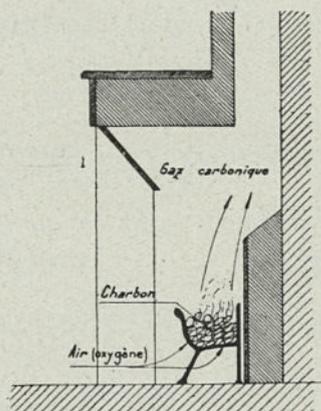


FIG. 3.
CHEMINÉE AVEC GRILLE
(Combustion vive)

transformé directement en gaz carbonique en dégageant le maximum de chaleur. S'il se forme un peu d'oxyde de carbone, au contact du charbon rouge et de la flamme, il s'allume en donnant une coloration bleue, grâce à l'air qui arrive librement et en grand excès.

En réalité, une partie du gaz oxyde de carbone ainsi formé s'échappe par la cheminée, avec le gaz carbonique, et cela malgré le grand excès d'air ajouté. Il en est de même pour les grilles simples (*fig. 3*).

Si nous examinons les poêles modernes, quels qu'ils soient, nous constatons que le charbon s'y trouve en couches très épaisses au-dessus de la grille et que le chargement s'y effectue à intervalles de temps très longs, toutes les 12 ou 24 heures. Près de la grille, le charbon brûle au contact de l'air arrivant par la partie inférieure et donne du gaz carbonique, lequel, en passant sur le charbon rouge qui se trouve

au-dessus, donne de l'oxyde de carbone (1). L'oxyde de carbone ne peut-être brûlé qu'au moyen d'une arrivée d'air spéciale (2), avant qu'il ne s'en aille par la cheminée (fig. 4).

On voit tout de suite que, dans ces poêles modernes, il y a production d'une grande quantité d'oxyde de carbone qui circule dans l'appareil et qu'il suffit d'un mauvais tirage qui refoule les gaz à l'intérieur de l'appartement, ou d'un appareil mal fermé ou ayant des fuites, pour occasionner des accidents très graves.

Nous décrirons plus tard une application importante de ces principes dans les gazogènes.

Ce n'est pas sans dessein que nous nous sommes attardés à décrire le phénomène de la combustion du charbon qui prouve que

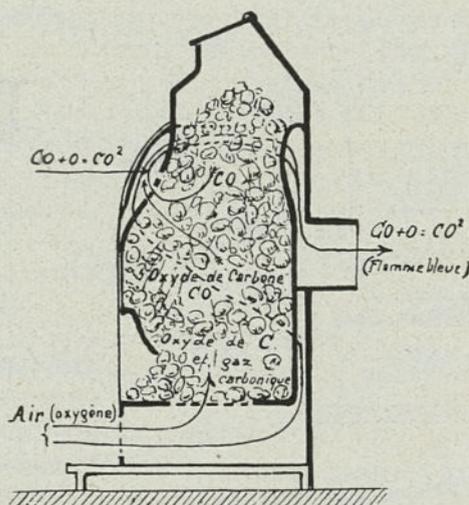
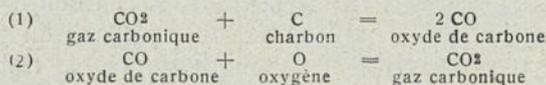


FIG. 4.
POÊLE A COMBUSTION LENTE

tout le monde fait de la chimie. Cette vérité est encore plus frappante lorsqu'il s'agit de composés chimiques du fer. Qui n'a eu occasion, en effet, souvent à son grand regret, de voir rouiller une pièce en fer, que ce soit clou, charnière, clef, serrure, fusil ou bicyclette ?

Or qu'est-ce que la rouille ? Mais tout simplement le résultat de l'action de l'oxygène de l'air sur le fer, donc encore un oxyde de fer, c'est-à-dire une combinaison chimique.

C'est cette rouille qui constitue le minerai de fer qu'on trouve dans la terre.



Pour le fer comme pour le carbone, l'oxygène peut donner plusieurs composés dont les premiers ont été appelés oxyde ferreux ⁽¹⁾ et oxyde ferrique. Mais les découvertes de la chimie ont permis de reconnaître l'existence d'un plus grand nombre d'oxydes de fer et en particulier :

le sous-oxyde de fer dans lequel 224 gr. ou 112 gr. de fer sont combinés à 16 gr. d'oxygène ;

le protoxyde de fer dans lequel 56 gr. de fer sont combinés à 16 gr. d'oxygène ;

le sesquioxyde de fer dans lequel 112 gr. de fer sont combinés à 48 gr. d'oxygène ;

l'oxyde magnétique dans lequel 168 gr. de fer sont combinés à 64 gr. d'oxygène ;

l'oxyde ferrique ou peroxyde de fer dans lequel 56 gr. de fer sont combinés à 48 ou 80 gr. d'oxygène ⁽²⁾.

Les oxydes de fer qu'on rencontre le plus souvent sont le protoxyde (56 gr. fer, 16 gr. oxygène), l'oxyde magnétique (168 gr. fer, 64 gr. oxygène), et le sesquioxyde de fer (112 gr. fer, 48 gr. oxygène). Si l'on admet qu'ils contiennent tous la même quantité de fer :

le protoxyde de fer contient pour 56 gr. de fer, 16 gr. d'oxygène ;

l'oxyde magnétique contient pour 56 gr. de fer, $64 : 3 = 21$ gr. 33 d'oxygène ;

le sesquioxyde de fer contient pour 56 gr. de fer, $48 : 2$ ou 24 gr. d'oxygène.

On en conclut que le sesquioxyde de fer est celui de ces trois oxydes qui contient le plus d'oxygène. C'est celui-ci qui porte vulgairement le nom de *rouille*.

Nous disions plus haut que la rouille est l'élément important d'un minerai de fer.

En réalité, les minerais de fer sont constitués par des mélanges ou des combinaisons des trois derniers oxydes (protoxyde de fer, oxyde magnétique, sesquioxyde de fer), tantôt absolument purs, tantôt combinés avec de l'eau, plus souvent encore mélangés de matières terreuses : sable, argile, craie, etc., dont la masse forme ce qu'on appelle la *gangue*.

Ce sont les multiples composés résultant de la réunion de ces oxydes et de gangues différentes qui ont contribué à la formation d'un

(1) Suivant l'indication de la note 1, page 2, l'oxyde ferreux contient moins d'oxygène que l'oxyde ferrique.

(2) Si on suppose que le signe ou symbole *Fe* signifie le fer en abrégé et que ce signe représente en même temps 56 gr. de fer, 112 gr. de Fer s'écriront *Fe₂*, 168 gr. s'écriront *Fe₃*, etc... Comme nous avons vu précédemment que l'oxygène peut se représenter par le symbole *O*, qui signifie en même temps 16 grammes d'oxygène, on voit que les divers oxydes de fer et les quantités de fer et d'oxygène qui doivent se combiner pour les produire, s'énoncent comme suit : sous-oxyde de fer *Fe₄O* ou *Fe₂O* ; protoxyde de fer *FeO* ; oxyde magnétique *Fe₃O₄* ; sesquioxyde de fer *Fe₂O₃* ; peroxyde de fer *FeO₃* ou *FeO₅*.

si grand nombre de minerais de fer de richesse et d'aspect très variés et parmi lesquels nous pouvons citer : le fer magnétique ⁽¹⁾, le fer oligiste, l'hématite de fer, la limonite.

Les figures 5, 6 et 7 nous montrent des coupes de terrain, des gisements de minerais de fer sous leurs différentes formes : couches, filons, amas et rognons.

Nous reprendrons plus loin la question de la composition des



FIG. 5.
GISEMENT DE MINERAI DE FER EN COUCHES



FIG. 6.
GISEMENT DE FER (FILONS)
Remarquer que les filons ne sont pas parallèles aux couches de terrains

minerais. Sans vouloir énumérer tous les phénomènes chimiques courants qui se passent autour de nous, il paraît indispensable cependant

(1) Le fer magnétique ou magnétite est de l'oxyde magnétique Fe_3O_4 , tantôt complètement pur, tantôt mélangé d'une gangue. Son nom lui vient de ce qu'il a une action sur l'aiguille aimantée, et cette action est d'autant plus sensible que le minéral contient moins de gangue ou matière terreuse. Le fer oligiste est en fines aiguilles friables qui s'écrasent en donnant du sesquioxyde de fer, le fer oligiste est en fines aiguilles friables qui s'écrasent en donnant une tache rouge. Le nom hématite (dont la racine est le mot grec haimatos, sang) est donné à un minéral lorsqu'il a une couleur généralement rouge qui rappelle celle du sang. La limonite est aussi du peroxyde de fer, mais mélangé d'argile et dont la couleur jaune sale rappelle celle du limon ou dépôt boueux des rivières. C'est un minéral qui contient en général beaucoup d'eau.

d'en citer quelques-uns plus particulièrement fréquents dont nous aurons à parler dans la suite.

Nul n'ignore que le zinc des toitures et des gouttières, brillant à l'état de neuf, se ternit peu à peu et se couvre d'une légère couche blanche. Au point de vue chimique, c'est l'oxygène de l'air qui se combine au zinc pour former un *oxyde de zinc* blanc. Cet oxyde de zinc avec le gaz carbonique en petite quantité dans l'air produit du *carbonate de zinc* ⁽¹⁾ ; au contact de l'eau ce carbonate de zinc donne un *hydrocarbonate de zinc*.

Ce qui intéresse dans ce phénomène, c'est que cet hydrocarbonate de zinc une fois formé, empêche l'action de l'oxygène de l'air sur le métal sous-jacent et le préserve d'une destruction rapide.

Il n'en est pas de même pour le fer que l'oxygène peut consumer en entier, de telle sorte qu'une pièce de métal devient avec le temps

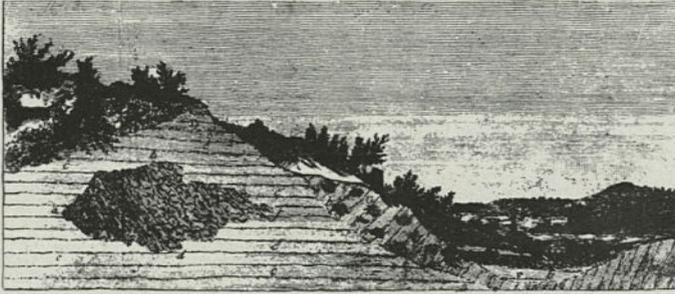


FIG. 7.
GISEMENT DE MINÉRAI DE FER EN AMAS

un amas de poussière rouge de sesquioxyde de fer qui, s'il est entraîné par les eaux, peut ne laisser nulle trace. Au point de vue archéologique la disparition du fer, après sa transformation en rouille, sert d'argument en faveur de ceux qui prétendent que l'âge de fer aurait précédé l'âge plus heureux de bronze.

Est-il inutile de rappeler le procédé de « galvanisation » qui consiste à recouvrir d'une couche de zinc le fer qu'on veut protéger contre la rouille ; de citer l'oxydation superficielle du cuivre et du bronze, qui donne une couche verdâtre d'*hydrocarbonate de cuivre* et qui constitue souvent une patine très recherchée pour les objets d'art.

Le soufre qui se trouve sur les allumettes dégage en brûlant une odeur suffocante qui est due à un gaz, l'*anhydride sulfureux*, formé

(1) L'acide carbonique peut aussi se combiner aux oxydes de fer pour donner un carbonate de fer. Le minéral ainsi formé se rencontre dans la nature, on l'appelle sidérose.

d'oxygène et de soufre. On obtient évidemment la même odeur en brûlant le soufre en morceaux, pour purifier un appartement ⁽¹⁾.

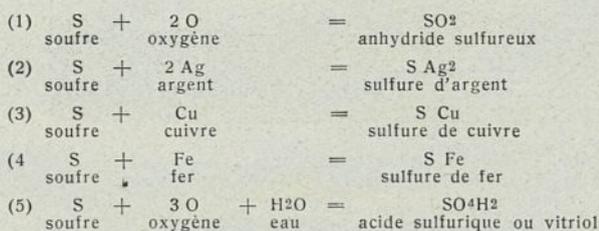
On sait aussi, par expérience, que l'argent *noircit* à l'air. Or, si on laisse du soufre et de l'argent en contact, l'argent noircit également ⁽²⁾. Cela tient à ce que la matière qui se forme sur l'argent est un corps résultant de la combinaison du soufre et de l'argent. On l'appelle le *sulfure d'argent*.

Le soufre peut aussi se combiner avec le cuivre pour donner un *sulfure de cuivre* ⁽³⁾; avec le fer pour donner un *sulfure de fer* et ainsi avec un grand nombre de métaux ⁽⁴⁾.

Ces corps se rencontrent dans la nature comme constituants de minerais sulfurés qu'on nomme pyrites (pyrite de cuivre, de fer, etc...). Le soufre est un grand minéralisateur.

Nous pourrions dire encore que le soufre combiné à l'oxygène et à l'eau donne l'*acide sulfurique* ou *vitriol*, ce liquide corrosif trop connu ⁽⁵⁾.

Et voici terminée notre timide incursion dans le domaine de la chimie. Nous en savons assez pour comprendre la théorie de la fabrication du fer et de la fonte, dans l'exposé qui fera l'objet du chapitre suivant.



L'eau est en effet un corps composé de deux éléments, l'hydrogène (H = 1 gr.) et l'oxygène (O = 16 gr., que nous connaissons déjà) dans la proportion de 2 grammes d'hydrogène pour 16 gr. d'oxygène.

RESUME DU CHAPITRE PREMIER.

Définition de la Sidérurgie : c'est l'art de fabriquer et de travailler le fer.

La combustion du charbon ou carbone par l'oxygène de l'air, dégage de la chaleur et donne un mélange de deux gaz : l'oxyde de carbone et le gaz carbonique.

Le gaz carbonique résulte de la combustion complète ou combustion vive du carbone en présence d'un excès d'oxygène ou d'air; il n'est plus combustible.

L'oxyde de carbone résulte de la combustion incomplète ou combustion lente du carbone en présence d'une quantité insuffisante d'oxygène ou d'air. Ce gaz est combustible. Il brûle avec une flamme bleue en présence d'oxygène ou d'air et donne du gaz carbonique.

En présence du charbon incandescent, le gaz carbonique non combustible, se transforme en gaz oxyde de carbone combustible.

Le fer s'altère à l'air en donnant de la rouille qui est un oxyde de fer.

Il existe différentes combinaisons de l'oxygène et du fer ou oxydes de fer, et parmi eux le protoxyde de fer, l'oxyde magnétique et le sesquioxyde de fer ou rouille.

Les différents minerais de fer sont des oxydes de fer contenant plus ou moins d'oxygène et mélangés à des matières terreuses : sable, craie, argile, etc., qui forment ce qu'on appelle la gangue. (Parmi ceux-là on peut citer la magnétite, le fer oligiste, l'hématite, la limonite.)

Certains minerais de fer sont sous forme de carbonates, c'est-à-dire qu'ils renferment en plus des oxydes et des gangues cités plus haut, du gaz carbonique combiné avec eux. (Par exemple la sidérose.)

D'autres encore sont sous forme de sulfure (combinaison de soufre avec un métal). (Par exemple la pyrite de fer.)

Au point de vue sidérurgique on peut considérer tous les minerais de fer comme formés d'oxydes de fer mélangés à une gangue contenant : sable ou silice, craie ou pierre à chaux, argile ou alumine.



FIG. 8.

EXTRACTION DU MINÉRAI DE FER PAR PUIITS ET EN SURFACE (GISEMENT DE PROFONDEUR)

La figure montre l'intérieur de la mine et les travaux souterrains : galeries K, h, g, avec leurs étais, puits e, f. A gauche, on voit l'exploitation en surface, en i on creuse un trou de mine qui, bourré de poudre ou de dynamite, permettra de détacher de gros blocs qu'on débitera ensuite comme en a.

CHAPITRE II

Comment on débarrasse le minerai de fer de ses oxydes : libérer le fer de son oxygène est, à proprement parler, le principe de la sidérurgie.

Nous avons dénombré dans le premier chapitre les principales combinaisons de l'oxygène avec le carbone et le fer, et démontré que le charbon ou carbone peut se transformer en gaz carbonique ou en oxyde de carbone en présence d'oxygène pur ou d'air.

Supposons maintenant que nous ayons un minerai absolument pur, sans gangue, c'est-à-dire un composé de fer et d'oxygène.

Si nous voulons séparer l'un de ces deux corps de l'autre, à quel agent chimique devons-nous recourir? Simplement au carbone qui enlèvera l'oxygène du fer pour former un gaz. Si nous disposons dans un petit tableau schématique d'un côté les corps que nous mettons en présence, et de l'autre les corps obtenus, nous aurons la figure et les résultats suivants :

MINÉRAI de FER

c'est-à-dire
fer et oxygène
et

CARBONE

se transforment en

FER séparé

et
OXYGÈNE et CARBONE

c'est-à-dire
gaz carbonique et oxyde de carbone

C'est là un des principes essentiels de la métallurgie du fer.

Procédé primitif de fabrication du Fer.

En faisant des recherches historiques, on a constaté que les premiers producteurs de fer s'étaient établis en des points situés à la lisière des forêts et à proximité de gisements de minerais de fer faciles à exploiter ⁽¹⁾.

Le procédé consistait à faire un trou dans le sol, à y mettre une certaine quantité de bois ou de charbon de bois, à disposer au-dessus une couche de minerai, 50 kg. environ, puis de nouveau du combustible et enfin, à couvrir le tout de terre après avoir allumé le charbon (fig. 9).

Il est facile de comprendre pourquoi on couvrait de terre. Le but était d'isoler le charbon de l'air extérieur, car à son contact, le charbon

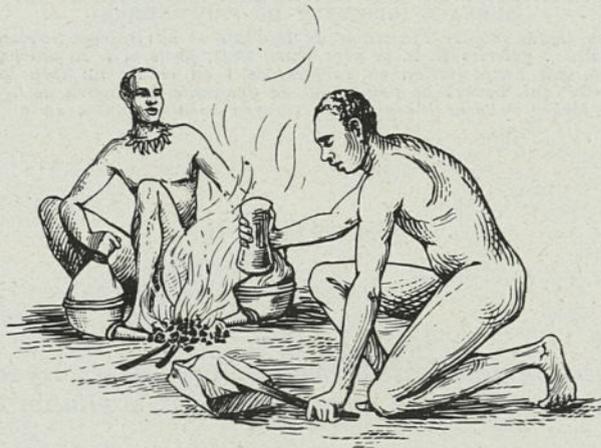


FIG. 9.

TRAVAIL DU FER CHEZ LES PEUPLADES SAUVAGES

Le métal est mis au milieu d'un tas de charbon placé sur le sol, le feu est activé au moyen de deux soufflets mus à la main, le forgeage se fait au moyen de pierres ou de morceaux de minerais.

pour se transformer en gaz carbonique ou oxyde de carbone, eût pris à l'air son oxygène, de préférence à celui du minerai, plus difficile à enlever.

Le fer tient à conserver l'oxygène auquel il est uni.

(Disons, en passant, que cette tendance qu'ont certains corps simples ou éléments à s'unir entre eux s'appelle l'*affinité*.)

En somme, ce phénomène est assez complexe. D'une part, le

(1) Les figures 5, 6, 7, 8, 40, 41, reproductions de gravures anciennes, donnent une idée de ce que sont les différents gisements de minerais de fer et leur exploitation. Elles montrent que cette exploitation qui permettait d'obtenir du fer pour les forges s'effectuait, soit en surface, soit en profondeur et qu'elle atteignait même des gisements situés sous l'eau, au fond de lacs.

charbon a de l'affinité pour l'oxygène, il tend à s'unir avec celui de l'air et, d'autre part, le fer a aussi de l'affinité pour l'oxygène et tend à rester sous forme de minerai. Il se passe donc quelque chose qui résulte de ces deux tendances contraires, à savoir qu'une partie du charbon est brûlée par l'oxygène de l'air et donne des gaz (oxyde de carbone et gaz carbonique) qui s'en vont en produisant de la chaleur. Cette chaleur porte à haute température le minerai de fer et le charbon restant qui est en excès. Comme on empêche l'arrivée de l'air, la partie du charbon en excès se combine avec l'oxygène du minerai, le lui enlève, et une partie du minerai est transformée en fer.

Ces réactions chimiques sont facilitées par le fait que plus la température s'élève, plus l'oxygène tend à se séparer du Fer du minerai pour s'unir au carbone. Le carbone est en effet le corps dont l'affinité pour l'oxygène croît le plus vite avec la température.

Jusqu'ici, nous avons admis dans cette petite démonstration, que le minerai de fer était composé de fer et d'oxygène seulement. En fait, il est composé d'oxydes de fer et de gangues. Ces gangues protègent, si on peut ainsi s'exprimer, l'oxygène du minerai contre les tentatives d'enlèvement par le carbone.

Aussi pour faciliter l'opération fait-on entrer en jeu, un nouveau facteur, le *fondant*, qui a la propriété de fondre en s'unissant à la gangue et de laisser le fer non fondu.

De sorte que voici ce qui se passe.

Théorie élémentaire de la fabrication du Fer.

On met en présence du minerai de fer, du charbon en grand excès, et un fondant.

Une partie de charbon brûle d'abord au contact de l'oxygène de l'air et donne une grande quantité de chaleur et des gaz qui s'échappent.

La chaleur produite porte à haute température (jusqu'au rouge ou plus) le charbon restant, le minerai et le fondant.

A ce moment, une partie du charbon s'attaque à l'oxygène du minerai pour l'enlever, pendant que le fondant s'unit à la gangue, et forme un corps nouveau, la *scorie*, fluide à haute température, qui s'écoule en emportant des parcelles de charbon non brûlé, de minerai non réduit ⁽¹⁾ et de fondant qui n'a pas agi.

Le fer obtenu au rouge blanc est alors sous forme d'une éponge qu'on appelle une *loupe* et qui contient encore entre ses interstices des

(1) Ce procédé a certainement été appliqué pendant des années, car on a retrouvé et on retrouve encore, en France (Normandie et Anjou) et dans d'autres contrées, des masses de scories de forges de plusieurs centaines de milliers de tonnes. Ces scories sont actuellement recherchées, car elles contiennent parfois plus de 50% de fer. Or, à l'heure actuelle, on traite même des minerais à 30 % de fer.

parcelles de scorie fluide. Cette loupe est purifiée par le martelage et transformée ensuite en produits divers.

Supposons que par suite de circonstances spéciales, la température s'élève beaucoup dans l'appareil producteur et que le carbone soit en grand excès, alors, au lieu d'obtenir une loupe de fer, on obtient un produit ferreux liquide qui est la *fonte de fer* ou simplement la *fonte* contenant principalement du fer et du carbone.

Toute l'histoire du fer, depuis les temps les plus reculés jusqu'au XII^e siècle, tient dans ces quelques lignes.

Ce que nous verrons, sur les différents appareils employés, n'est que le perfectionnement de cette méthode primitive et tend uniquement à produire plus rapidement ou plus économiquement, mais le principe est le même, ce qui est essentiel à retenir.

Nous n'en voulons pour preuve que l'étude des anciens appareils sidérurgiques ⁽¹⁾ que nous allons passer rapidement en revue et où nous verrons d'une part, l'application immédiate des principes précédents, et d'autre part, la raison de certaines pratiques empiriques alors inexplicables et qu'on se passait de père en fils avec grand mystère.

Les perfectionnements apportés aux divers procédés nous apparaîtront non seulement comme évidents, mais indispensables, et nous pourrons alors entreprendre avec fruit l'étude des méthodes modernes.

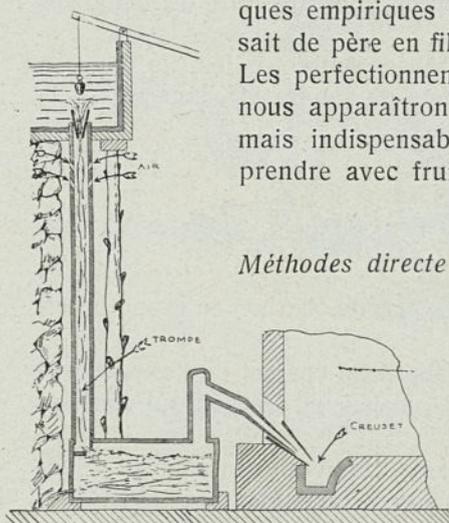


FIG. 10.
FOYER CATALAN.

Méthodes directe et indirecte de production du Fer.

Tous les anciens appareils se rapportent à deux types, qui procèdent eux-mêmes de deux principes théoriques complètement différents.

Le premier de ces principes consiste à partir du minerai pour en extraire le fer sous forme de loupe qu'on purifie par la *méthode directe*. Cette méthode est appli-

quée en particulier dans les foyers ou fours catalans.

L'autre principe consiste à produire d'abord de la *fonte de fer* en partant du minerai, puis à passer de cette fonte de fer au *fer* en lui enlevant du carbone par une opération qu'on appelle l'*affinage* de la fonte de fer.

(1) Nous n'avons pas cherché dans ce chapitre à faire un historique complet de la fabrication du fer, qui sortirait tout à fait du cadre de cet ouvrage — nous avons eu en vue de suivre l'application des diverses méthodes au seul point de vue technique, même au risque de faire quelques anachronismes.

Ce deuxième mode opératoire s'appelle le *procédé indirect*. Il nécessite deux opérations successives, et, par suite, deux sortes d'appareils dont le premier — un fourneau — produit la fonte de fer, et le second, dit feu de finerie, ou feu comtois, *affine* la fonte et la transforme en fer.

Foyer catalan.

La fig. 10 représente une forge catalane au XVII^e siècle. On y voit d'abord le feu catalan proprement dit, qui est le point où l'on dispose le minerai et le charbon; un détail du dessin nécessite quelques éclaircissements.

On y remarque la trompe ou soufflerie. De toute évidence, la raison même de cet appareil est d'amener du vent, c'est-à-dire de l'air, donc, chimiquement, de l'oxygène, qui entre en contact avec le charbon. Mais alors, semble-t-il, le charbon n'aura aucune tendance à s'emparer de l'oxygène du minerai! Et de fait ce serait vrai : il n'y aurait pas réduction du minerai si la quantité d'air soufflée par la trompe était en grande abondance, mais elle est loin de suffire pour

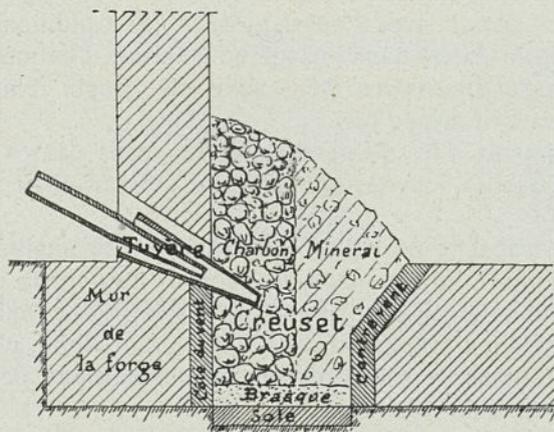


FIG. 11.
DETAIL DU CREUSET DU FOYER CATALAN

tout le carbone chargé. En fait, voici ce qui se passe : la partie du charbon soumise à l'action de l'air, en brûlant complètement, dégage de la chaleur qui chauffe l'ensemble des matières déposées dans le fourneau, de sorte que au fur et à mesure que le minerai placé du côté opposé au vent s'échauffe, il est *désoxydé* ou *réduit* par le charbon. Le fer prend alors naissance, tandis que la gangue du minerai se sépare partiellement du métal par fusion en formant la scorie.

On obtient ainsi, au fond du creuset, au bout d'un certain temps de marche, une masse pâteuse contenant du *fer réduit*, du *minerai* et de la *scorie*, le tout englobé dans la brasque ou poussière de charbon du fond (*fig. 11*).

La tuyère n'agit que sur les matières placées à son contact immédiat : elle brûle du charbon, forme des gaz qui s'échappent, et retransforme en oxyde de fer une partie du fer qui vient d'être obtenu par réduction du minerai.

Par contre, dans la matière pâteuse à haute température, qui est à l'abri de l'air, les réactions chimiques continuent, et la quantité de fer augmente jusqu'à former une loupe spongieuse.

Il est bien évident que cette méthode était coûteuse : le fer obtenu par réduction du minerai, réoxydé, s'en allait avec la scorie et constituait une perte de métal; d'autre part, une trop grosse quantité de charbon était brûlée sans agir sur le minerai.

Ainsi, pour obtenir 100 kg. de fer en 6 heures, on employait environ 330 kg. de minerai riche et 330 kg. de charbon de bois. La pression du vent atteignait environ 100 à 150 gr. par centimètre carré ⁽¹⁾.

Enfin, la forge catalane avait les très graves inconvénients inhérents à sa simplicité. Le métal produit était variable, non seulement avec les matières premières : minerai et charbon, ce qui est logique, mais variable encore avec l'ouvrier, dans les conditions identiques d'opération et de durée, dans l'usage qu'il faisait d'un même appareil, qu'il s'agisse de dimensions d'ensemble, de l'angle d'inclinaison de la tuyère ou de tout autre objet.

Ces variations dans l'obtention du fer, sans causes apparentes, faisaient attribuer à l'ouvrier une sorte de puissance, bonne ou mauvaise.

Selon sa capacité de régler l'abondance et la qualité de sa production, l'ignorance lui supposait des moyens mystérieux et magiques. Au fond, cet ouvrier ne gardait par devers lui que ce que l'habitude lui avait donné d'indications précises, afin de reproduire, plus ou moins heureusement, dans le secret des mêmes conditions de travail, un résultat plus ou moins identique.

Par ailleurs, il convient de constater qu'à ce moment de son histoire obscure, la métallurgie du fer évolue en plein moyen âge ; les

(1) Rappelons que c'est à Torricelli, savant italien, que l'on doit la découverte de la pression atmosphérique, c'est-à-dire de la pression exercée par le poids de l'air sur tous les corps. Elle est identique à celle du poids d'une colonne d'eau de 10^m33 de hauteur, c'est-à-dire à 1 kg. 033 par centimètre carré. A la suite de cette découverte, on a comparé toutes les pressions (de la vapeur, des gaz, etc.) à la pression atmosphérique qu'on a appelée pression de 1 atmosphère. Plus tard, on a trouvé plus commode de revenir au système métrique, car la pression atmosphérique varie suivant le niveau auquel on se trouve (plus faible en haut des montagnes, plus élevée au fond des mines). On évalua donc la pression en kilogrammes par centimètre carré. Ainsi, quand on dit que la pression dans une chaudière est de 10 kg., cela veut dire que la pression est de 10 kg. par cmq. Parfois, on évalue encore la pression en hauteur d'eau ou en hauteur de mercure. Pour passer de l'une à l'autre, il suffit de déterminer le poids de la colonne d'eau ou de mercure considérée, en supposant toujours 1 centimètre carré de section.

corporations industrielles ne datent que d'un siècle à peine; elles ne disposent guère dans le fer forgé, l'armure et l'équipement, que d'ouvriers d'arts à l'abri de la concurrence. L'ouvrier du fourneau de production, humble et rude ne s'est pas encore désigné à l'attention des « Maîtres des œuvres », et son industrie demeurera empirique et farouche, même après le début de la Renaissance.

Un fait, cependant, allait affranchir ce serf sans « franchises », et attirer l'attention sur son labeur : la découverte fortuite de la fonte, due à un ouvrier du pays de Siegen.

Ce métal nouveau devait, en effet, rénover les procédés de l'industrie, s'employer à la fabrication de notre première artillerie, et marquer le point d'origine du haut fourneau moderne.

Origine du Haut Fourneau.

Dire l'origine du haut fourneau, c'est décrire l'origine de la fonte. L'une est la conséquence de l'autre. A la vérité, les maîtres de forges, en augmentant les dimensions de leurs appareils, n'eurent tout d'abord

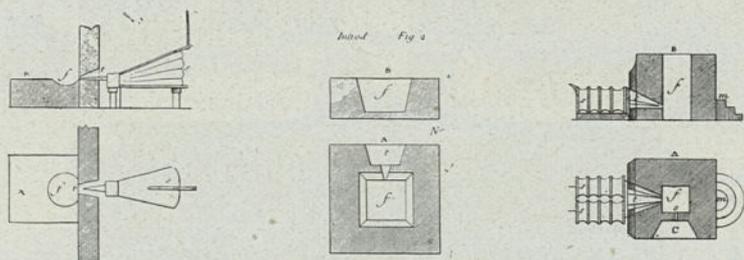


FIG. 12.

TRANSFORMATIONS SUCCESSIVES DU FOYER CATALAN
ET ÉVOLUTION VERS LE HAUT FOURNEAU

(s, soufflerie; f, foyer ou cuve; t, tuyère; c, coulée.)

Sur la figure de droite des marches facilitent le chargement

que le souci de la concurrence et la pensée de réduire la consommation de combustible et les frais de fabrication. Certains leur donnèrent une forme analogue à celle de la fig. 12, entièrement en maçonnerie.

A leur apparition, ces fourneaux, entièrement en maçonnerie, ne mesuraient pas plus de 1 m. 50 de diamètre dans leur partie la plus large, et 4 m. 50 de hauteur totale.

La poitrine du four était une murette de faible épaisseur qu'on enlevait à la fin de l'opération pour permettre de retirer la loupe de fer obtenue (voir fig. 12).

Mais dans la suite, en les perfectionnant, les maîtres de forges

augmentèrent les dimensions des fourneaux, et il arriva que cet agrandissement entraîna une élévation de la température, et que le fer, plus longtemps en contact avec le charbon en excès, se combina avec lui pour fondre et s'écouler *liquide*. Ce métal fondu était la *fonte*. Et le nom de *haut fourneau* désigna dans la suite tout appareil producteur de fonte.

A cette date, la métallurgie du fer cherche son centre d'activité au bord des rivières, à proximité des forêts et des mines. Elle obtient sa force motrice au moyen de roues hydrauliques capables de déplacer 100 à 125 fois par minute un marteau dont la tête pèse près de 1.000 kg.

Son industrie est limitée aux produits finis par martelage.

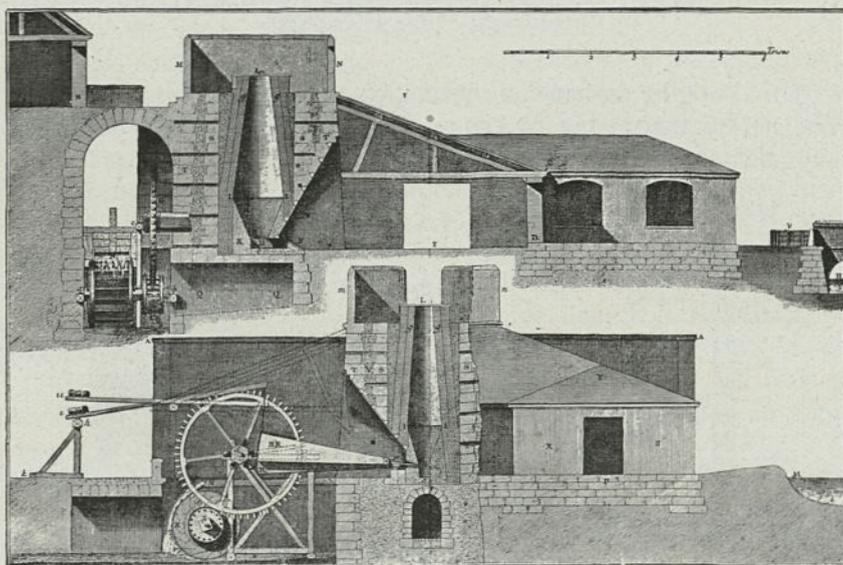


FIG. 13.

HAUT FOURNEAU ANCIEN DE 7^m50 DE HAUTEUR.

La partie supérieure correspond à la coupe longitudinale du fourneau, de la rustine à la tympie, et montre l'élévation extérieure du bâtiment du moulage en terre (A, halle à charbon; C, K, roue hydraulique actionnant les soufflets; Q, Q, voûte pour assécher le creuset, a, b, E; F, dame; R, rustine; I, I, ventre; L, gueulard). — La partie inférieure montre la coupe transversale du fourneau prise de la tuyère au contrevent. On y voit la roue à augets K, les soufflets R, R. — Ce haut fourneau est à section elliptique, les axes du ventre ayant 2 pieds 9 pouces et 2 pieds 6 pouces.

Le Haut Fourneau.

La fig. 13 se rapporte à la disposition d'ensemble d'un haut fourneau proprement dit. Sa construction nécessitait des conditions d'installation très particulières : conditions de différence de niveau

permettant un chargement facile, et une arrivée d'eau commode pour assurer le soufflage par trompe (comme pour les feux catalans) ou la commande des soufflets par roues hydrauliques.

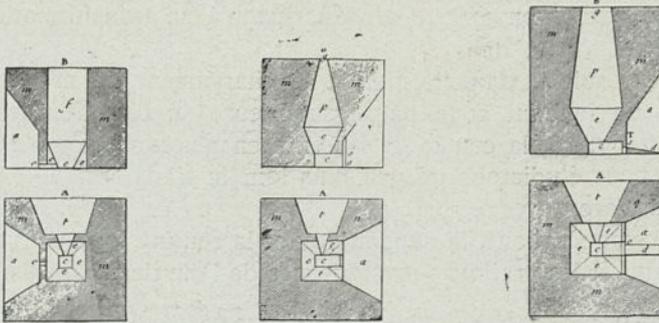


FIG. 14.

SCHEMA DES PREMIERS HAUTS FOURNEAUX

(c, creuset; e, étalages; p, cuve; g, gueulard; t, embrasure des tuyères; a, embrasure de la coulée; d, dame; T, tympe; o, coulée.)

La fig. 14 représente les différentes parties du haut fourneau. On y voit le creuset dont les éléments portent des noms variés : entre autres la coulée (ou trou de coulée). Elle est bouchée par un tampon d'argile et sert à recueillir la fonte produite. La dame sur laquelle

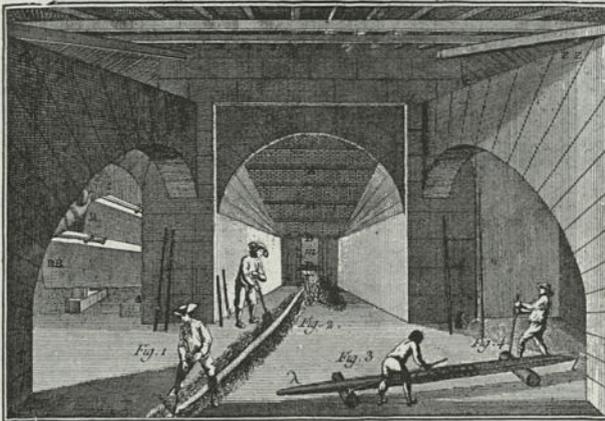
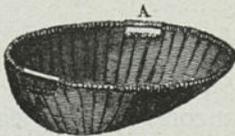


FIG. 15.

PARTIE INFÉRIEURE D'UN HAUT FOURNEAU

On distingue la dame D par dessus laquelle s'écoule le laitier. A gauche en R et RB la commande des soufflets par la roue hydraulique. Le panier A sert à faire le chargement du minéral, du charbon et du fondant au gueulard. Les ouvriers 1 et 2 préparent le moule de la gueuse dans le sable pour la prochaine coulée, qui se fera en débouchant le trou. Les ouvriers 3 et 4 transportent la gueuse λ. 1 au moyen de rouleaux vers l'affinerie.



s'écoule le *laitier*; puis la *tympe* et la *tuyère* servant à l'insufflation du vent.

Dans la série de gravures anciennes que nous donnons ici, on peut se représenter les diverses opérations de l'utilisation du minerai, depuis celle de son extraction (*fig. 8 et 39*), jusqu'à sa transformation en fonte de fer.

On peut suivre, dans la *fig. 1*, le chargement du minerai, du charbon et du fondant, à la partie supérieure du haut fourneau ou gueulard et, *fig. 16*, la coulée de la fonte en pièces dites *gueuses* de fonte dont nous étudierons un peu plus loin la transformation en fer par la renardière.

Dans ces opérations, la superstition et la routine jouèrent un rôle prépondérant, et les pratiques mystérieuses de l'ouvrier de ce temps-là

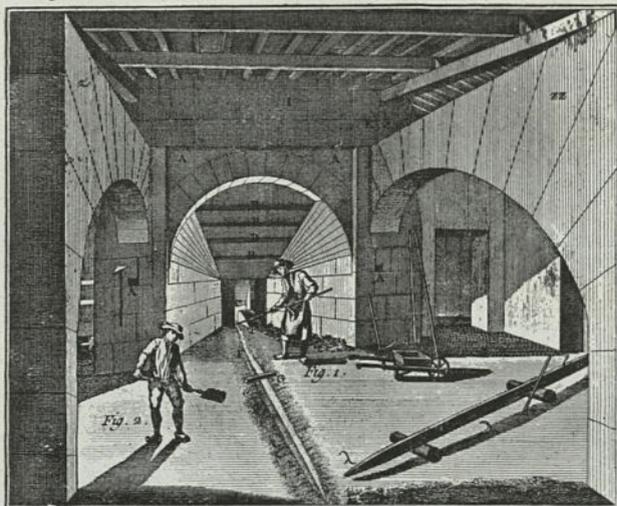


FIG. 16.

COULEE DE LA FONTE.

(1, fonte sortant du trou de coulée à la suite du piquage du trou par l'ouvrier 1; l'ouvrier 2 jette du sable sur la gueuse coulée. Derrière l'ouvrier 1 le laitier s'écoule par dessus la dame. La gueuse précédente λ 1 est en cours de transport.

s'exercèrent dans le choix des minerais, dans la manière de les préparer, de les laver, de les concasser, de les mélanger entre eux, avec les fondants et le charbon, en vue d'obtenir les diverses fontes.

Comparaison des procédés direct et indirect.

Nous avons dit, page 16, que le procédé direct consistait à obtenir le fer du minerai, sous forme de loupe, contrairement au procédé

indirect qui, partant du minerai pour obtenir la fonte, reprenait cette fonte par l'affinage pour en extraire le fer.

Expliquons la différence essentielle de ces deux procédés.

Dans le haut fourneau, le minerai, le charbon et le fondant sont portés à une très haute température, au point qu'à sa naissance, le fer se combine à un excès de charbon et s'écoule sous forme de fonte de fer. Le laitier, qui résulte de la combinaison du fondant avec les gangues, fond également, mais sa densité étant inférieure à celle de la fonte le fait surnager, comme l'huile sur l'eau, et s'écouler par la dame.

La séparation du métal est très nette.

Malheureusement, à cause de la très haute température, le fer, quoique séparé des gangues terreuses, se charge, en petites quantités

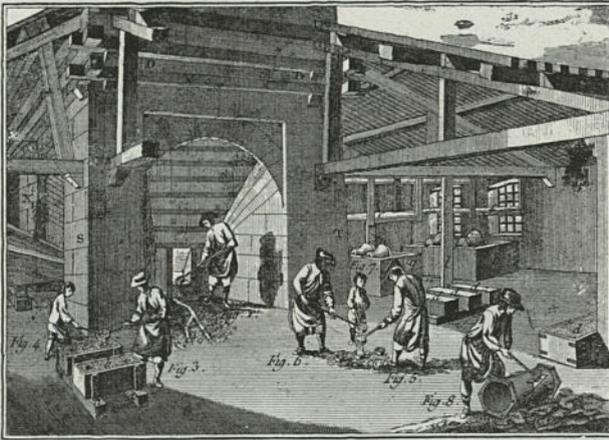


FIG. 17.

COULEE DE LA FONTE A LA POCHE

L'ouvrier 1 puise la fonte à la cuiller dans l'ouvrage tandis que l'ouvrier 3 et son aide 4 la versent dans les moules. D'autres ouvriers 5 et 6 versent leur cuiller dans celle du fondeur 3 placée sur le sol, l'apprenti 7 enlève le laitier, l'ouvrier 8 ébarbe une pièce fondue.

de matières nuisibles qu'ensuite il faudra enlever par l'affinage dans la renardière.

On a prétendu qu'avec le même minerai le feu catalan donnait un fer plus pur que le haut fourneau et la renardière. Cela a été vrai et cela s'explique puisque, à la température du foyer catalan, le fer ne fond pas, et que les matières impures, quelles qu'elles soient, ne se mélangent pas intimement au minerai, mais s'éliminent par fusion de la scorie.

Il n'en est pas ainsi à la température élevée du haut fourneau : la gueuse obtenue contient en petite quantité des éléments nuisibles *intimement combinés* au fer à cause de la fusion même. Nous verrons



FIG. 18.

AFFINERIE ANCIENNE — AFFINAGE DE LA GUEUSE.

Plusieurs ouvriers autour de la chaufferie dont le 1 fait avancer la gueuse par l'ouverture 7 vers le foyer; le 2, forgeron ou affineur, avec un ringard à piquer détache les parties ramollies par la chaleur, les expose au vent et forme ainsi le renard; l'ouvrier 3 refoule le renard sur la plaque p; à droite on voit le marteau mû hydrauliquement qui sert à refouler le renard.



FIG. 19.
RENARD A SA SORTIE
DE L'AFFINERIE



FIG. 21.
PIECE

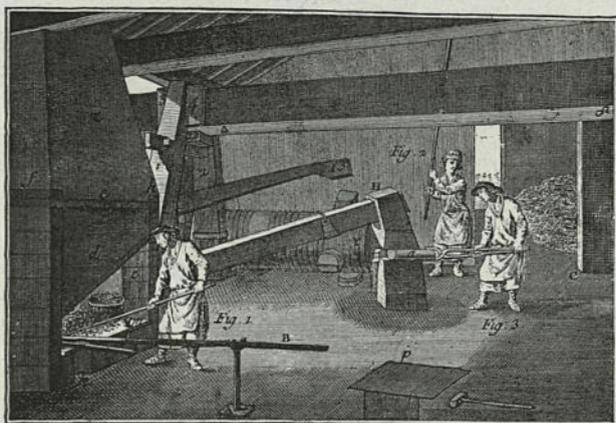


FIG. 20.

AFFINERIE ANCIENNE — CINGLAGE DU RENARD.

L'ouvrier chauffeur 1 pique la gueuse et expose le renard au feu, le marteleur 3 cingle le renard pour obtenir la pièce fig. 21.

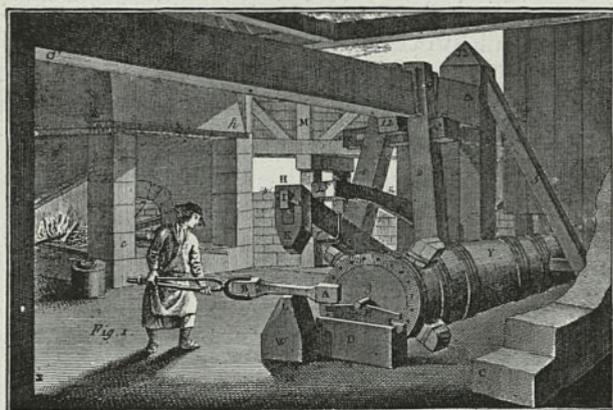


FIG. 22.
AFFINERIE ANCIENNE — FORGEAGE DE L'ENCRENEE



FIG. 23.
ENCRENEE



FIG. 24.
MAQUETTE

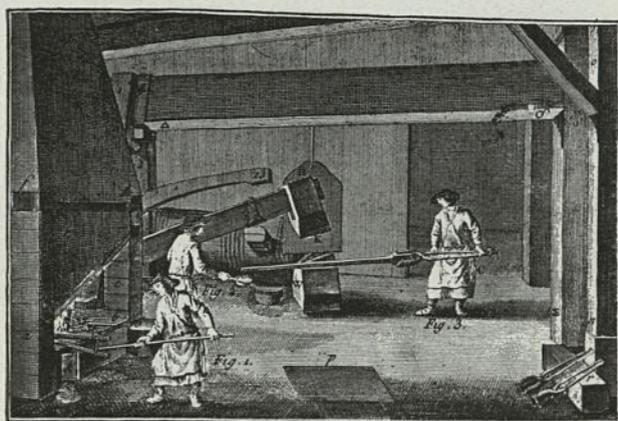


FIG. 25.
AFFINERIE ANCIENNE — OPERATION DE PARER LA MAQUETTE



FIG. 26
BANDE DE FER

qu'on sait aujourd'hui retirer du fer ces matières nuisibles, ce qu'on ignorait au début du procédé indirect où l'on opérait empiriquement.

Il nous faut ajouter qu'on ne traitait alors au feu catalan que des minerais riches et que la fabrication du fer eût été impossible au bas foyer avec des minerais pauvres en fer.

Fonderie de Fer.

Avant de passer à l'affinage de la fonte de fer, nous indiquons, ici, son utilisation directe au moulage des objets.

Les fig. 17 et 108 représentent une *fonderie* et l'atelier corres-

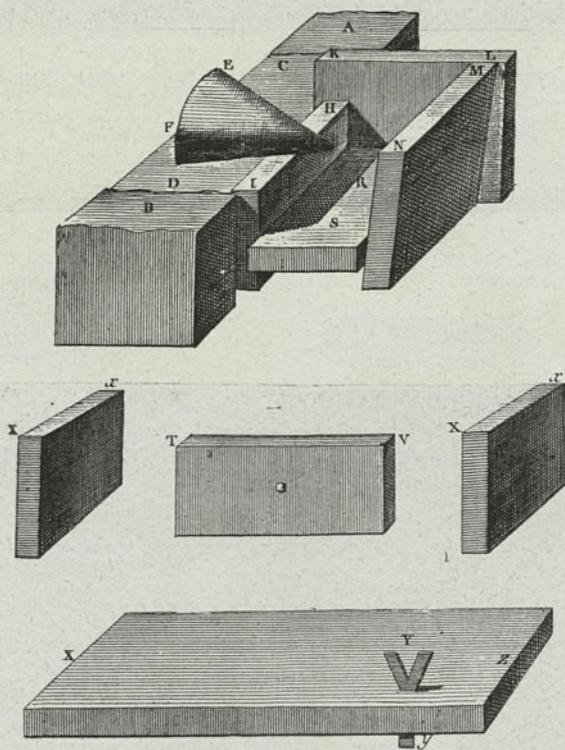


FIG. 27.

AFFINERIE OU RENARDIERE — DETAIL EN PERSPECTIVE.

Cette perspective suppose enlevés la plaque du devant, le contrevent du dessus et le chio. — On voit C, D, le mureau; E, F, G, la tuyère et son museau G; H, I, la varme; K, L, l'aire; M, N, le contrevent; R, S, le vent; X, Z, est la taque; Y, y, la fourche servant à décroasser les ringards; y, la queue de la fourchette.

pondant. On y peut suivre les divers opérations du moulage, de l'étuvage, de la coulée et de l'ébarbage des pièces en fonte. Nous y reviendrons.

Affinage de la Fonte de Fer.

Jadis, pour transformer en fer une gueuse de fonte, il existait autant de procédés et d'appareils que de maîtres de forges ; et toutes ces méthodes avaient pour cause unique l'ignorance absolue des maîtres de forges sur la composition chimique de leurs produits.

Parmi ces méthodes, nous relatons celle de l'affinage dans la renardière.

Elle consiste à porter la gueuse de fonte, obtenue au haut four-

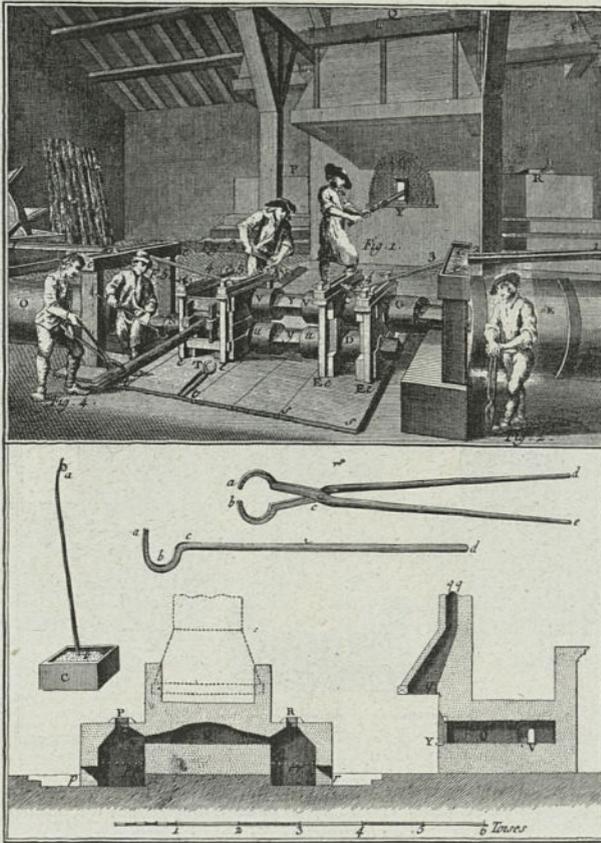


FIG. 28.

FENDERIE ET SON FOURNEAU

(Transformation des bandes de fer en verges).

Les bandes coupées de longueur sont placées dans le four. On allume le feu dans les toqueries P et R et lorsque les barres sont chauffées à blanc, l'ouvrier 1 les tire du four et les passe aux spatards C, D, qui allongent les barres. L'ouvrier 2 les passe par dessus les cylindres à l'ouvrier 3, lequel les présente aux taillants. On arrose les cylindres. La rotation se fait par roue hydraulique. Sur le bas de la planche, on voit les tenailles servant à porter les verges au sortir de la fenderie et aussi la boîte à suif servant à graisser les taillants de la fenderie. On y peut examiner le détail du four.

neau, dans une affinerie ou renardière, qui est une sorte de bas foyer soufflé où la gueuse est fondue progressivement et soumise à l'action du vent. Au fur et à mesure que la gueuse s'affine, elle prend le nom de renard. Ce renard est ainsi transformé en une éponge de fer qu'on martelle à la main, sur une plaque de fer.

La fig. 18 est la reproduction d'une affinerie ancienne. On y voit

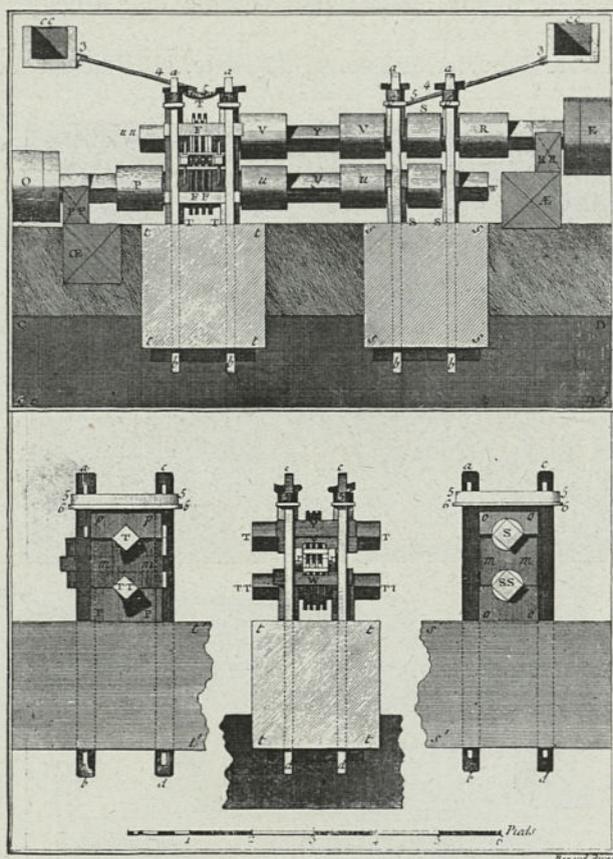


FIG. 29.

FENDERIE.

Equipage des taillants et spatards pour transformer les bandes en verges. S, S, spatards; F, F, F, taillants.

le travail d'une gueuse dans une renardière et le martelage à main de l'éponge de fer, ainsi que le marteau, mû hydrauliquement, qui servira à transformer l'éponge de fer (*fig. 19*) en une pièce (*fig. 21*) et celle-ci en une encrénée (*fig. 23*) après une deuxième chauffe, puis en une maquette (*fig. 24*) après une troisième chauffe et enfin en une bande de fer (*fig. 26*) après une quatrième chauffe. La *fig. 27* montre la disposition de la renardière en perspective.

Enfin, la fig. 28 montre la disposition de la fenderie qui n'est autre que le laminoir, c'est-à-dire un ensemble de cylindres servant à transformer les bandes en verges ou barres de fer rondes. Les fig. 29 et 30 montrent plus nettement la disposition des cylindres d'une fenderie, et leur accouplement.

Nous verrons, plus tard, la description détaillée des laminoirs.

Ce que nous avons voulu surtout montrer par les figures précédentes, c'est la succession des opérations conduisant du minerai à la loupe de fer en passant par le fourneau et l'affinerie, c'est-à-dire l'application du procédé indirect.

Il nous paraît presque superflu d'ajouter que les méthodes de travail étaient variées à l'infini, suivant la fonte à traiter, la puissance de la soufflerie, l'inclinaison de la tuyère, l'habileté de l'ouvrier, et que, par suite, le métal produit était également de qualité irrégulière.

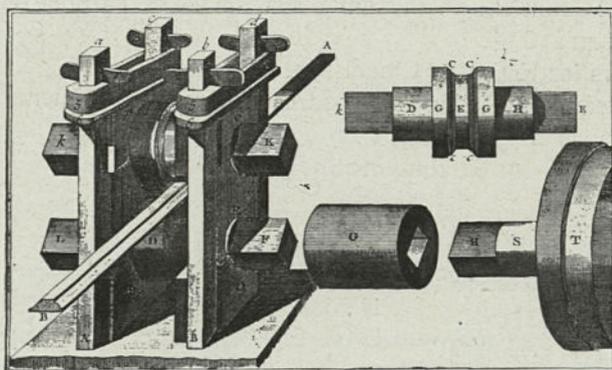


FIG. 30.

LAMINOIR ANCIEN A PROFILER.

Ces cylindres permettent de profiler les plates-bandes de balcon à deux doucines. La figure montre aussi la commande de ces cylindres. T, arbre de la roue à aube, son tourillon S et son carré H communiquant son mouvement au carré F du cylindre de la fenderie.

En fait, ces indécisions et ces méthodes complexes découlent toutes de ce que la composition chimique des produits était inconnue.

Vandermonde, Monge et Berthollet, dans un mémoire à l'Académie des Sciences publié en 1786, avaient conclu que la principale cause des différences existant entre les fers, provenait de la combinaison du carbone et de l'oxygène.

Mais à notre avis, c'est Clouet, autre savant de l'époque, qui s'est approché le plus de la vérité, en édictant les règles suivantes, à la suite d'une série d'expériences auxquelles il s'était livré :

On obtient de l'acier en fondant du fer avec 1/32^e de charbon.

On obtient de la fonte en fondant du fer avec une quantité plus grande de charbon.

En fondant de l'*acier* avec un peu d'*oxydule de fer* on peut obtenir du *fer*.

En fondant de la *fonte* avec du *fer* on obtient de l'*acier*.

En fondant de la *fonte* avec un peu d'*oxydule de fer* on obtient de l'*acier*.

En fondant de la *fonte* avec *beaucoup* d'*oxydule de fer* on obtient du *fer*.

Ces recherches, qui ont duré des années, et les discussions passionnées qui les accompagnèrent nous semblent enfantines à l'heure actuelle.

Nous savons, en effet, que la principale différence entre le *fer*, l'*acier* et la *fonte*, résulte de la teneur en carbone.

Le *fer* ne contient pas de carbone, pratiquement moins de 0,15 % (1).

L'*acier* contient de 0,05 à 1,5 % de carbone (2).

La *fonte* contient en moyenne 3 à 3,5 % de carbone et peut en contenir jusqu'à 6 %.

Dès lors les règles de Clouet sont évidentes.

Par exemple : Si l'on fait fondre du *fer*, corps contenant peu ou pas de carbone avec un corps en contenant beaucoup : la *fonte*, on obtient un corps qui en contient une quantité moyenne : l'*acier*.

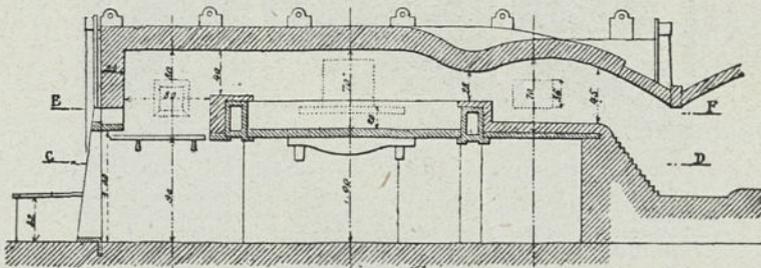


FIG. 31.

SCHEMA D'UN FOUR A PUDDLIER.

De même : Si l'on fait fondre de la *fonte*, corps contenant beaucoup de carbone avec un corps contenant de l'oxygène et du *fer* : minerai de *fer* ou *oxydule de fer*, le carbone de la *fonte* sera brûlé par l'oxygène du minerai de *fer* ou de l'*oxydule de fer*, et, suivant la quantité d'oxygène disponible, c'est-à-dire du minerai de *fer* ou d'*oxydule*

(1) Le *fer* contient de la scorie car on l'obtient à l'état pâteux à une température inférieure à celle de fusion du *fer* pur, température insuffisante pour permettre la séparation du métal et de la scorie.

(2) L'*acier* étant obtenu à haute température, à l'état liquide ne contient pas de scorie interposée — c'est un métal plus homogène que le *fer*.

de fer, on pourra obtenir soit de l'acier s'il reste encore du carbone, soit du fer oxydé s'il y a un grand excès d'oxygène.

C'est au moment où ces discussions et ces recherches étaient en cours, en 1784, que le puddlage, inventé par Henry Cort en Angleterre, en même temps que les laminoirs cannelés, a permis à l'industrie du fer de prendre un essor considérable.

Il nous paraît absolument nécessaire de détailler un peu la fabrication du fer puddlé qui a été presque sans concurrence pendant près d'un siècle ⁽¹⁾. C'est d'ailleurs la première application très rationnelle du procédé indirect.

Le puddlage consiste à décarburer la fonte, c'est-à-dire à lui enlever son excédent de carbone au moyen d'un corps contenant de l'oxygène (minerai de fer ou oxyde de fer quelconque). Ce procédé se pratique dans un four appelé four à puddler et dont la fig. 31 montre la forme. On charge d'abord la fonte dans le cassin, sole un peu plus éloignée du foyer et qui permet de récupérer une partie de la chaleur partant avec les gaz et la fumée, après avoir chauffé la première sole ou laboratoire.

Cette fonte, réchauffée au rouge, est poussée sur la première sole ou laboratoire, et mélangée avec du minerai de fer, des battitures ou des scories provenant d'une opération précédente et chargées en oxyde de fer.

On ajoute aussi des menues ferrailles. On chauffe très fortement jusqu'à la température du blanc soudant et l'ouvrier puddleur brasse la masse en fusion. L'affinage, c'est-à-dire la décarburation de la fonte ou oxydation du carbone, se produit et on voit des bulles de gaz se dégager (formation de gaz oxyde de carbone ou gaz carbonique).

Peu à peu, le fer prend nature en grumeaux, le bain s'épaissit et l'ouvrier puddleur opère ce qu'on nomme le « tour de fer », qui consiste à faire passer des masses de 15 à 20 kg. de métal, de l'avant à l'arrière du four, pour en opérer le soudage à la flamme du foyer. Puis les boules ou loupes de fer sont sorties du foyer sur un chariot. Ces loupes sont conduites très rapidement au pilon pour être transformées en massiaux qui, eux-mêmes, donneront au laminoir des barres longues et méplates dites ébauchés ⁽²⁾. (fig. 32 hors-texte en couleurs).

La nature même de cette fabrication par petites quantités explique son irrégularité. Nous en donnerons cependant plus tard des raisons plus précises. Retenons seulement que l'unité de fabrication était de 30 à 40 kg. en dépendance directe de la force musculaire de l'homme et notons aussi que le métal obtenu à l'état pâteux retient en son sein de

(1) Les derniers fours à puddler disparaissent en ce moment. Ainsi, le Creusot a éteint ses fours en 1912.

(2) Nous avons reporté dans le 2^e volume de cet ouvrage une description scientifique du procédé de puddlage qui eût été déplacée ici, car nos connaissances chimiques insuffisantes seront complétées dans les chapitres qui suivront.

la scorie qui s'élimine incomplètement au pilon et donne en définitive un métal hétérogène. C'était cependant un progrès notable sur le feu catalan et la renardière, car il permettait d'assurer une plus grande continuité et une plus grande rapidité aux opérations. On a même créé des fours à puddler mécaniques pour augmenter l'intensité de production sans dépasser la limite de résistance physique des puddleurs. Nous verrons par la suite les raisons de la disparition de ce procédé, éliminé par le progrès.

FOUR A PUDDLER



Le four à puddler impressionnait fortement ceux qui avaient l'occasion de le voir en fonctionnement. C'était autrefois l'appareil type de l'industrie du feu.

De plus, le travail du puddleur apparaissait comme particulièrement pénible, car ces fonctions exigeaient de l'ouvrier l'endurance à la chaleur, combinée à la force musculaire.

REVUE DE LA LITTÉRATURE



RESUME DU CHAPITRE II

PRINCIPE DE LA SIDERURGIE.

1^{er} Cas : MINERAI THÉORIQUE. — Oxyde de fer pur, *c'est-à-dire composé uniquement de fer et d'oxygène.*

On le met en présence du charbon en empêchant l'arrivée de l'oxygène ou de l'air jusqu'à lui (ce qui revient au même puisque l'air contient de l'oxygène).

Une partie du carbone enlève l'oxygène du minerai pour former des gaz et le fer est libéré.

2^e Cas : MINERAI RÉEL. — *Il est composé d'un oxyde de fer combiné avec des matières terreuses appelées : gangue.*

On le met en présence du charbon et parfois d'un fondant.

Le fondant a pour rôle de faciliter à la gangue la formation d'un corps appelé scorie ou laitier qui fond à température plus basse que le minerai et se sépare de l'oxyde de fer en s'écoulant.

L'oxyde de fer est en même temps réduit par le charbon qui donne des gaz et laisse une éponge ou loupe de fer réduit, emprisonnant une partie de la scorie qu'on expulse par martelage.

C'est le procédé direct de la fabrication du fer.

3^e Cas : MINERAI RÉEL AVEC FONDANT ET CARBONE EN EXCÈS. — *Si le four est plus grand, sous l'influence de la température plus élevée, le fer provenant de la réduction du minerai se combine à l'excès de charbon pour donner de la fonte de fer, produit liquide à haute température, contenant principalement du fer et du carbone. Ce corps fond et se sépare du laitier, qui résulte de la fusion de la gangue et du fondant, par différence de densité à l'état liquide.*

On peut, en enlevant du carbone à la fonte, revenir au fer, c'est le procédé indirect de fabrication du fer.

HISTORIQUE DES PROCÉDES SIDERURGIQUES

FEU CATALAN. — *Se compose d'un foyer soufflé avec l'air, dans lequel le minerai est mélangé au charbon et chauffé au rouge. On en retire une loupe de fer qu'on purifie par martelage et transforme en-*

.....

suite en barres. Le résidu est une scorie qui contient encore beaucoup de fer et qu'on rejette. On y traite des minerais très riches et purs, dont la ganque est facilement fusible, même sans adjonction de fondants.

HAUT FOURNEAU ET AFFINERIE OU RENARDIÈRE. — *Ces deux appareils sont inséparables.*

Dans le haut fourneau on charge à la partie supérieure le minerai, le fondant, et le charbon. On recueille la fonte sous forme de gueuses et le laitier ou scorie est rejeté. La gueuse est affinée dans une affinerie ou renardière au moyen de l'air et transformée en loupe de fer qui est martelée, forgée ensuite et donne des barres.

Au haut fourneau, on peut traiter des minerais moins riches et tenant plus de ganque, que ceux employés au procédé Catalan.

PUDDLAGE. — *Le four à puddler remplace l'affinerie ou renardière à partir de l'invention de Cort. Il consiste à décarburer la fonte par des oxydes de fer.*

THÉORIE. — *Le fer, l'acier et la fonte ne diffèrent chimiquement que par leur teneur en carbone.*

On peut passer du fer à l'acier en ajoutant du carbone au fer. Inversement, en éliminant le carbone de la fonte, on peut obtenir de l'acier ou du fer.

Tous les procédés de fabrication reposent sur ce principe élémentaire.

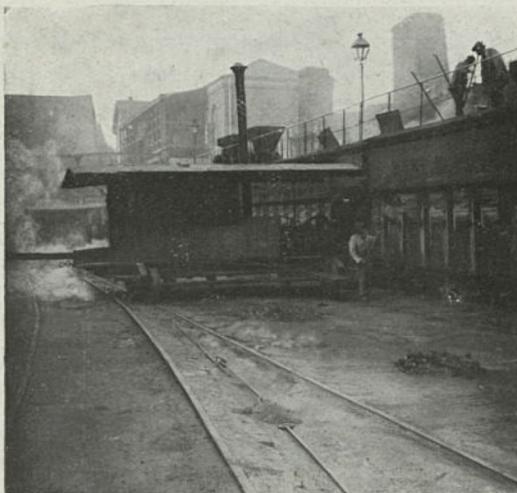


FIG. 33.
DEFOURNEUSE POUR FOURS A COKE

CHAPITRE III

De la nature des combustibles employés en Sidérurgie.

Nous avons donné, dans les précédents chapitres, un aperçu rapide de la Sidérurgie, et nous y avons vu que le charbon ⁽¹⁾ y jouait un rôle essentiel.

Préciser la nature du charbon eût compliqué la question et nous avons réservé à ce chapitre le développement relatif aux divers éléments de ce combustible.

Quelques mots tout d'abord sur l'évolution de son emploi,

Avant la houille, le bois et le charbon de bois ont été primitivement et longtemps employés à la fabrication du fer. Aussi, le cantonnement des forges à proximité d'une forêt s'explique-t-il pour les mêmes raisons qui fixaient celles-ci à proximité de la mine.

(1) Le charbon n'est pas le seul combustible utilisable en sidérurgie. La liste complète comprend le bois et le charbon, la tourbe, le lignite, le pétrole, etc.; leur étude sortirait par trop du cadre de cet ouvrage.

Le bois naturel fut promptement délaissé. Il a de multiples inconvénients, parmi lesquels nous devons citer sa faible puissance calorifique ⁽¹⁾ et la quantité d'eau qu'il contient.

Il fut remplacé par l'usage du *charbon de bois* qui s'obtient, comme on le sait, par une combustion incomplète du bois.

Pour mieux comprendre ce phénomène, nous élargirons nos connaissances chimiques par les quelques notions suivantes :

Certains corps sont *composés* de plusieurs autres; par exemple, le gaz carbonique et l'oxyde de carbone sont formés de carbone et d'oxygène.

On dit dans ce cas que le gaz carbonique et l'oxyde de carbone sont des *corps composés* et que les matières qui contribuent à leur constitution, tels que l'oxygène ou le carbone, sont des *corps simples*, car il est impossible d'en tirer autre chose qu'eux-mêmes.

L'analyse chimique permet de reconnaître les corps simples qui entrent dans la formation d'un corps quelconque et le résultat en chiffres de cette recherche s'appelle la *composition chimique* du corps considéré.

Connaissant la composition chimique d'un corps, on peut en déduire certains résultats pratiques qui, de prime abord, peuvent paraître surprenants.

Ainsi l'analyse chimique révèle que l'eau est formée de deux gaz, l'oxygène que nous connaissons et l'hydrogène (gaz combustible très léger qui sert à gonfler les ballons).

De même le *sucre*, ce corps parfaitement blanc, est constitué de *carbone*, d'*hydrogène* et d'*oxygène*. On sait même (et la vérification en est facile) qu'en chauffant fortement du sucre à l'abri de l'air, il fond d'abord, puis se décompose en laissant échapper de l'eau et en donnant un résidu noir brillant qui est du charbon presque parfaitement pur.

(1) Pour comparer deux combustibles et en déduire celui qui est le plus avantageux à employer, on a tout naturellement l'idée d'en faire brûler deux quantités égales (1 kilogramme par exemple) et de constater celui qui produit la plus grande quantité de chaleur, c'est-à-dire celui qui est capable de fournir le plus grand nombre de calories. Le nombre de *calories* que fournit en brûlant un *kilogramme du combustible* en question s'appelle sa *puissance calorifique*.

Pour donner une idée de ces chiffres, nous rapportons dans le tableau ci-dessous les puissances calorifiques approximatives des différents combustibles.

Bois ordinaire à 20% d'humidité	2.800	calories	environ
Bois sec	3.600	—	—
Bois desséché par chauffage	4.700	—	—
Charbon de bois	7.000	—	—
Tourbe de bonne qualité	4.000 à 6.000	—	—
Lignite de bonne qualité	6.000 à 7.000	—	—
Houille moyenne	7.000 à 8.000	—	—
Anthracite	8.000	—	—
Diamant	7.859	—	—
Graphite	7.900	—	—
Huile de colza	9.600	—	—
Gaz d'éclairage (par kilogramme)	11.000	—	—

Si on examine la composition ⁽¹⁾ du bois, on voit qu'il contient du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote, de l'eau et des cendres.

Il devient évident qu'en le décomposant en ses éléments il restera du charbon, à condition qu'on empêche l'accès de l'oxygène qui le transformerait en gaz carbonique et oxyde de carbone.

C'est ce que se passe lorsqu'on chauffe du bois dans un vase à l'abri de l'air (distillation ⁽²⁾ du bois en vase clos).

Mais si on opère même en plein air, en empêchant son action par un moyen quelconque, on obtient un résultat identique. Ce pro-

(1) Composition chimique ou analyse élémentaire de différents combustibles pris dans des mines françaises :

Combustibles	Carbone	Hydrogène	Oxygène et azote	Eau hygrosopique	Cendres	Matières volatiles	Puissance calorifique
Bois (chêne lorrain)	47,00	5,65	40,00	7,00	0,35	75 %	4.500
Tourbe	53,20	5,60	34,25	6,00	0,95	65 %	5.600
Lignite (Vaugirard)	59,80	4,50	25,80	3,15	6,75	50 %	6.200
Houille flambante ligniteuse (Decazeville)	75,25	5,25	11,85	2,65	5,00	40 %	8.200
Houille grasse à gaz (Montrambert)	80,20	5,25	8,55	3,00	3,00	34,5 %	8.600
Houille maréchale (Roche-la-Molière)	85,65	4,65	5,35	1,35	3,00	23 %	8.750
Houille demi-grasse (Lens)	87,75	4,70	5,00	1,00	1,55	19,5 %	8.830
Houille maigre anthraciteuse (Creusot)	89,39	3,66	3,70	1,8	1,45	10,4 %	8.700
Anthracite (La Mure)	86,60	1,35	2,95	4,7	4,40	2,75 %	8.200

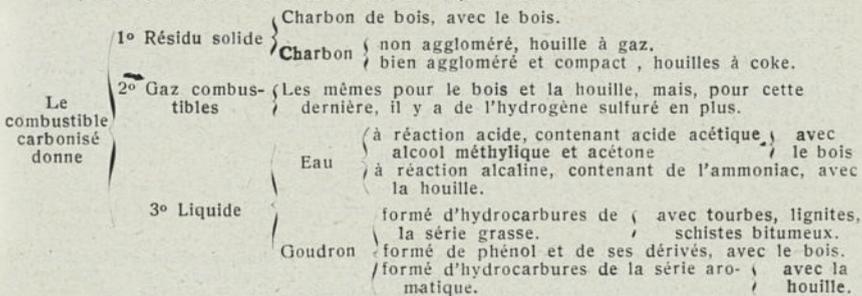
(2) Dans la distillation des combustibles, bois, lignites, houilles, on obtient toujours : 1° Un résidu solide; 2° des gaz qui se dégagent; 3° un liquide condensable. Le résidu solide est du charbon pour la majeure partie. Les gaz et le liquide condensable renferment l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et les autres éléments du combustible et aussi une partie du carbone qui a formé avec ces éléments des hydrocarbures, c'est-à-dire des combinaisons de carbone et l'hydrogène, et aussi des corps contenant hydrogène, oxygène et carbone.

La partie condensée se compose de deux couches, l'une renfermant l'eau primitivement contenue dans le combustible et aussi celle qui a pu se former par combinaison d'une partie de l'hydrogène et de l'oxygène qu'il contenait et qui dissout certains éléments, et l'autre, insoluble dans l'eau et plus ou moins noirâtre, appelée goudron.

S'il s'agit du bois, le résidu solide est le charbon de bois, les gaz et le liquide se nomment pyroliqueux pour l'ensemble. Ce pyroliqueux donne par distillation fractionnée (c'est-à-dire en chauffant progressivement et séparant les produits obtenus aux différentes températures) de l'acide acétique (vinaigre de bois), de l'alcool méthylique (esprit de bois), de l'acétone (contenant de la créosote) comme produits gazeux et le liquide condensable est du goudron de bois dont on peut retirer par distillation des dérivés oxygénés, des carbures de la série grasse, tels que les phénols. 100 kg. de bois fournissent environ 22 kg. de charbon, 7 kg. d'acide acétique, 2 kg. d'esprit de bois et 3 kg. de goudron.

Si le corps distillé est de la houille, le résidu est du coke ou du charbon non aggloméré; le gaz constitue ce qu'on nomme le gaz d'éclairage, et le liquide condensable comprend d'une part de l'eau ayant en solution des produits azotés tels que l'ammoniac, d'autre part du goudron pouvant donner par distillation des carbures de la série grasse.

On peut même donner le schéma ci-dessous pour les résultats :



cédé est connu et appliqué de longue date dans les forêts par les charbonniers.

La fig. 34 montre la disposition d'une meule. Le procédé consiste à brûler une partie du bois, pour produire la chaleur qui servira à décomposer le reste en ses éléments, et à empêcher un trop grand accès d'air (c'est-à-dire d'oxygène) en recouvrant la meule de terre.

Cette opération, plutôt brutale et empirique, laisse une assez grosse perte de bois ⁽¹⁾ et donne un charbon de qualité variable après chaque opération et avec chaque charbonnier (les parties mauvaises sont les *incuits* ou *fumerons*).

A une époque où le charbon de bois était le seul combustible employé, sa fabrication avait été l'objet de règlements aussi nombreux que variés afin de préciser les essences les plus convenables à la métallurgie du fer, et de déterminer le moment le plus favorable aux coupes et à la carbonisation.

On y prévoyait la disposition des aires ou fauldes, le conditionnement des bois dans les meulés, des arrivées d'air, de la conduite du

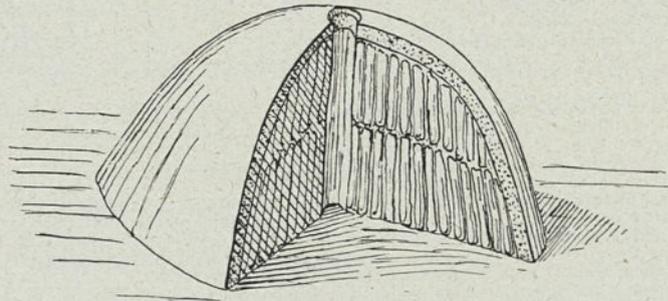


FIG. 34.

MEULE POUR LA CARBONISATION DU BOIS EN FORET.

On distingue la couche de terre extérieure empêchant l'arrivée de l'air sur le bois en cours de carbonisation.

feu, de son extinction, etc... Ainsi, on traitait à part les bois verts et les vermoulus qui s'écrasent tous deux et on ne mélangeait point le dur et le tendre, celui-ci se carbonisant plus vite...

La meule était allumée à la pointe du jour pour pouvoir la surveiller de près pendant les 16 premières heures de l'opération qui sont les plus délicates (la carbonisation dure 6 jours pour les petites meules et jusqu'à 28-30 jours pour les grosses).

(1) Dans les conditions les plus favorables, 1.000 kg. de bois donnent en forêt 180 à 210 kg. de charbon de bois, tandis que la distillation en vase clos donne, pour 1.000 kg. de bois, 230 à 260 kg. de charbon de bois et les sous-produits en plus.

De même, on évitait de commencer un jour de vent dans la crainte que le feu ne se portât d'un seul côté.

Enfin, on savait aussi que dans une combustion trop lente, le rendement était faible, car les bûches allumées en premier se réduisaient en cendres avant que les suivantes fussent carbonisées, etc., etc.

Cependant, avec un bois toujours le même, des ouvriers opérant identiquement, obtenaient un produit assez constant comme nature et comme composition ⁽¹⁾.

Les caractéristiques générales du charbon de bois sont sa légèreté ⁽²⁾, sa porosité et sa faculté d'absorption des gaz ⁽³⁾, sa faible résistance à l'écrasement, le très faible résidu (ou *cendres*) qu'il laisse après combustion complète et les propriétés spéciales de ses cendres ⁽⁴⁾.

Nous verrons dans un prochain chapitre les avantages et les inconvénients du charbon de bois pour l'utilisation en Sidérurgie; mais il nous faut observer ici qu'en raison de l'accroissement du nombre des forges et de leur abondante consommation de charbon de bois, l'Etat dut intervenir pour réglementer et empêcher le déboisement des forêts.

Ce fait de préservation, insignifiant en apparence, n'en était pas moins une entrave au développement de la métallurgie du temps.

Aussi, voyons-nous les maîtres de forge attentivement suivre les chercheurs et s'orienter vers l'emploi d'un nouveau combustible, la *houille*, que Dud Dudley expérimenta dans la fin du xvi^e siècle.

Abraham Darby l'employa dans ses fourneaux aux commencement du xviii^e siècle (vers 1713). Mais ce ne fut qu'à l'apparition du puddlage (1784), des laminoirs cannelés et de la machine à vapeur à la fin du xvii^e siècle que la *houille*, sous forme de *coke*, se répandit universellement en métallurgie.

Le coke est à la houille ce que le charbon de bois est au bois. Cela tombe sous le sens si l'on se souvient que la houille est constituée par des végétaux enfouis dans le sol il y a des milliers d'années.

Mais, à la différence du bois, qui toujours donne du charbon de

(1) Analyse moyenne d'un charbon de bois :

Carbone	80 à 90%
Hydrogène	5 à 2 %
Oxygène	6 à 1,5%
Azote	2 à 3 %
Cendres	inférieures à 1% , en moyenne 0,30 à 0,75%
Eau	Quantité variable.

(2) Le charbon de bois provenant de bois tendre pèse 100 à 125 kg. par mètre cube ou stère, celui provenant de bois dur pèse jusqu'à 250 kg. le stère.

(3) Le charbon de bois absorbe jusqu'à 50 fois son volume de gaz et même davantage et jusqu'à 15 ou 20 % d'eau .

(4) Les cendres de bois contiennent des alcalis, soude et potasse, jusqu'à 1/4 de leur poids. Ces corps les rendent très fusibles au point de vue métallurgique.

bois, les charbons ⁽¹⁾ ne sont pas tous susceptibles de donner du coke.

Leur composition chimique seule est insuffisante pour renseigner l'ingénieur à ce sujet.

On a pris l'habitude d'appeler « charbons à coke » les charbons qui « cokéfient » c'est-à-dire qui donnent du coke par carbonisation, bien qu'il existe une classification usuelle qui les comprenne.

Le meilleur moyen de se rendre compte de la nature d'un charbon est d'en faire un « essai pour coke », qui est une carbonisation en petit.

Pratiquement, on connaît les charbons à coke des divers bassins houillers ⁽²⁾ et on se borne à les différencier par ce qu'on appelle :

(1) Ci-dessous une classification usuelle des houilles :

Type	Emploi	Résultat de la carbonisation	Teneur en matières volatiles	Puissance calorifique
I. — Houille sèche à longue flamme ou houille flambante ligniteuse.	Charbon à gaz	Non aggloméré	35 à 45%	7.800 à 8.600
II. — Houille grasse à longue flamme.	Charbon à gaz	Aggloméré mais poreux	32 à 42%	8.400 à 8.700
III. — Houille grasse proprement dite ou maréchale.	Charbon de forge et charbon à coke	Très boursofflé	27 à 32%	8.800 à 9.300
IV. — Houille grasse à courte flamme ou demi-grasse.	Charbon à coke	Bien aggloméré et compact	16 à 27%	8.800 à 9.300
V. — Houille maigre à courte flamme ou anthraciteuse.	Charbon à vapeur	Légèrement fritté	7 à 15%	8.400 à 9.000
VI. — Anthracites.	Gazogènes, charbon domestique	Pulvérulent	2,75 à 7%	8.000 à 8.400

(2) Ci-dessous quelques analyses de charbons se rapportant à divers bassins houillers et aussi les caractéristiques des charbons de diverses provenances :

	Eau hygroscopique	Matières volatiles hydrocarbonées	Soufre	Cendres	Carbone fixe	Phosphore		Essai du Coke		Pouvoir agglutinant (*)
						des Cendres	de la Houille	Coke	MV	
Houilles du bassin de la Ruhr (charbons lavés)	7,00 8,80 10,50	20,73 20,25 22,60	1,05 1,08 1,14	5,95 5,92 5,54	65,27 63,95 60,22	0,310 0,275 0,237	0,018 0,016 0,013	71,75 70,41 66,33	28,25 29,59 33,67	12 12 13
Houilles du Durham (charbons non lavés)	1,05 0,95 1,57	25,94 24,88 27,35	0,83 1,09 0,80	8,50 6,20 9,15	63,68 66,88 61,13	0,016 0,046 0,083	0,0013 0,0028 0,0075			17 18 17
Houilles de Cardiff (charb. non lavés)	1,02 1,35 1,00	21,30 22,70 22,05	1,63 1,92 1,46	12,45 9,50 7,50	65,23 66,45 69,45	0,163 0,495 0,456	0,020 0,018 0,012			11 12 12

(*) Le pouvoir agglutinant caractérise la faculté plus ou moins grande d'agglomération du charbon par carbonisation.

Les caractéristiques des charbons ci-dessus seraient :

Charbons de la Ruhr	{	Matières volatiles hydrocarbonées	20 à 22 %	environ
		Eau hygroscopique	10 %	
		Cendres	5 à 6 %	
Houilles du Durham	{	Matières volatiles hydrocarbonées	25 à 28 %	
		Cendres	6 à 8 %	
		Eau gyrosopique	inférieure à 1,5 %	
Houille de Cardiff	{	Matières volatiles hydrocarbonées	21 à 23 %	
		Cendres	10 à 12 %	
		Eau hygroscopique	inférieure à 1,5 %	

— C'est d'ailleurs ainsi que les marchés correspondants seraient faits avec des pénalités pour les déplacements en-dessus et en-dessous des limites, et même de clauses de refus.

les cendres ⁽¹⁾ (résidu de la combustion complète) et la teneur en matières volatiles ⁽²⁾, c'est-à-dire les gaz qui se dégagent par la carbonisation.

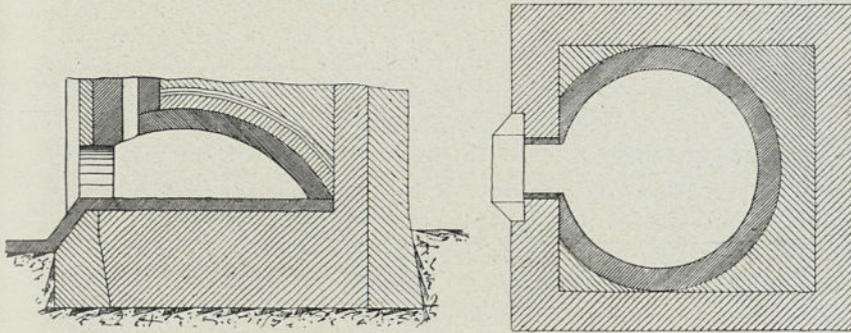


MAUVAIS COKE



BON COKE

FIG. 35.



Coupe verticale

FIG. 36.

Plan coupe

FOUR DE BOULANGER.

(1) Les cendres sont, pour ainsi dire, la gangue du charbon. On a intérêt à avoir le charbon contenant le minimum de cendres. On y arrive en faisant d'une part un triage soigné à la mine, et d'autre part en lavant le charbon pour séparer les impuretés plus lourdes par différence de densité. La fusibilité des cendres a aussi une grande importance.

(2) En disant que les matières volatiles sont constituées par les gaz qui se dégagent en carbonisant la houille, on commet une erreur de fait, car on obtient en même temps sous forme de vapeur l'eau contenue dans le combustible. Généralement on en tient compte en indiquant, par exemple, *matières volatiles hydrocarbonées* pour le cas où la vapeur d'eau est déduite des matières volatiles.

Disons cependant que d'autres éléments interviennent, tels que le soufre et le phosphore ⁽¹⁾.

Un bon coke métallurgique ⁽²⁾ doit être dur ⁽³⁾, dense ⁽⁴⁾, sonore, avoir un aspect argenté, contenir peu de cendres et de soufre, être en gros morceaux ne s'écrasant pas facilement.

La fig. 35 montre l'aspect de deux coques, l'un très mauvais, menu et poussiéreux, l'autre excellent.

Revenons pour un instant à la fabrication du coke qui constitue un service important soit à la mine, soit à l'usine sidérurgique, suivant le cas.

Autrefois, on obtenait le coke par grillage en meules, absolument

(1) Le soufre et le phosphore jouent un grand rôle dans la métallurgie du fer, leur présence dans le charbon est donc très importante. Comme le bois ne contient ni soufre ni phosphore et que, de plus, les cendres, sont en quantité très minimes, son emploi dans la production des fontes présentait un avantage très marqué sur lequel on reviendra dans un prochain chapitre.

(2) Analyses de quelques coques métallurgiques :

	Carbone	Hydrogène	Oxygène et Azote	Eau hygroscopique	Cendres
Coke de la Grand'Combe	89,28	0,21	2,21	0,50	7,8
Coke de la Ruhr	86 à 89,6	1,98 à 1,22	6,5 à 0,06	—	11 à 6,6
Coke du Durham	93,15	0,72	2,18	—	3,95
Coke de Connelsville	89,58	ensemble	0,460	0,30	9,11
Coke de Seraing	80,9	0,510	2,13	—	15,10

Analyse moyenne :

Carbone	Matières volatiles	Humidité	Cendres	Soufre
84	2	5	8	1

Composition des cendres de coques :

	Silice	Alumine	Peroxyde de fer	Chaux	Oxyde de Manganèse	Oxyde de Magnésie
Moyenne	45	25	20	5	—	5
Grand'Combe	51,5	24,4	10,4	7,8	—	2,00
Terrenoire	43,66	26,9	11,75	9,65	—	1,9
Ruhr	40,63	26,70	18,23	3,67	0,36	3,12

Caractéristiques des coques de haut-fourneau et fonderie :

	Pour Haut-Fourneau		Pour Fonderie	
	1 ^{re} Qualité	2 ^e Qualité	1 ^{re} Qualité	2 ^e Qualité
Cendres	Teneur inférieure à 8 %	Teneur 8 à 12 %	Teneur inférieure à 6,5 %	Teneur 7 à 10 %
Humidité	inférieure à 4 %	inférieure à 6 %	inférieure à 4 %	inférieure à 5 %
Soufre	inférieure à 1 %	inférieure à 1,5 %	infér. à 0,8 ou 0,9 %	infér. à 1,15 %
Perte par frottement en menus	inférieure à 5 %	inférieure à 6 %	inférieure à 4,5 %	4,5 %
Conditions physiques	poreux	poreux	compact	compact

(3) Résistance minimum du coke à l'écrasement, 40 à 80 kg. par centimètre carré pour être utilisable en sidérurgie, ce qui signifie que, pour écraser un petit cube de coke de 1 centimètre de côté, il faut un poids variant de 40 à 80 kg.

(4) Un mètre cube de coke pèse de 400 à 500 kg. (430 en moyenne). Si l'on ne tenait pas compte des vides, le poids serait de 1.200 à 1.900 kg. (alors que pour le bois cela oscille entre 200 à 500 kg.).

Les vides peuvent osciller de 25 % pour un coke dense, à 50 % pour un coke poreux. Enfin, la perte par écrasement peut osciller de 4 à 6 % entre la mine et l'usine.

La température d'inflammation du coke qui brûle sans flamme et sans fumée (comme toute matière carbonisée), est de 700° environ, alors qu'elle est de 350° environ pour le charbon de bois.

comme pour le bois. Mais la condition essentielle pour obtenir un *beau coke*, c'est-à-dire un coke en morceaux, était de ne pas employer de houilles menues qui augmentaient les déchets.

Ultérieurement les menus purent être utilisés dans les fours dits de « boulanger », probablement ainsi nommés parce qu'ils sont identiques à ceux employés pour cuire le pain.

La fig. 36 représente ce type de four.

On y charge la houille, on l'allume et on laisse brûler jusqu'à ce qu'on n'aperçoive plus aucun dégagement de flamme ou de fumée; alors on tire le coke formé avec un ringard ⁽¹⁾, on l'éteint avec de l'eau, on le transporte au lieu d'utilisation et l'on recommence l'opération. Il n'est pas nécessaire d'allumer ensuite la houille; le fourneau

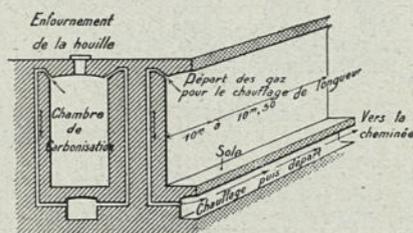


FIG. 37.

FOUR A COKE A CARBONISATION PAR CHAUFFAGE EXTERIEUR.

Il existe une arrivée d'air de combustion dans le carneau qui reçoit les gaz sortant du four. Cette arrivée d'air se fait soit par une ouverture placée sur le dessus du four, soit par une ouverture placée sur la façade du four, dans la maçonnerie du piedroit entre les fours.

qui reste à peu près six heures en feu acquiert un degré de chaleur assez élevé pour qu'elle s'enflamme spontanément.

Par la première carbonisation on obtient ordinairement moins de coke que par les autres, parce que le feu se répand au commencement d'une manière très inégale à travers la masse du combustible.

L'ensemble du procédé occasionne une grande perte de coke par combustion. On cherche à diminuer le déchet en surbaissant la voûte, ce qui réduit l'influence de l'air atmosphérique (c'est-à-dire de l'oxygène).

Nous n'insisterons pas davantage sur ce système de four et ses perfectionnements, nous passerons à l'étude moderne de la fabrication du coke. Nous pouvons cependant ajouter que certains métallurgistes anglais ont prétendu que le coke ainsi produit était supérieur comme qualité ⁽²⁾, à celui obtenu avec les procédés que nous décrivons sommairement plus loin.

(1) Longue tige de fer.

(2) C'est-à-dire qu'il en fallait moins par tonne de fonte produite au haut-fourneau.

Un fait important dans la progression des procédés a été la carbonisation par chauffage extérieur.

Le croquis schématique (*fig. 37*) montre la houille enfournée dans une enceinte fermée, appelée « chambre de carbonisation ».

Les gaz ⁽¹⁾ produits s'enflamment et circulent dans les parois et sous la sole du four et activent la carbonisation régulière de la houille.

Ce système a le grave inconvénient de dégager en abondance et

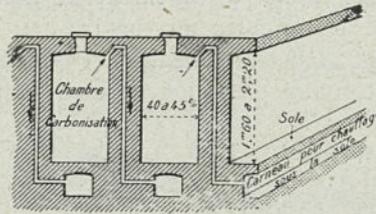


FIG. 38.

FOUR A COKE A CARBONISATION PAR CHAUFFAGE EXTERIEUR.

Comme pour les fours de la *fig. 37*, il faut une arrivée d'air de combustion, pour assurer le chauffage. Cette arrivée d'air est située dans le piedroit entre deux fours consécutifs et débouche sur les façades avant et arrière du four, où on peut les régler et surveiller la combustion en cours de carbonisation.

inopportunément vers la fin de l'opération, des gaz qui seraient nécessaires pour un chauffage énergique au début de celle-ci.

Pour pallier cet inconvénient on a combiné les fours deux par deux, de façon que les gaz du *premier four en plein dégagement* ser-

(1) Les gaz obtenus constituent le gaz d'éclairage lorsque le charbon employé est du charbon à gaz.

Composition moyenne d'un gaz d'éclairage :

Hydrogène	50 %	} Une houille à gaz donne environ 30. m ³ de gaz, 6 à 8 litres d'eau am- moniacale et 5 kilos de goudron pour 100 kilos de charbon.
Gaz des marais et azote	35 %	
Oxyde de carbone	8,25 %	
Gaz carbonique	1,75 %	
Benzine	1 %	
Autres carbures	4 %	

Un même charbon donne des produits tout à fait différents, suivant qu'il est chauffé *lentement* jusqu'au rouge (a) comme dans les fours à coke, ou distillé *très rapidement* (b). Ce dernier cas est celui de la fabrication du gaz d'éclairage, qui donne des gaz permanents surtout (méthane et hydrogène libre principalement) et produit du coke qui se dépose en partie dans la cornue, même sous forme de graphite. La différence est caractérisée dans les chiffres ci-dessous :

	a	b
Coke	30	30
Eau	11	7,5
Goudron	12	10
Gaz et pertes	17	32

Pour pouvoir utiliser le gaz des fours à coke pour l'éclairage, on n'en prend qu'une partie, celle qui se dégage entre la 4^e ou 6^e heure de distillation (suivant la teneur en eau de la houille traitée) jusqu'à la 15^e heure environ (au delà de cette heure, la qualité diminue rapidement). On dispose pour cela deux barillets au lieu d'un pour recueillir les produits de la distillation. Dans certaines usines, on n'a pas fait de fractionnement et on a utilisé la totalité du gaz produit à la distribution en ville. Cela dépend, bien entendu, du charbon employé; de plus, le rendement en coke varie. Il faut aussi, nécessairement, purifier le gaz de houille pour enlever le sulfure d'hydrogène malodorant (SH₂).

vent à chauffer la houille du *second four* qu'on vient de charger dans la chambre de carbonisation.

Il suffit pour cela que le chargement d'un four corresponde à peu près au moment où la carbonisation de l'autre est à moitié achevée ⁽¹⁾. (fig. 38).

Tous les fours à coke, quels que soient les détails d'exécution et la complication des carneaux de circulation des gaz, sont basés sur le même principe : se servir des gaz provenant de la distillation pour opérer la carbonisation ⁽²⁾. Bien entendu la mise en route nécessite un chauffage préalable au rouge des chambres de carbonisation, après quoi l'opération s'amorce d'elle-même.

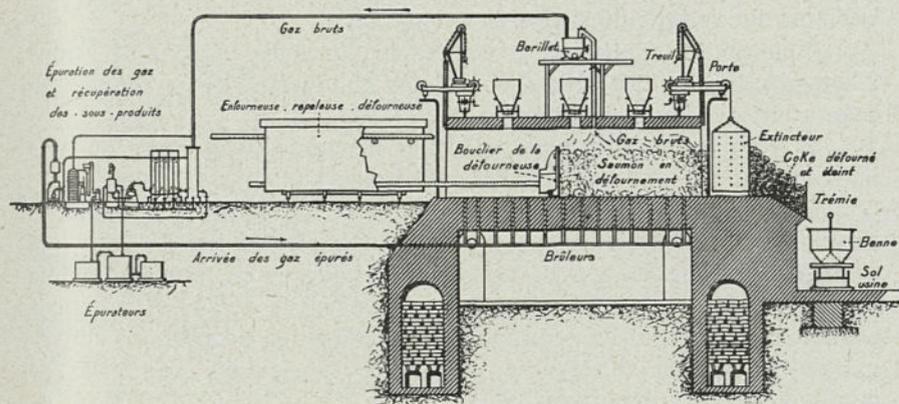


FIG. 39.

SCHEMA DE LA FABRICATION MODERNE DU COKE

Le charbon chargé dans le four par les wagonnets circulant sur le dessus de la batterie est égalisé par la repaleuse. Si le charbon est pilonné, le chargement se fait dans l'enfourneuse et le gâteau est introduit par cette machine dans le four. Les gaz de la distillation sont évacués dans le barillet et de là se rendent à l'atelier de récupération des sous produits puis à l'épuration. Les gaz épurés reviennent aux fours et alimentent des brûleurs placés entre les fours dont ils chauffent les parois. L'air de combustion est réchauffé en passant dans les empilages de briques des récupérateurs. Les gaz brûlés ayant servi au chauffage des parois des brûleurs, passent dans des empilages de briques (récupérateurs ou régénérateurs de chaleur) qu'ils réchauffent avant de se rendre à la cheminée. Lorsque la distillation est terminée dans une chambre on coupe la communication entre le four et le barillet, on enlève les portes avant et arrière au moyen des treuils, la défourneuse pousse le saumon de coke au dehors, et le coke est éteint. Ce coke est chargé dans les bennes qui alimentent directement les Hauts Fourneaux.

(1) Ces fours ont des chambres de carbonisation dont les dimensions courantes sont 40 à 45 cm. de large, 10 à 10 m. 50 de longueur et 1 m. 60 à 2 m. 20 de hauteur. La carbonisation se faisant sur 25 cm. environ par 24 heures, il suffit de charger chacun des fours toutes les 36 heures en chevauchant les chargements de telle façon qu'il y ait pour deux fours consécutifs un décalage de 18 heures.

Signalons que la chambre de carbonisation n'a pas partout la même largeur pour faciliter la sortie du saumon de coke. On donne, par exemple, une pente de 10 mm. par mètre à la sole et un élargissement de 5 mm. par mètre aux parois, de sorte que les dimensions peuvent être : largeurs 45 cm. et 35 cm. (cette dernière dimension du côté de la défourneuse).

(2) Dans le système décrit ci-dessus, la carbonisation dans un four dépend des gaz produits dans un autre. De sorte que si, pour une raison quelconque, ce dernier ne donne pas de gaz, la carbonisation du premier four n'ira pas et, par suite, se répercutera sur un troisième four, etc.

Un procédé meilleur qui sera décrit plus loin consiste à recueillir les gaz de tous les fours et à les répartir pour le chauffage, de sorte que le chauffage d'un four dépend des gaz de toute la batterie. Donc, meilleure régularité.

Mais le perfectionnement le plus génial de la fabrication du coke a été ce qu'on appelle la « récupération des sous-produits ⁽¹⁾ de la distillation ».

Le principe de l'opération consiste à faire la carbonisation en vase clos en empêchant l'accès de l'air et à recueillir tous les gaz et fumées provenant de la distillation dont on retire (*récupération*) les produits utiles et dont on se sert ensuite pour chauffer les fours. Les premiers fours construits en France l'ont été à Saint-Etienne par Louis Knab, ingénieur des Arts et Manufactures, répétiteur du Cours de Métallurgie à l'Ecole Centrale; son four fut perfectionné ensuite par Carvès.

Actuellement il existe de nombreux fours basés sur le même principe. Ils diffèrent entre eux par des détails de construction ou de disposition qui sortent du cadre de cet ouvrage.

Pour nous familiariser avec ces organismes importants, nous allons décrire les différentes opérations conduisant de la houille au coke pour le four représenté par la fig. 39.

Si les fours sont installés à la mine même, les wagonnets ou berlines venant du fond sont dirigés par trains aux fours à coke.

Dans le cas où la batterie ⁽²⁾ fait partie intégrante de l'usine, le charbon qui arrive par wagons à voie normale ou par bateaux est emmagasiné ⁽³⁾ dans des dépôts appelés estacades ou trémies, parfois en tas jusqu'au moment de l'emploi. — Souvent le dépôt est indispensable, par exemple si l'on emploie des mélanges en proportions convenables de houilles différentes ⁽⁴⁾ pour la fabrication d'un coke de qualité et de prix déterminé.

(1) Nous avons indiqué, dans une note précédente, que la distillation du charbon à coke se résume comme suit :

1° Une partie solide qui reste dans le four et constitue le coke.

2° Des gaz combustibles qui peuvent être utilisés soit en partie, soit en totalité, comme le gaz d'éclairage.

3° Un liquide condensable se divisant en deux couches, l'une aqueuse (comprenant l'eau qui existait dans le charbon et celle qui s'est formée aux dépens du combustible pendant la distillation) ayant en dissolution des matières ammoniacales qui servent à obtenir des sels ammoniacaux, et l'autre huileuse et foncée, plus ou moins épaisse, nommée goudron.

Le goudron de houille est lui-même distillé pour en retirer les hydrocarbures qu'il renferme.

(2) L'ensemble d'un certain nombre de fours à coke s'appelle une batterie de fours. Ce terme est courant et s'emploie aussi pour les chaudières, etc.

(3) L'emmagasinage des matières premières joue un très grand rôle dans les usines sidérurgiques, à cause des grandes quantités de matières manutentionnées. Aussi s'ingénie-t-on dans les usines modernes à avoir des dépôts et des reprises mécaniques très rapides et par suite peu coûteuses.

(4) Le rendement en coke d'une houille déterminée dépend de sa teneur en matières volatiles, et il est d'autant plus grand que la teneur en matières volatiles est plus faible. D'un autre côté et parmi les charbons à coke, ce sont en général les plus riches en matières volatiles qui donnent le coke le mieux aggloméré.

Enfin en ce qui concerne les sous-produits récupérés, une teneur minima en matières volatiles est nécessaire.

Tenant compte de ces diverses considérations, on conçoit qu'on puisse faire des mélanges de houilles mieux appropriées au coke qu'on veut obtenir. C'est ce qui a été fait par certaines usines pouvant s'approvisionner de charbons différents.

Par exemple certaines usines ont employé des mélanges de charbons à coke, avec une proportion de fines d'antracite (dont le rendement en coke est très élevé et le prix bas). Le résultat a été un très bon coke à bas prix. Citons comme mélanges classiques ; mélange de houilles du Durham et de Cardiff ; mélange de charbons de la Ruhr et de charbons du Durham. Dans les 2 cas on peut y adjoindre de 10% à 15 % ou même 20 % d'antracite.

Du dépôt, la houille ou le mélange de différents charbons est amené à un appareil de broyage pour être réduit en poudre, très fine.

Le mélange broyé est souvent emmagasiné dans une tour qui sert de réserve et alimente les wagonnets ⁽¹⁾ de chargement circulant sur les fours.

Les wagonnets déversent la houille menue dans les fours ⁽²⁾ au moyen d'ouvertures ménagées à la partie supérieure de ceux-ci et on égalise la matière enfournée.

Dans les installations modernes, le mélange est parfois pilonné ou comprimé, suivant la qualité du charbon, dans un appareil appelé pilonneuse et enfourné en une seule fois, automatiquement, dans le four. — Ce système donne un coke plus dur et plus compact ⁽³⁾.

Les portes mobiles du four sont complètement fermées au moyen d'une bouillie de terre glaise qui durcit par la chaleur.

La carbonisation commence et les gaz s'échappent par le *barillet* d'où ils vont à l'usine spéciale de récupération des sous-produits et reviennent pour servir au chauffage des fours.

Il y a naturellement un grand nombre de fours, de sorte que les gaz affluent toujours pour le chauffage.

Pendant le chargement d'un four celui-ci est isolé du barillet au moyen de robinets et de vannes.

Lorsque la carbonisation ⁽⁴⁾ est terminée, ce dont on se rend compte au moyen d'une ouverture qu'on débouche de temps en temps, on isole le four, on lève la porte et l'appareil appelé défourneuse (*fig. 33, en tête du chapitre*) pousse dehors la masse de coke ou « saumon » qui forme un seul bloc. Dès que le saumon est sorti, on l'arrose ⁽⁵⁾ pour éteindre le coke et le désagréger. On referme ensuite les portes et on recharge le four pour une nouvelle opération (*fig. 39*).

(1) Les wagonnets de chargement contiennent 300 à 600 kg. de charbon, ils se vident par le fond qui est fermé par une trappe.

(2) L'enfournement est d'environ 600 à 650 kg. de charbon par mètre cube de capacité de la chambre. Le mouvement des wagonnets peut être automatique. La quantité d'eau contenue dans le charbon enfourné est d'environ 15% en moyenne.

(3) Lorsqu'on comprime le charbon on est obligé de l'humecter s'il est trop sec (on ajoute 10 % d'eau au maximum). L'enfournement augmente pour une même capacité de chambre puisqu'on peut aller à 800 ou 850 kg. de charbon par mètre cube (au lieu de 600 à 650) ce qui diminue les frais de main-d'œuvre. De plus la concité des chambres de carbonisation peut être réduite et même complètement supprimée sans rendre le défournement difficile. Les parois s'usent moins. Il faut en effet un jeu d'environ 10 mm. entre le gâteau de houille comprimée dans la caisse de pilonnage et les parois du four à l'enfournement.

A noter surtout que le coke obtenu avec charbon comprimé peut avoir une résistance doublée (jusqu'à 175 kg. de résistance par centimètre carré) que le rendement augmente de 2 à 3 % (diminution des pertes par combustion) et qu'enfin on a ainsi 2 à 3 % de gros coke de plus.

(4) La durée de la carbonisation varie suivant la teneur en eau du charbon, la largeur du four, la répartition plus ou moins uniforme de la chaleur, etc. Pour les fours fonctionnant sans récupération des sous-produits, la durée varie de 28 à 36 heures ; pour les fours à récupération des sous-produits, de 25 à 30 heures.

(5) L'extinction doit se faire avec une eau pure. L'eau salée donne des dépôts de sel qui causent des dommages au briquetage du haut fourneau. Elle nécessite 500 à 900 litres par tonne de coke. On peut admettre 1 mètre cube par tonne de coke pour des calculs approximatifs.

Les gaz de la distillation sont appelés gaz bruts à la sortie du four et gaz épurés lorsqu'ils ont été débarrassés des sous-produits récupérés ⁽¹⁾ (goudrons, benzols, ammoniac).

Les gaz épurés, après leur combustion sous les fours pour la carbonisation, sont encore très chauds ⁽²⁾ et avant de les laisser échapper dans l'atmosphère par une cheminée, on s'en sert pour chauffer des chaudières et produire de la vapeur.

Actuellement les fours à coke ont été perfectionnés ⁽³⁾ à tel point que les gaz provenant de la distillation ne sont plus employés en totalité pour le chauffage des fours eux-mêmes. Il en reste une grande partie qu'on utilise soit sous des chaudières pour produire de la vapeur, soit comme gaz d'éclairage et chauffage, soit pour actionner des moteurs à gaz. Ce dernier moyen a permis de réaliser des bénéfices très importants.

On est même arrivé à cette conception qu'il valait mieux chauffer

(1) Un aperçu des opérations de récupération est le suivant :

Les vapeurs et gaz sortant des fours à coke (ou des cornues de fabrication du gaz d'éclairage) sont refroidies par l'air et par l'eau dans une grande conduite appelée barillet.

Le gaz ammoniac reste en solution dans l'eau. On peut le faire dégager par la chaleur et le traiter par l'acide sulfurique pour obtenir du sulfate d'ammoniac (utilisé comme engrais).

Le goudron se sépare par différence de densité des eaux ammoniacales et de l'eau entraînée. Au besoin on chauffe le goudron au moyen d'un serpentin de vapeur pour le rendre plus fluide et favoriser la séparation. Son poids est d'environ 1.150 à 1300 kg. par mètre cube.

Par distillation du goudron on obtient à des températures croissantes des hydrocarbures nommés huiles légères (entre 80 et 170°), huiles moyennes (entre 170 et 230°), huiles lourdes (entre 230 et 270°), huiles anthracéniques (au-dessus de 270°), le résidu solide est le brai.

Le brai est lui-même composé de charbon et d'hydrocarbures (anthracène, phénanthrène, pyrène, chrysène, etc.) qui sont d'autant moins nombreux que la distillation a été poussée plus loin.

Le goudron donne environ 3 à 6 % d'huiles légères, 10 % environ d'huiles moyennes, 7 à 12% d'huiles lourdes, 10 à 40% d'huiles anthracéniques, 45 à 65% de brai.

Les huiles légères rectifiées donnent les benzols ; on peut aussi en retirer des produits servant à la préparation des vernis, l'essence de naphte (éclairage).

Les huiles moyennes donnent des matières utilisées pour la dissolution du caoutchouc et aussi pour l'alimentation de certains appareils d'éclairage de chantier.

Les huiles lourdes peuvent donner par distillation le phénol, la créosote, l'anilline, la naphthaline, l'anthracène, le chrysène, le pyrène (qui conduisent à la fabrication des matières colorantes aussi nombreuses que variées). Elle servent à l'éclairage, à la fabrication de vernis, comme huiles de graissage, comme combustible, comme antiseptique.

(2) Après utilisation pour la carbonisation, les gaz chauds sont à une température d'environ 1.000 à 1.100° et peuvent être employés à produire de la vapeur par passage sous des chaudières à vapeur. On peut admettre que les flammes perdues peuvent donner 0 kg. 75 à 1 kg. 30 de vapeur par kilogramme de charbon enfourné. On peut calculer le nombre de chaudières nécessaires (surface de chauffe), sachant qu'une chaudière vaporise 12 à 20 kg. d'eau par mètre carré de surface de chauffe et par heure (12 kg. pour les chaudières à foyer intérieur, 20 kg. pour les semi-tubulaires).

(3) Dans les installations modernes, on fait passer les flammes perdues dans des chambres contenant des empilages de briques réfractaires qui servent à chauffer ensuite l'air de combustion des gaz servant à la carbonisation. Ces *récupérateurs de chaleur* augmentent le rendement calorifique du four, c'est-à-dire permettent de consommer moins de gaz pour effectuer la carbonisation et d'avoir ainsi un excédent disponible. Ces fours devraient s'appeler des fours à coke à récupérateurs de chaleur avec récupération de sous-produits. On prend l'habitude, depuis un certain temps, de les appeler fours à *régénérateurs* et récupération de sous-produits ; le mot « régénérateurs » s'appliquant plus particulièrement aux chambres d'empilages.

A noter que le gaz épuré a une puissance calorifique de 3.500 calories environ par mètre cube et qu'un moteur à gaz consomme environ 2.000 à 2.200 calories par cheval heure.

Disons aussi que dans le cas de fours à régénérateurs les flammes perdues sortent des chambres à une température plus basse et que par suite la production de vapeur sous des chaudières descend à 0 kg. 6 ou 0 kg. 8 par kg. de charbon enfourné. Dans les installations bien conçues les flammes sortent à environ 300° et vont directement à la cheminée.

les fours à coke autrement que par les gaz provenant ⁽¹⁾ de la distillation pour utiliser la totalité de ceux-ci au chauffage, à l'éclairage ou à l'alimentation de moteurs à gaz.

Il y a dans les installations de fours à coke quantité de problèmes très importants, tels le dosage du mélange de houilles, qui doit être précis, modifiable à volonté, sans pour cela nécessiter de main-d'œuvre coûteuse; le broyage qui doit être rapide et cependant très soigné; l'emmagasinement du charbon broyé qui est nécessaire pour parer aux arrêts des broyeurs; le chargement qui doit être facile tout en étant uniforme; le défournement et l'extinction.

La façon de conduire cette dernière opération ne peut rester indifférente, elle doit durer tant que le coke paraît incandescent ⁽²⁾. En employant un fort jet d'eau, on obtient un coke plus humide que par l'extinction en pluie fine tombant de haut en bas.

Dans les très grosses installations modernes, on emploie des appareils mécaniques qui procèdent automatiquement à l'extinction du coke et à son chargement sur wagon ⁽³⁾.

Dans les installations courantes, des *gamins* envoient un jet d'eau puissant sur le saumon à sa sortie du four, tandis que des ouvriers désagrègent le saumon au moyen de longs crochets, puis on procède au chargement dans des wagons ou wagonnets qui conduisent le coke obtenu au haut fourneau.

On cherche à éviter les manipulations successives du coke, qui le brisent et donnent du menu perdu ⁽⁴⁾.

Souvent même, dans les installations récentes, le coke éteint sortant des fours est chargé dans des bennes ou des récipients qui le

(1) Le moyen employé a été dans certains cas des gazogènes séparés, les gaz produits devant être distribués en ville. Dans d'autres cas on chauffe les fours à coke avec du gaz de haut fourneau, réservant celui de la distillation, plus riche, au chauffage de fours Martin ou à la production de force motrice. On reviendra sur cette question aux chapitres des haut fourneaux et des fours Martin.

(2) De sorte que la nuit le coke est plus humide que le jour, car, l'incandescence paraît plus longtemps.

(3) Les procédés d'extinction et de chargement automatique du coke peuvent se ramener à trois.

Le premier consiste à disposer une sorte de bouclier qui entoure le saumon rouge de coke à sa sortie du four et qui comporte des moyens d'arrosage en pluie sur trois faces. Le tout est mis en œuvre dès la sortie du saumon, qui est directement chargé dans des wagons, pour l'expédition ou le criblage, on appelle parfois l'ensemble du bouclier arroseur : *quencher*, du mot anglais *quench*, tremper.

Le second procédé, consiste à charger le coke rouge, provenant d'une chambre dans un wagon à coke (ou coke car anglais) à parois en fonte. Ce coke rouge est ainsi transporté sous une tour d'extinction d'où l'eau tombe en pluie uniforme sur le coke, en assurant une extinction régulière, avec le minimum d'eau et une faible combustion de coke rouge. La cheminée emporte les vapeurs sulfureuses au-dessus des fours et évite des détériorations. Ce procédé nécessite peu de monde, supprime l'aire de défournement et réduit la teneur en eau du coke à 2 % environ.

Le coke éteint est ensuite envoyé au criblage, au classement et au chargement automatique.

Le troisième procédé consiste à éteindre le coke en vase clos pour recueillir la chaleur emmagasinée dans le saumon au rouge. Il ne comporte encore que quelques applications peu nombreuses.

(4) Le menu est utilisé soit au chauffage de chaudières, soit à la fabrication de briquettes ou boulets. A noter que l'agglomération des menus de houilles ou de coke est obtenue au moyen du brai dont on ajoute jusqu'à 8 % du poids de la briquette.

portent directement sans transbordement à la partie supérieure du haut fourneau.

Pour terminer, disons que les points importants à considérer dans un coke, outre son aspect physique et sa dureté dont nous avons parlé, sont : sa teneur en cendres, sa teneur en soufre et sa teneur en phosphore.

Nous y reviendrons lorsque nous parlerons de son utilisation.

L'emménagement du coke est délicat, d'une part à cause de sa facilité d'absorption et de l'humidité, d'autre part à cause des pertes qu'occasionnent sa manutention.

Pour tenir compte de ces inconvénients, on fait une réserve de coke à laquelle on ne touche qu'en cas de nécessité (arrêt ou réparation des fours par exemple) et on utilise normalement le coke produit dès son extinction.

RESUME DU CHAPITRE III

Le combustible est, après le minerai de fer, la matière primordiale de l'usine sidérurgique.

Parmi les combustibles on a utilisé dans l'ordre, d'abord le bois, puis le charbon de bois et enfin la houille carbonisée ou coke. On pourrait aussi employer les lignites, la tourbe, etc., mais exceptionnellement.

Le bois est un corps formé de carbone, d'hydrogène, d'azote et d'eau.

On appelle corps composé un corps tel qu'on peut le décomposer en deux ou plusieurs autres dénommés corps simples. (Exemples : le gaz carbonique, formé de carbone et d'oxygène; le sucre formé de carbone, d'oxygène et d'hydrogène; le bois et les divers autres combustibles.)

Un corps simple ne peut donner que lui-même, quels que soient les moyens mis en œuvre pour le décomposer. (Exemples : le soufre, l'oxygène, le carbone ou charbon pur, le plomb, le cuivre, l'hydrogène, l'azote, etc.)

Le bois chauffé se décompose en laissant, comme résidu solide, du charbon de bois.

Cette décomposition se fait en opérant une combustion incomplète, le bois étant mis en tas sous forme de meule et en empêchant l'accès libre de l'air.

Elle peut aussi se faire en vase clos et, dans ce cas, on recueille les produits de la distillation qui sont du goudron, de l'acide acétique et des gaz.

La houille, qui est le résultat de la décomposition de végétaux anciens enfouis dans le sol dans les temps préhistoriques, est également un corps composé formé de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote.

La décomposition ou distillation de la houille laisse un résidu solide, parfois agglutiné (constituant le coke), dégage des gaz combustibles (constituant le gaz de houille ou gaz d'éclairage), et donne un liquide composé de goudron et d'eau ammoniacale.

Les houilles se classent en plusieurs catégories parmi lesquelles les houilles grasses et les houilles demi-grasses fournissent seules du coke sidérurgique par carbonisation.

Le coke a été obtenu, au début, par combustion incomplète en meules ou stalles. Puis on l'a fabriqué dans des fours de boulanger à la sortie desquels on l'éteignait avec de l'eau.

Actuellement on le fabrique dans des fours ayant des dispositions très variées, appelés fours à coke.

Principe des fours à coke modernes :

La distillation de la houille produit des gaz dont la combustion sert à chauffer le four dans lequel elle se trouve.

Le perfectionnement de ce procédé consiste à se servir des gaz pour la carbonisation, après les avoir débarrassés des produits qu'ils entraînent : le goudron et l'eau ammoniacale. C'est ce qu'on nomme la récupération des sous-produits.

Le dernier stade de cette évolution consiste à n'employer qu'une partie des gaz à la carbonisation (en perfectionnant le système de chauffage des fours) et à utiliser l'excédent à la production de force motrice au moyen de moteurs à gaz.

Le coke contient surtout du carbone, des cendres et de l'eau. (On doit y envisager parfois la teneur en soufre et phosphore.)

Les cendres sont ce qui reste après combustion complète.

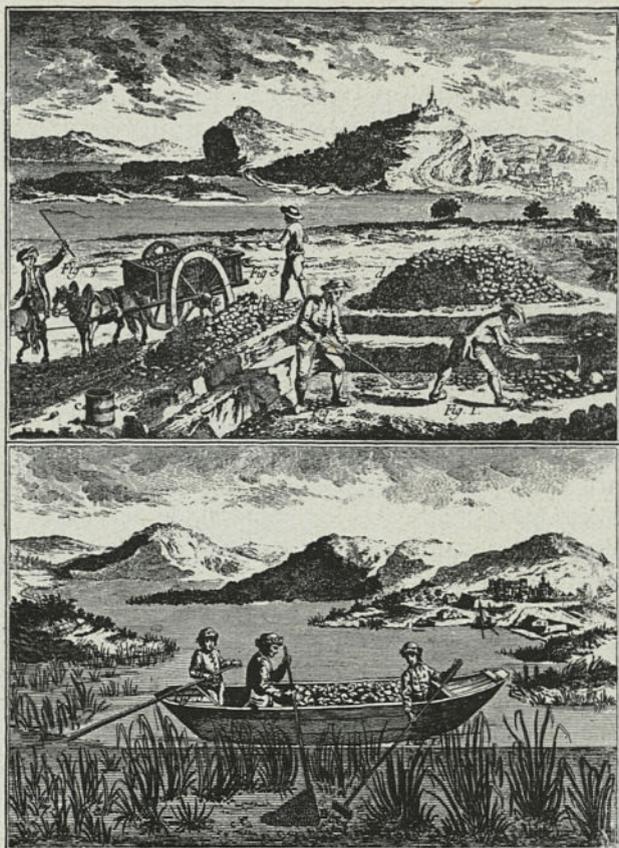


FIG. 40.

EXPLOITATION DU MINÉRAI DE FER EN AMAS (MINIÈRES).

La partie supérieure montre l'exploitation d'un amas de minéral en grains ou galets enrobés de terre : le mineur 1, a pioché la mine et sépare la pierre inutile, le second forme des tas c d, le troisième remplit le tombereau conduit par le quatrième. Une mesure A avec poignées cc permet de mesurer la mine. La partie inférieure représente l'extraction de minéral en dépôt au fond d'un lac. L'ouvrier 1 racle le fond, tandis que l'autre recueille le minéral dans un filet.

CHAPITRE IV

Le minéral de fer est la matière première du fer sous toutes ses formes ⁽¹⁾.

Le sidérurgiste, restreignant le sens générique de cette appella-

(1) Berzélius a dit autrefois : « le fer est devenu le sine qua non de la civilisation » Cette parole est encore plus vraie de nos jours.

Le fer est extrêmement abondant dans les trois règnes, la plupart des roches du globe en contiennent : serpentine, jaspé, porphyre, etc. C'est le fer qui colore la plupart des pierres

tion *minerai de fer*, n'entend désigner sous ce nom que la catégorie des substances minérales qu'il peut employer *économiquement* pour en retirer le fer qu'elles contiennent. Toutes les autres, quelle que soit leur richesse en fer, ne méritent point ce nom au regard du métallurgiste.

Parmi ces substances utilisables économiquement, il en est dont l'aspect physique, la couleur et la composition chimique varient selon les lois de leur formation géologique et le lieu de leur origine. Conséquemment ceux-ci et ceux-là nécessitent la diversité des méthodes de traitement en usage et expliquent suffisamment la différente nature des produits obtenus.

Disons encore que la définition courante en métallurgie: *produit pouvant être employé économiquement pour produire du fer* signifie qu'une matière peut n'être pas un minerai de fer aujourd'hui et le devenir demain. La condition primordiale qui fait qu'une matière ferreuse constitue un minerai de fer est sa *teneur en fer*, c'est-à-dire la quantité de fer pur qu'elle contient (1).

A ce point de vue particulier la limite de sélection n'a pas été toujours la même, elle s'est modifiée avec le progrès. Ainsi, on ne traitait autrefois au procédé du bas foyer, que des minerais facilement réductibles contenant environ cinquante pour cent de fer, 50% (c'est-à-dire 50 kg. de fer pur sur 100 kg. de matière brute), alors que de nos jours on arrive à traiter couramment des minerais dont la teneur descend à 30 et même 28 % (2).

fines : tésésie, béril, topaze, girasol, corindon. On le trouve dans toutes les terres, dans les cendres de tous les végétaux, et Berthollet prétendait que c'est aux diverses modifications que le fer éprouve dans les fibres végétales qu'on doit les variétés de couleur qui ornent les plantes.

Enfin le célèbre minéralogiste Haüy disait à ce sujet que « quand la nature prend le pinceau, c'est très souvent le fer oxydé qui est sur la palette.

Le fer existe à l'état natif, mais il est rare et n'a jamais été utilisé industriellement.

Quantité de substances contenant du fer ne sont pas considérées comme minerai, même si la teneur atteint 10 et 15%.

(1) Pour indiquer la limite maxima de la richesse en fer d'un minerai de fer, nous donnons ci-dessous les teneurs des oxydes de fer théoriques ou des espèces minéralogiques absolument pures.

Le sesquioxyde de fer, $Fe_2 O_3$ se rencontre pur sous forme de fer oligiste, il contient 112 gr. de fer pour 160 gr. d'oxyde, soit 70% de fer.

L'oxyde magnétique $Fe_3 O_4$ se rencontre pur sous forme de magnétite, il contient 168 gr. de fer pour 232 gr. d'oxyde, c'est-à-dire 72,4% de fer (72 gr. 4 pour cent grammes d'oxyde magnétique).

L'oxyde FeO ou protoxyde ne se rencontre pas sous forme d'espèce minérale pure sans quoi le fer pourrait y atteindre une teneur de 77,5%.

Quand on le rencontre dans les minerais, il est combiné avec le peroxyde $Fe_2 O_3$ pour donner de la magnétite ou, avec le gaz carbonique, pour donner un carbonate de fer.

Le fer carbonaté ou sidérose, formule $CO_3 Fe$, contient 56 gr. de fer pour 116 gr. de carbonate, soit au maximum 48% de fer. Si on le calcine, il se forme du peroxyde dont la teneur peut se rapprocher de 70% de fer.

Comme les minerais industriels contiennent souvent des gangues ou terres mélangées, on en conclut que la teneur maximum en fer d'un minerai est de 72,4% et qu'elle ne peut pas aller au delà sauf s'il s'agit de fer natif.

(2) Nous faisons allusion ici aux minerais de l'Est de la France ou minettes de Lorraine qui contiennent de 27 à 28% de fer à 33 ou 40%. La moyenne de ces minerais est de 30% et leur emploi est économique.

C'est à dessein que nous n'indiquons pas une limite plus basse, bien qu'on emploie au haut-fourneau des matières contenant moins de 20% de fer.

Mais ces matières ne peuvent être employées seules économiquement, elles servent de complément à d'autres minerais (voir page 58 et note 3).

Mais si la teneur en fer est la condition primordiale (qui sert souvent de base à l'appréciation de la valeur marchande ⁽¹⁾) ce n'est pas la seule, loin de là, et les conditions annexes peuvent prendre une telle importance qu'une matière contenant même plus de 50% de fer ne constitue pas pour cela un minerai de fer. Telle est par exemple la pyrite de fer, ou sulfure de fer naturel, contenant, quand elle est pure, uniquement du soufre et du fer dans les proportions suivantes : 64 gr. de soufre combinés à 56 gr. de fer, soit 56 gr. de fer pour 120 gr. de pyrite ou 46 gr. 5 de fer pour 100 gr. de pyrite, c'est-à-dire 46,5 % de fer ⁽²⁾.

Pour préciser la question nous allons développer un peu la formule donnée qui se complètera d'ailleurs d'elle-même au fur et à mesure de l'extension de nos connaissances sidérurgiques.

Pour qu'une substance minérale contenant du fer soit un minerai de fer, c'est à dire pour qu'on en puisse économiquement retirer le fer, il faut :

Que sa teneur en fer ne soit pas inférieure à 28 ou 30 % ⁽³⁾ ;

Que la gangue qui l'accompagne soit facilement fusible et non intimement liée au fer (sous forme de combinaison par exemple) ⁽⁴⁾ ;

Qu'elle ne contienne pas d'éléments susceptibles de nuire ⁽⁵⁾ à la

(1) Lorsqu'il n'y a pas de conditions accessoires, ce dont il sera fait mention plus loin, la base d'achat d'un minerai est sa teneur en fer. Mais cette teneur peut varier, étant donné qu'il s'agit d'un produit naturel. On convient que si elle a une valeur déterminée, le prix sera convenu d'avance. Si la teneur trouvée sur le minerai livré est au-dessus ou au-dessous de celle prévue, le prix convenu sera augmenté ou diminué d'une quantité convenue d'avance appelée échelle.

Par exemple, on dit : le prix de ce minerai est de 15 fr. les 1.000 kg. à Paris, sa teneur étant de 45% de fer et l'échelle de 0 fr. 25 par unité de fer. Ce qu'on traduit ainsi : teneur trouvée 47%, prix 15 fr. plus 2 fois 0 fr. 25 ou 15 fr. 50. Si la teneur n'est que de 43% le prix sera de 14 fr. 50 seulement.

(2) La pyrite de fer a pour symbole FeS_2 ce qui correspond à 56 gr. de fer pour 2×32 gr. de soufre. On la rencontre dans la nature sous forme de petits cubes jaune d'or (pyrite martiale) ou sous la forme de rhomboèdres et de dodécaèdres rhomboidaux blancs (pyrite marcassite).

Elle est surtout recherchée pour le soufre qu'elle contient, 64 gr. sur 120 gr. ou 53,5%, c'est-à-dire plus de la moitié de son poids, alors qu'elle n'a que 46,5% de fer.

Une fois grillée il reste de l'oxyde de fer pouvant contenir jusqu'à 63% de fer et qu'on utilise comme minerai de fer.

On rencontre aussi dans la nature des pyrites de fer et de cuivre comme la chalcoppyrite FeS_2Cu , mais elles sont encore moins utilisables que la pyrite de fer pure.

(3) Comme il est indiqué page 58, note 3, on utilise des matières contenant moins de 28 ou 30 % de fer, mais ce ne sont pas à proprement parler des minerais, mais des fondants.

(4) C'est ce qui se passe pour les anciennes scories de forges à la Catalane qu'on retrouve en amas aux points où d'anciennes forges ont existé. Ces scories contiennent de la silice qui est alliée au fer sous forme d'une combinaison appelée silicate de fer qui à haute température a tendance à fondre et à se combiner avec le laitier sans être réduite par le charbon. On a donc ainsi un rendement beaucoup moins grand en fer.

(5) Parmi les éléments nuisibles on peut citer outre le soufre et le phosphore, l'arsenic, le cuivre, le plomb, le zinc, etc.

Parmi les éléments fréquemment mélangés ou combinés au minerai de fer, on peut citer le manganèse qui est un métal. Ce métal se trouve sous forme d'oxydes analogues à ceux du fer. Ils peuvent même donner des minerais contenant uniquement des oxydes de manganèse et des gangues.

Le manganèse est combiné au fer dans ses minerais en toutes proportions. Quand il y en a peu, on n'en fait pas mention. Quand la teneur en manganèse oscille entre 1 et 3 %, on dit que le minerai de fer est manganésé, si elle atteint 6 à 15 % c'est un minerai manganésifère, au-dessus de 15 à 20 % cela devient un minerai de manganèse où le fer est accessoire.

Nous verrons les avantages et inconvénients du manganèse dont la destinée est très étroitement liée à celle du fer en sidérurgie.

qualité du fer obtenu. (Par exemple le soufre et le phosphore ⁽¹⁾ ont une action néfaste sur le fer. Le soufre rend le fer *rouverin*, c'est-à-dire cassant à chaud, le phosphore le rend cassant à froid);

Il faut que cette substance soit en morceaux, poreuse sans pour cela s'écraser sous une faible charge;

Qu'elle n'ait pas trop tendance à absorber l'humidité;

Et, toutes choses étant relatives, qu'elle ne soit pas d'un prix élevé.

Chacune de ces conditions a ses raisons, et leur ensemble contribue à rendre l'emploi de la matière économique ou non ⁽²⁾.

Ainsi, lorsque la teneur en fer est basse, il faut davantage de minerai pour obtenir une même quantité (1.000 kg. ou une tonne par exemple) de fonte ou de fer; aussi plus de charbon, ne serait-ce que pour fondre la quantité de matières inertes (gangue) qui est plus grande; et enfin des manutentions plus importantes pour le chargement du haut fourneau ⁽³⁾.

Par ailleurs, si le fer ou l'oxyde de fer du minerai est intimement lié ou combiné à la gangue qui l'accompagne, le traitement en est difficile et on en perd une trop forte proportion qui s'écoule avec les résidus : scories ou laitiers.

Ce phénomène sera expliqué d'une façon plus complète dans un prochain chapitre, mais nous pouvons cependant dire, en quelques mots, qu'une partie de l'oxyde de fer combiné à la gangue fond, avant que le charbon n'ait pu agir sur lui, et cet oxyde de fer reste incorporé au laitier formé par la totalité des gangues.

Pour en saisir l'importance, il est nécessaire de faire une digression sur la fusibilité des terres qui accompagnent les minerais et leur influence sur la réduction.

Aujourd'hui, il n'y a plus de matières réputées infusibles, grâce au four électrique qui permet d'atteindre même 3.500°, température à laquelle rien ne résiste.

(1) La présence du phosphore était redoutée autrefois beaucoup plus que celle du soufre, car on ne savait pas du tout l'éliminer du fer obtenu.

Actuellement il n'est nuisible que pour la fabrication de certaines fontes. Quand il s'agit d'acier, il est au contraire recherché parfois, comme dans le cas du procédé Bessemer Thomas dont il sera parlé plus tard.

(2) Chacune des clauses précédentes peut servir de base à une classification des minerais. Souvent on caractérise un minerai par sa teneur en fer, d'autres fois par l'indication de la matière qui prédomine dans la gangue (minerai siliceux, minerai calcaire, minerai magnésien), parfois par sa nature minéralogique (magnétite, fer oligiste, hématite, carbonate), souvent aussi d'après les proportions d'une matière annexée : phosphore, par exemple.

Ces désignations et classifications n'ont rien d'absolu, car elles empiètent l'une sur l'autre.

Aussi donnerons-nous des analyses de minerai tenant compte de ces divers errements.

Par rapport à la teneur en fer, les minerais pauvres ont au-dessous de 35 % de fer, les minerais moyens de 35 à 45 ou 50 %, les minerais riches au-dessus de 50 % de fer.

Par rapport à la nature des gangues, un minerai est dit calcaire, si la teneur en chaux est d'au moins 10 %, la teneur en silice étant inférieure à 2 %, ou supérieure à 15 ou 16 % si la teneur en silice atteint 5 ou 6 %, etc.

On voit donc par ces deux exemples qu'on peut avoir un minerai calcaire et pauvre ou un minerai moyen siliceux, ou un minerai riche où ne prédominent ni la chaux ni la silice.

(3) Nous verrons plus tard que pour produire 100 tonnes de fonte par jour avec un minerai à 50 %, il faut environ 200 tonnes de minerai. S'il s'agit d'un minerai à 30% de fer, il faut 300 tonnes soit 100.000 kg. de plus à manutentionner par jour rien que pour le minerai...

Nous verrons, cependant, que dans les opérations sidérurgiques la température la plus élevée, qui est de 1.800 à 1.900°, est atteinte au haut fourneau, exception faite pour le four électrique.

Cette température, bien que très élevée, serait pourtant insuffisante pour fondre aisément certaines matières constitutives des gangues, telles que la chaux ⁽¹⁾, la magnésie, la silice, l'alumine, qu'on y rencontre pures ou alliées.

Malgré cela, on a fondu les minerais avec les premiers haut fourneaux dans lesquels la température maxima était inférieure à celle obtenue de nos jours.



FIG. 41.

EXTRACTION DU MINERAL DE FER PAR Puits

Cette figure constitue le détail du chevalement qu'on voit à la partie supérieure de la fig. 8.

Cela tient à ce que si la chaux, la silice, la magnésie, l'alumine, nécessitent *isolément* des températures élevées pour fondre, elles donnent très facilement un produit fluide quand elles sont réunies, et cela à température d'autant plus basse qu'elles sont plus nombreuses.

Ce fait est connu de longue date, puisque le verre, qui est composé de silice, de chaux et d'oxyde de sodium ou de potassium, fond à température plus basse lorsqu'on lui ajoute d'autres corps tels que l'alumine, la magnésie et même un peu d'oxyde de fer. Or le verre était fabriqué déjà dans l'antiquité. Les corps obtenus par combinaisons de silice et d'autres corps sont des silicates et une loi énoncée par Berthier à ce sujet dit: *Un mélange de silicates est plus fusible que les silicates simples qui lui donnent naissance.*

Ce qui signifie que si un silicate de chaux fond à 1.570° et qu'un silicate d'alumine fond à plus de 1.650°, on peut obtenir un silicate de chaux et d'alumine fondant à une température inférieure à la plus basse des deux, donc au-dessous de 1.500

(1) La silice pure fond à 1.800°; la chaux pure fond à 2.500°; la magnésie pure fond à 2.500°; l'alumine fond à 2.000°.

La conclusion de cet aperçu est que si les gangues d'un minerai sont dans des proportions telles qu'elles forment un silicate fusible, le minerai sera un minerai « qui fond bien ».

Il y a lieu d'ajouter qu'un silicate donné fond encore plus facilement si on lui incorpore même de faibles quantités d'oxydes métalliques ⁽¹⁾ ce qui est souvent le cas en sidérurgie.

Les proportions suivantes de chaux, d'alumine et de silice, sont assez fusibles ⁽²⁾.

Le poids de l'alumine égal au tiers du poids de la chaux et la silice voisine de 35% (silice 35 ou 36, chaux 48, alumine 16).

Le poids de chaux égal au poids de l'alumine et la silice voisine de 60 (silice 60, chaux 20, alumine 20).

Le poids de l'alumine égal au cinquième du poids de la chaux, la silice étant voisine de 50% (silice 52, chaux 40, alumine 8).

Malheureusement on rencontre rarement les minerais ayant précisément comme gangue des matières en proportions fusibles, on est donc amené à corriger ces proportions en ajoutant une matière appelée fondant. Ce fondant ⁽³⁾ varie avec la composition chimique du minerai envisagé.

Mais comme on sait d'après ce qui précède que trois des éléments, silice, alumine, chaux magnésie mélangés, sont presque toujours fusibles, il suffit d'ajouter :

1° De la silice seule ou des roches silicieuses (granit par exemple) si les gangues ou les terres mélangées au minerai sont chaux et alumine, chaux et magnésie, magnésie et alumine ;

2° De la chaux si les terres mélangées sont silice et alumine ou silice et magnésie ;

3° De la marne, c'est-à-dire un composé de silice et d'alumine, si la chaux ou la magnésie prédomine dans la gangue ;

4° De la dolomie (mélange de chaux et de magnésie), si la silice et l'alumine sont en excès.

Des études très approfondies ont été faites sur ces questions et on pourrait, bien entendu, chercher pour chaque minerai le fondant le plus favorable.

(1) On appelle oxydes métalliques les oxydes de fer, de manganèse, de nickel, de cuivre, etc., par opposition aux oxydes de calcium (ou chaux), d'aluminium (ou alumine), de magnésium (ou magnésie), appelés oxydes terreux parce qu'ils entrent dans la composition des terres.

(2) Ci-dessous quelques mélanges dont les températures de fusion correspondent à ce qui est indiqué ci-dessus :

35 % de silice et 65 % de chaux	fondent à 1.570°;
35 % de silice et 65 % d'alumine	fondent à plus de 1.700°;
35 % de silice, 55 % de chaux et 10 % d'alumine	fondent à 1.450° environ;
40 % de silice, 25 % d'alumine et 35 % de chaux	fondent à 1.450° environ;
40 % de silice, 25 % d'alumine, 20 % de chaux et 15 % de magnésie	fondent à environ 1.350°.

(3) On a employé parfois comme fondant des minéraux comme le Hornblende, qui contient du fer, de la magnésie, de la silice, de l'alumine et de la chaux (silicate de fer, d'alumine, de magnésium et de calcium), le basalte, la cornéenne, le grenat (silicate d'alumine et de chaux), etc.

Analyse d'un minerai pauvre, d'addition :
 Fer = 23,00; Alumine = 3,5; Chaux = 22 ; Magnésie = 0,5 ; Manganèse = 0,29 ;
 Ph = 0,5 ; Perte au feu 23 ; Humidité 9 %.

En fait, on limite les fondants en général à deux :

Le fondant calcaire ⁽¹⁾, qui est constitué par la pierre à chaux qu'on appelle *castine*, et le fondant silicieux, qui est constitué par le sable pur ou un sable argileux et qu'on appelle *erbue*.

Le plus souvent, et c'est la solution la plus favorable, on essaie de combiner des minerais de différentes natures de façon à obtenir pour leur ensemble les proportions voulues dans les éléments des gangues.

Cette digression nous a un peu éloignés du sujet, revenons-y pour dire que la gangue ne doit être ni trop en excès, ni trop peu fusible, mais qu'elle doit être telle qu'elle accompagne les différents éléments de fer obtenus par réduction et en empêche la réoxydation au passage devant les tuyères. Elle doit fondre suffisamment à temps pour protéger le fer et être suffisamment fluide pour s'en séparer nettement dans le creuset.

Le minerai de fer ne doit pas contenir de matières pouvant nuire à la qualité du fer obtenu, et nous disions à ce sujet que le soufre et le phosphore sont à craindre plus particulièrement.

Cependant le soufre accompagne fréquemment le fer sous forme de pyrite. Mais fort heureusement le soufre peut être enlevé en grande partie du fer au moyen d'une opération appelée grillage et qui consiste à chauffer la matière au contact de l'air.

Cette opération transforme le soufre en gaz anhydride sulfureux (combinaison de soufre et d'oxygène) qui s'échappe, et le fer en oxyde de fer qui reste.

Mais hâtons-nous d'ajouter qu'il est difficile de séparer du fer les dernières parties de soufre qu'il retient, et que pour y parvenir il faudrait d'abord réduire le sulfure de fer en très petits morceaux et renouveler fréquemment la surface de la masse afin de multiplier le contact de l'air (pour activer l'action oxydante de l'oxygène).

D'autre part, il faut conduire cette opération avec précaution, autrement si la chaleur est poussée trop rapidement, le sulfure fond et l'oxygène n'agit que sur la surface du bain, au lieu d'être en contact avec les petits morceaux de pyrite, ce qui ralentit l'opération et la rend incomplète.

Enfin si un minerai contient peu de sulfure, le soufre qui se dégage par grillage peut pénétrer dans les parties saines du minerai et les contaminer.

(1) On emploie parfois un calcaire contenant encore de la silice mais où la chaux domine. La raison en est qu'on ne trouve pas autre chose sur place et que c'est le moyen le plus économique au point où on se trouve.

Exemple. — Analyses de calcaires et dolomies.

	Silice	Alumine	Chaux	Magnésie	Soufre	Phosphore	Oxyde de fer	Perte au feu
Calcaires	0.30	0.12	55.45	traces	traces	0.002	0.23	43.85
— phosphoreux ..	6.18	0.36	47.80	0.89	—	6.00	0.53	—
Dolomie frittée	6.60	—	51.75	33.52	—	—	—	1.40
— crue	3.65	1.2	30.12	20.11	—	—	1.2	45

Actuellement, on ne procède plus au grillage des minerais contenant du soufre ou du sulfure de fer. Si la teneur en soufre est assez élevée, on les rejette purement et simplement, si elle est inférieure à une certaine limite, on les emploie sans grillage au haut fourneau, qui permet d'éliminer une partie du soufre introduit, comme nous le verrons ⁽¹⁾.

Il en est autrement du phosphore, dont l'influence est toute différente, suivant l'emploi auquel le minerai est destiné.

Disons tout de suite que le phosphore du minerai se retrouve entièrement dans la fonte et qu'il est impossible d'en diminuer la quantité contenue, quelles que soient les opérations auxquelles on le soumet.

Par contre, nous verrons qu'on peut, en transformant la fonte en acier ou fer, diminuer fortement ou même supprimer totalement le phosphore dans le produit obtenu ⁽²⁾.

Mais si la fonte est utilisée directement pour le moulage en fonderie, elle contient en phosphore une proportion correspondante à celle des minerais employés.

Cette question est tellement importante que les minerais peuvent être classés au point de vue de leur utilisation dans l'industrie d'après leur teneur en phosphore, et en particulier on a l'habitude de considérer :

1° Les *minerais* très peu phosphoreux ou *pratiquement sans phosphore*, employés à la fabrication des *fontes fines* ou *fontes hématites*; Leur teneur en phosphore ne doit pas dépasser 0,035% c'est-à-dire 35 gr. pour 100 kg. de minerai ;

On emploie aussi pour les fontes de moulage, des minerais contenant moins de 0,15 de phosphore, soit 150 gr. pour 100 kg. de minerai;

2° Les *minerais moyennement phosphoreux* contiennent jusqu'à 0,50 % de phosphore, soit 500 gr. pour 100 kg. de minerai et servent à la fabrication des *fontes* dites *Cleveland*;

(1) Nous mettons de côté le sulfure de fer pur ou pyrite qui est un minerai de soufre. S'il fallait griller la pyrite uniquement pour l'utiliser comme minerai de fer, l'opération ne serait pas économique, car le grillage doit être poussé très loin pour éliminer le plus de soufre possible.

Au contraire, normalement la pyrite est grillée pour obtenir l'anhydride sulfureux (combinaison du soufre et de l'oxygène), lequel combiné à l'oxygène et à l'eau donne l'acide sulfurique ou vitriol dont les applications industrielles sont innombrables. Le déchet de cette fabrication est employé comme minerai de fer.

Le fer de la pyrite s'oxyde et donne un résidu pulvérulent connu sous le nom de cendre de pyrite. Mais cette matière, bien que riche en fer, a de graves inconvénients : tout d'abord il y reste encore une quantité de soufre assez grande 1 ou 1 1/2 % et même 2 %, d'autre part elle est pulvérulente.

On est donc souvent obligé d'en faire des briquettes, ce qui augmente le prix d'emploi de la matière.

Enfin si la pyrite de fer est mélangée à de la pyrite de cuivre, ce qui est fréquent, la cendre de pyrite contient du cuivre très nuisible. Ces pyrites cuivreuses ne peuvent être utilisées que si elles ont subi un décuivrage, à moins que la teneur en cuivre ne soit pas très élevée.

(2) C'est cette évolution dans la Sidérurgie qui a permis d'utiliser l'énorme masse de minerais phosphoreux de l'est de la France (minettes), ainsi que ceux de l'ouest (Normandie et Anjou) qu'on commence seulement à exploiter.

Cependant les fontes à teneur très faible en phosphore sont toujours très appréciées car elles sont utilisées soit pour la fabrication de certains aciers fins, soit pour la fonderie.

On les caractérise souvent sous le nom de fontes au bois ou fontes de Suède — car il existe en Suède quelques minerais à très basse teneur en phosphore et qui sont fondus à l'aide du charbon de bois qui ne contient pas de phosphore pratiquement.

3° Enfin les *minerais phosphoreux* contiennent au-dessus de 0,5% de phosphore, jusqu'à 2 et 3% soit 3 kg. par 100 kg. de minerais et servent à la fabrication des *fontes phosphoreuses*.

Ces limites n'ont rien d'absolu, puisqu'elles dépendent aussi de la teneur en fer.

Ainsi un minerais contenant 60% de fer et 0,03% de phosphore n'en tient pas plus qu'un minerais ayant seulement 0,02% de phosphore et 40% seulement de fer (1).

(1) Ci-dessous une série d'analyses de minerais de fer. Ces analyses ont été classées en plusieurs catégories : minerais siliceux, calcaires, alumineux (n'a rien d'absolu), manganesés, manganésifères et minerais de manganèse. Dans chaque catégorie le phosphore va en croissant.

Bilbois	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe	Mn	Pb	S	Cu	As	B ₂ O ₃	BaO	ZnO	Pb	P ₂ O ₅	Teneur physique		
																Poreux	% gros	
Minerais siliceux																		
1. Ossès et Banca	11,50	3,00	4,90	1,32	45,28	0,75	0,011	0,027	0,032	traces	10,80	—	—	—	—	—	Poreux	35%
2. Rubio Bilbao	12,70	1,87	1,15	4,30	55,35	1,39	0,012	0,069	—	3,70	—	—	—	—	—	d'	35%	
3. —	12,93	3,20	4,50	1,11	45,45	0,80	0,016	0,026	0,025	0,03	—	—	—	—	—	d'	25%	
4. —	10,20	3,10	0,68	0,10	53,01	0,80	0,017	traces	—	5,00	—	—	—	—	—	d'	50%	
5. Minéral d'Almeria	13,00	2,80	0,99	0,14	50,16	0,70	0,023	traces	—	7,60	—	—	—	—	—	d'	50%	
6. Rubio d'Espagne	18,72	3,20	0,40	0,20	46,31	0,80	0,027	0,013	traces	7,00	—	—	—	—	—	d'	10%	
7. Minéral de Santander	19,90	3,60	0,84	0,10	48,50	0,80	0,034	traces	—	6,60	—	—	—	—	—	d'	25%	
8. —	22,40	3,30	1,61	0,50	42,83	0,75	0,034	0,009	0,005	traces	10,80	—	—	—	—	Non poreux	25%	
9. —	5,19	0,10	0,10	0,59	57,54	0,24	0,064	0,064	0,02	9,00	—	—	—	—	—	d'	35% nodules	
10. Moyen	13,47	0,60	0,10	0,20	46,40	1,84	0,170	0,048	0,01	0,29	10,40	—	—	—	—	Très compact	10%	
11. Suède (Kiruna)	1,90	1,00	traces	0,25	67,35	0,58	0,267	0,007	0,01	traces	1,60	—	—	—	—	Poreux	60%	
12. Minette de Faux	0,9	6,5	3,7	29,00	0,7	0,5	0,10	—	—	8,00	—	—	—	—	—	d'	80%	
13. Cleveland	17,10	7,81	8,70	1,12	32,95	0,67	0,425	0,021	—	0,5	—	—	—	—	—	d'	30%	
14. Carbonaté grillé normand	15,0	6,50	2,25	1,25	48,50	0,10	0,73	0,22	—	2,0	—	—	—	—	—	Très compact	60%	
15. Moyen	14,8	6,25	2,00	1,20	39,8	0,10	0,6	0,20	—	18,5	—	—	—	—	—	—	—	
Minerais calcaires																		
1. Minéral d'Aguilas	5,05	1,60	8,75	2,33	46,04	1,55	0,014	traces	—	—	3,00	—	—	—	—	—	Poreux	80%
2. Minéral d'Arzew	2,85	0,84	23,60	2,22	32,43	0,80	0,014	0,029	0,01	traces	4,20	—	—	—	—	—	d'	40%
3. Minéral de Thierma	9,05	1,30	10,00	0,74	41,16	2,68	0,018	0,041	0,123	0,07	2,35	—	—	—	—	—	d'	40%
4. — de Tafna	3,78	1,47	16,40	2,59	38,66	1,20	0,024	0,014	0,01	traces	2,76	—	—	—	—	—	d'	35%
5. —	6,20	2,20	12,40	0,81	43,13	1,35	0,033	0,02	traces	3,50	—	—	—	—	—	—	d'	50%
6. d'Arzew	2,47	0,84	22,00	2,22	33,74	1,90	0,033	0,014	0,01	d'	3,00	—	—	—	—	—	d'	45%
7. — de Tafna	7,35	0,50	15,00	0,88	40,44	1,20	0,04	0,06	0,008	d'	1,70	—	—	—	—	—	d'	40%
8. Minette de Pierre (Est)	6,35	4,28	14,5	2,25	36,6	0,9	0,756	0,014	—	8,00	—	—	—	—	—	—	d'	50%
9. Minette d'Alboue (Est)	6,60	6,84	11,80	1,16	37,2	0,08	0,44	0,054	—	19,1	—	—	—	—	—	—	d'	50%
10. Minéral de Suède (Kiruna)	2,12	0,84	8,60	0,88	56,25	0,20	3,08	—	0,01	traces	0,68	—	—	—	—	—	Très compact	60%
Minerais alumineux																		
1. Minéral de Locryde	7,07	14,30	0,20	0,22	47,74	1,16	0,016	0,014	traces	0,01	8,00	—	—	—	—	—	Compact	25%
2. Minéral de Santander	3,55	4,80	0,20	0,10	54,46	0,60	0,028	0,124	0,010	traces	11,60	—	—	—	—	—	Poreux	5%
3. —	3,25	5,50	0,20	0,29	57,02	0,90	0,042	0,035	0,01	traces	10,40	—	—	—	—	—	d'	5%
4. —	3,40	4,10	0,10	0,19	56,60	0,88	0,045	0,082	0,01	0,01	9,84	—	—	—	—	—	d'	5%
5. —	9,61	5,60	0,10	0,18	49,76	2,54	0,109	0,048	0,01	traces	10,20	—	—	—	—	—	d'	5%
Minerais mangantésés																		
1. Minéral Grammatico	3,13	0,80	9,40	0,59	49,33	3,05	0,015	0,026	0,035	traces	8,44	—	—	—	—	—	Poreux	40%
2. — de Betres	7,78	3,60	0,10	0,20	51,19	3,40	0,022	0,013	0,01	traces	3,26	—	—	—	—	—	d'	60%
Minerais manganésifères																		
1. Minéral de Bilbao	10,51	0,71	2,38	1,33	49,92	6,20	0,016	1,15	0,044	traces	—	—	—	—	—	—	Poreux	30%
2. — de Carthagène	10,93	2,30	1,20	0,60	40,50	6,75	0,026	0,089	0,014	0,012	13,20	—	—	—	—	—	d'	30%
3. —	8,65	1,88	2,49	0,59	39,08	8,35	0,026	0,138	0,025	traces	9,84	—	—	—	—	—	d'	25%
4. —	13,78	3,64	1,99	1,18	31,70	11,07	0,029	0,152	0,02	0,057	15,78	—	—	—	—	—	d'	25%
Minerais de manganèse																		
1. Minéral du Brésil	9,17	10,05	traces	0,14	40,6	40,73	0,026	0,01	0,038	traces	7,36	—	—	—	—	—	Poreux	60%
2. — des Indes	3,26	6,80	0,10	0,26	14,00	40,42	0,038	0,055	0,015	0,012	1,60	—	—	—	—	—	Compact	80%
3. — de Las Cabesses	8,00	11,24	1,60	2,00	43	0,05	0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Poreux	90%
4. — de Mysore	8,06	1,05	0,50	0,70	12,22	41,33	0,059	0,007	0,029	traces	8,00	—	—	—	—	—	Compact	90%
5. — d'Huelva	19,86	0,10	0,40	2,03	42,48	0,079	0,025	traces	traces	0,50	—	—	—	—	—	—	d'	90%
6. — de Nicoláev	14,25	4,30	1,50	1,11	1,41	44,29	0,264	0,055	0,015	traces	10,30	—	—	—	—	—	Poreux	d'

Quant aux autres impuretés, telles que l'arsenic, le cuivre, le plomb, le zinc, etc... nous indiquerons plus loin leurs inconvénients ⁽¹⁾.

Les minerais doivent être en morceaux, poreux, ils ne doivent pas s'écraser. Les raisons en seront plus longuement exposées dans le

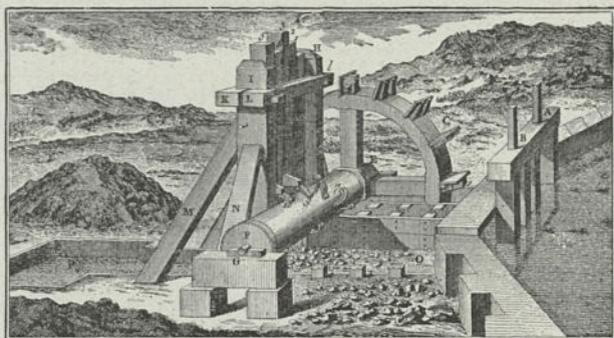


FIG. 42.

BOCARDAGE DU MINÉRAI DE FER.

Le bocard qui sert à concasser les blocs de minerai est mû par un moyen d'une roue hydraulique C.

prochain chapitre, mais nous pouvons déjà laisser entendre que c'est pour permettre le passage des gaz.

Enfin l'humidité nécessitant du charbon pour son élimination, on doit exiger le moins possible d'eau ⁽²⁾.

- (1) L'arsenic rend le fer cassant.
 Le cuivre empêche la soudure de l'acier.
 Le plomb empêche le grain dans la fonte.
 Le zinc est nuisible au haut fourneau.
 Le chrome peut être utilisé dans certaines conditions.
 Le titane a été très controversé, mieux vaut l'éviter.

(2) La question de l'humidité dans les minerais est extrêmement complexe à cause de ses conséquences. Supposons un minerai très poreux susceptible d'absorber 10 ou même 15% d'eau à certaines périodes de l'année (comme le minerai rubio de Sommorostro). Il en résulte que lorsqu'on reçoit à l'usine 1.000 kg. de minerai, on a reçu en réalité 850 kg. de minerai sec et 150 kg. d'eau pour lesquels on paie le transport en particulier.

A supposer qu'on n'envisage pas la question de poids, mais celle de teneur en fer, si celle-ci est de 50 % dans le minerai sec, cela signifierait que 1.000 kg. de minerai renferment 500 kg. de fer pur. Comme en fait on n'a reçu que 850 kg. de minerai sec (à cause de l'eau) on n'a en réalité que 425 kg. de fer pur au lieu de 500.

En faisant le raisonnement différemment on voit que 425 kg. de fer correspondent à 1.000 kg. de minerai, soit 42,5 % seulement et non 50 %.

La teneur de 50 % est ce qu'on nomme la teneur du minerai à l'état sec (on l'obtient en faisant l'analyse du minerai desséché à 100°).

La teneur de 42,5 % correspond à la teneur du minerai à l'état naturel. On l'obtient en réduisant la teneur à l'état sec proportionnellement à la quantité d'eau contenue dans le minerai.

Ici la teneur en eau étant 15%. Sur 100% de minerai on n'a que 85% minerai sec et l'on a :

$$\text{teneur à l'état naturel} = 50 \times \frac{85}{100}$$

La teneur en eau se détermine en cherchant le poids perdu par une certaine quantité (4 ou 5 kg.) du minerai quand on le chauffe à 100°.

Quant à la question des prix d'achat des minerais, il y a lieu de faire intervenir toutes les considérations précédentes et plus particulièrement les nécessités d'emploi ⁽¹⁾. Comme les différentes conditions que nous venons d'énumérer ne sont pas toujours réunies, on a employé de tous temps des procédés permettant d'améliorer les minerais avant leur emploi au haut fourneau.

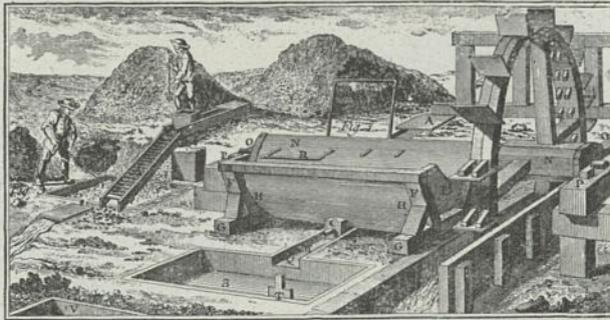


FIG. 43.

LAVAGE DU MINÉRAI DE FER
 PROCÉDE ANCIEN : PATOUILLET ET EGRAPOIR.

1 est le patouillet qui brasse le minéral au moyen des pièces R fixées sur l'arbre tournant N, dans une grande cuve pleine d'eau HH. — Dans l'égrapoir 2 et 3, un courant d'eau entraîne l'argile et la terre même, et le minéral reste.

Dans les installations modernes, le patouillet est remplacé par des trommels débourbeurs.

(1) Nous avons indiqué précédemment (note 1, page 55) la façon d'acheter les minerais au moyen d'une base pour la teneur en fer et d'échelles d'augmentation ou de réduction suivant la teneur trouvée.

Un premier point à faire intervenir est l'humidité, car il y a lieu de savoir comment on comptera la teneur à l'état sec ou à l'état naturel.

On peut convenir de la compter à l'état sec, mais de déduire du poids de minéral à payer, toute l'eau qu'il contient.

On dit alors que le prix est convenu par tonne sur base de teneur à l'état sec, l'humidité étant déduite du poids à facturer.

On peut aussi vouloir fixer des limites pour d'autres éléments, silice, phosphore, soufre, etc.

On fait dans ce cas comme pour le fer en indiquant les échelles correspondantes.

Ainsi à supposer qu'on ait acheté un minéral devant avoir 50 % de fer environ, 10 à 12 % de silice, 0,015 de phosphore, 0,03 de soufre, le prix serait 18 francs sur les bases ci-après :

50 % de fer	+ ou - 0 fr. 30 par unité.
11 % silice	- ou + 0 fr. 20 par unité.
0,03 de soufre	- ou + 0 fr. 10 par 0,01
0,015 de phosphore	- ou + 0 fr. 10 par 0,005.

Ce qui signifie que pour chaque unité de fer en plus de 50 on ajoute 0 fr. 30 au prix de la tonne, pour chaque unité de silice en plus de 11 on retranche 0 fr. 20 à la tonne. — Pour chaque 0,01 de soufre en plus de 0,03, on retranche 0 fr. 10 par tonne et pour chaque 0,01 en moins on ajoute 0 fr. 10 au prix par tonne. — Pour chaque 0,005 de phosphore en plus de 0,015 on retranche 0 fr. 10 au prix, etc.

Ces bases et échelles n'ont rien d'absolu. Elles dépendent de l'emploi du minéral en question.

Ainsi, dans certains cas, on peut être amené à payer un supplément de prix pour une augmentation de teneur en phosphore (cas des minerais phosphoreux).

On peut aussi fixer des limites de refus si le minéral livré ne peut être utilisé.

Souvent on fait intervenir la nature physique du minéral : gros, grenailles, menu et poussier.

Bien entendu la nature minéralogique du minéral intervient au point de vue de la réductibilité : ainsi la magnétite est plus difficile à réduire que les hématites et plus particulièrement les hématites composées de peroxydes de fer hydratés (minerais rubios du nord de l'Espagne ou du sud de la France).

En particulier, on a cherché à augmenter la teneur en fer par un triage très soigné à la mine consistant à enlever les plus petites parcelles visibles de terres ou gangues mélangées, et aussi les morceaux de pyrite, s'il y en a, pour diminuer la teneur en soufre.

Dans certains cas, pour opérer un meilleur triage, on concasse les

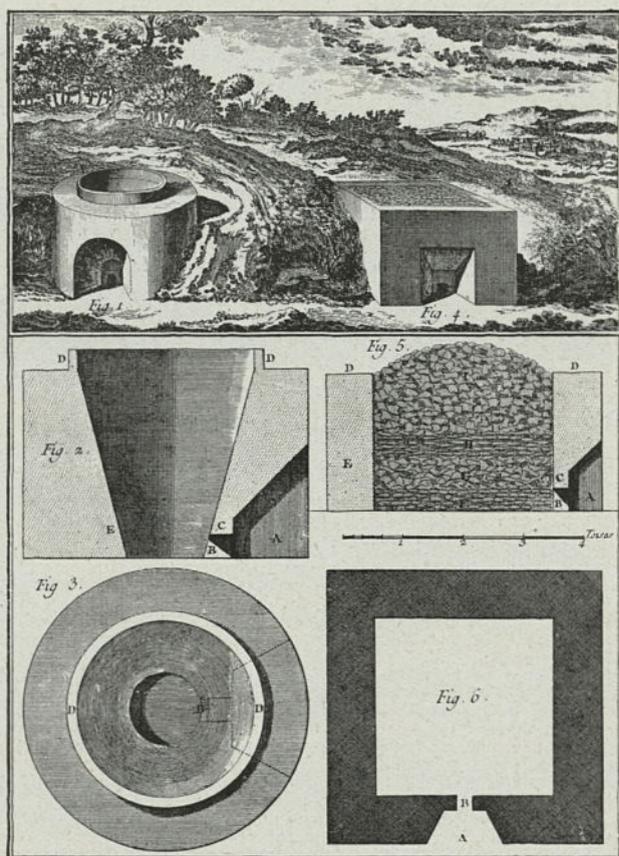


FIG. 44.

CALCINATION DU MINÉRAI DE FER (FOURS DE GRILLAGE)

A gauche four cylindrique de 3 m. de haut, non compris le mur d'appui DD. — A est l'embrasure, B, la porte. On y dispose des couches alternées de minerai et de bois en plaçant les plus gros morceaux en bas.

A droite, fourneau carré de 2^m75 de côté et 2^m15 de hauteur.

minerais afin d'apercevoir les impuretés qui peuvent s'y trouver cachées. La fig. 42, représente un appareil de concassage ancien ou bocard.

D'autre fois, on lave le minerai dans un appareil appelé « trommel », afin d'éliminer les argiles ou boues qui peuvent le souiller. La fig. 43 représente un de ces appareils du type ancien.

Il y a quelques années, on a commencé à employer une méthode de *trriage* dite *électro-magnétique*. Elle est basée sur ce que certains minerais comme la magnétite, sont attirables à l'aimant. On les sépare donc (électriquement) des terres qui les souillent, mais il faut pour cela que les morceaux soient petits ou qu'on les concasse préalablement. Cette méthode est surtout applicable aux menus et résidus d'exploitation qu'on retire facilement des stériles, au moyen du courant électrique fourni par des chutes d'eau environnantes.

Cependant les minerais, pour pouvoir donner de bons résultats au

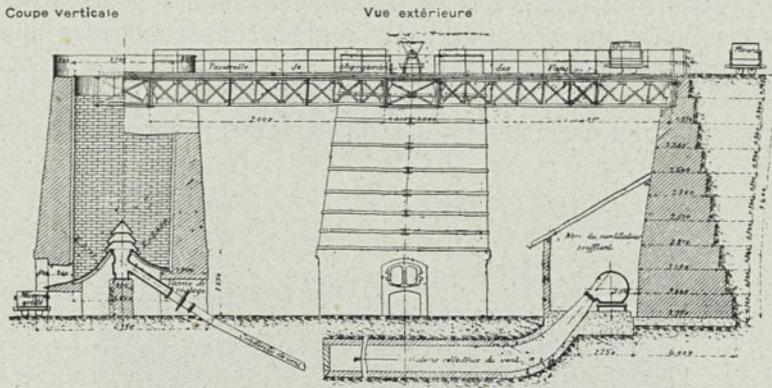


FIG. 45.

INSTALLATION D'UN GROUPE DE FOURS DE GRILLAGE
avec soufflage par ventilateur électrique pour le traitement des minerais
de fer carbonaté.

On y charge des couches alternées de minéral de fer cru et de charbon
menu (souvent de l'antracite).

Dans la coupe on voit la sole ondulée et le champignon de soufflage, où
l'air de grillage arrive par une tuyauterie piquée sur le carneau collecteur
d'air en maçonnerie.

haut fourneau, doivent être en morceaux réguliers, ni trop gros, ni trop menus, et il y a une juste limite à observer à ce point de vue.

En ce qui concerne la porosité, on grillait souvent les minerais autrefois. Actuellement cette opération ne se fait en sidérurgie que lorsqu'il s'agit de carbonates ⁽¹⁾ de fer, c'est-à-dire de minerais contenant le fer sous forme d'une combinaison de l'oxyde de fer avec le gaz carbonique. Dans ce cas le grillage fait partir le gaz carbonique et laisse l'oxyde de fer. Les avantages sont de deux sortes, d'une part le minéral est plus riche en fer, puisque le fer contenu est le même pour

(1) Dans le tableau des minerais (page 61) nous avons donné les analyses d'un minéral carbonaté de Normandie à l'état cru et après grillage.

On voit que la teneur en fer passe de 39,8% de fer avant, à 48,50% après grillage. Le poids du mètre cube de minéral en morceaux, y compris les vides, est de 2.000 à 2.200 kilogs quand il est cru, tandis que grillé il ne pèse plus que 1.500 à 1.650 kg.

un poids qui est devenu moindre, ce qui diminue les frais de transports pour une même quantité de fer, et d'autre part le minerai devient poreux, car son volume reste le même, son poids ayant diminué.

Les fig. 44 et 45 représentent des fours de grillage anciens et modernes.

Les minerais sont amenés de la mine à l'usine par des moyens très divers : tombereaux, petits chemins de fer à voie étroite, chemin de fer à voie normale, bateaux à voile ou à vapeur, transporteurs aériens, etc.

Pour ces divers transports ils sont manutentionnés soit à la main, soit à la pelle, soit au moyen d'appareils automatiques, grues, bennes, dragueuses, etc., qui constituent des organes importants des mines, gares, ports ou usines.

Nous ne pouvons entrer dans le détail de ces divers appareils, dont on verra des exemples fig. 65, 66, 70. Mais il importe de savoir

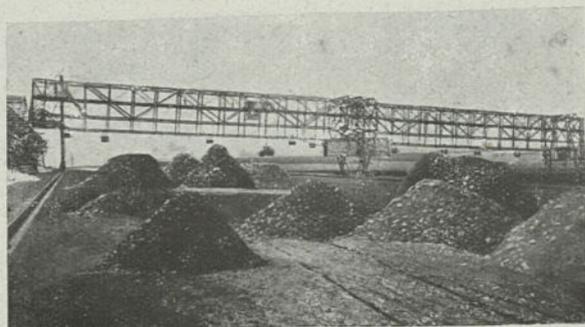


FIG. 46.
MISE EN STOCK DES MINERAIS
(GRUE A LONGUE PORTEE).

Cet appareil permet la prise en wagons ou en vapeurs et la mise en tas et la reprise au moyen de bennes dragueuses. Ce qui donne le maximum de rapidité pour le minimum de main-d'œuvre.

que toutes ces opérations doivent tendre à ne pas pulvériser le minerai, à être rapides et étudiées de façon à être peu coûteuses.

Dans l'usine même, le minerai doit pouvoir être mis en dépôt et repris rapidement avec le minimum de frais.

Ces mises en dépôt sont nécessaires, les hauts fourneaux étant à marche régulière et ininterrompue et les arrivages pouvant être irréguliers, soit à cause d'encombrement ou d'irrégularités sur le chemin de fer ou à la mine, soit à cause du type de transport choisi, en particulier s'il s'agit de vapeurs.

Ces dépôts se font soit en tas, au moyen de grues ou d'appareils perfectionnés analogues à ceux de la fig. 46, soit en estacades confor-

mément à la fig. 47, lorsqu'ils arrivent directement de la mine par trains, soit en trémies qui sont des installations coûteuses mais qui permettent une reprise facile et tiennent le minerai à l'abri.

Dans certains cas, les tas, estacades et trémies, sont des réserves qui ne servent pas et le minerai employé journallement vient dans des bennes chargées à la mine même ou au port, posées sur des wagons et pouvant être directement déversées au haut fourneau.

Ce dernier procédé réduit au minimum les manutentions et donne ainsi peu de déchets par pulvérisation.

Ces mises en stock et reprises doivent tenir compte des nécessités d'emploi, dans le cas, par exemple, où l'on emploie plusieurs sortes de

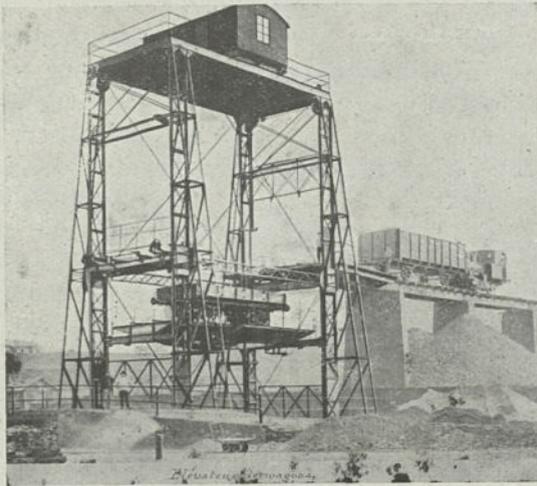


FIG. 47.
MISE EN STOCK DES MINÉRAIS.
(ELEVATEUR DE WAGON)

Lorsque les voies ne sont pas disposées de façon à arriver en pente douce directement au niveau des estacades figurées sur la droite de cette photographie, un élévateur, figuré à gauche, monte les wagons au niveau supérieur pour en opérer le déversement.

minerai qu'on doit pouvoir mélanger en toutes proportions, comme il sera expliqué ultérieurement (fig. 101-103).

La question des manutentions, mises en stock et reprise, dans les usines sidérurgiques, est un problème extrêmement complexe à cause des grosses quantités en jeu ⁽¹⁾.

(1) Un haut fourneau de 100 tonnes (c'est-à-dire produisant 100.000 kg. de fonte par jour) nécessite la manutention de 350 à 500.000 kg. de matières par jour :
Minerai 200 à 300.000 kg. suivant teneur en fer
Fondant 20 à 50.000 kg.
Houille 150 à 170.000 kg.

Or il y a des usines fabriquant dix fois plus et même davantage de fonte par jour.

Aussi est-elle tout spécialement résolue pour chaque cas: *minerais* en roches ou en menus, *minerais spéciaux*, castine ou erbue, *charbons* tout venant et en menus *pour coke*, et *charbons* en morceaux pour gazogènes ou fours, *coke*, chaux, dolomie, *briques* réfractaires ou ordinaires, ferrailles, etc.

Nous indiquerons pour chacune de ces matières les précautions à prendre et les dispositifs pour avoir des dépôts et des reprises faciles et peu coûteuses, sans nuire aux conditions d'emploi.

RESUME DU CHAPITRE IV

On appelle minerai de fer toute substance minérale pouvant être employée économiquement pour en retirer le fer qu'elle contient. Un minerai de fer doit avoir une teneur en fer supérieure à 28 ou 30%. Les terres ou gangue qui l'accompagnent doivent être facilement fusibles et non combinées avec lui. Il ne doit pas contenir d'éléments nuisibles tels que le soufre, le phosphore, l'arsenic, le cuivre, le plomb, le zinc. Il doit être en morceaux, poreux, ne pas s'écraser facilement, peu humide et peu coûteux. Si les gangues sont combinées au minerai on perd du fer dans la réduction.

Les mélanges de plusieurs éléments, silice, alumine, chaux et magnésie, fondent plus facilement qu'un seul.

Si un minerai a des gangues ne contenant pas assez de l'un des éléments, on peut le corriger en ajoutant un fondant, c'est-à-dire un corps qui contient les éléments qui manquent pour rendre la gangue fusible.

Les fondants couramment employés sont le fondant calcaire ou castine, et le fondant siliceux ou erbue.

Il est préférable de mélanger deux ou plusieurs minerais de types différents, de façon à obtenir une gangue fusible sans addition de fondant.

Le soufre est très nuisible, car il rend le fer rouverin ou cassant à chaud. Il faut donc éliminer les minerais très sulfureux bien qu'on puisse enlever une partie du soufre en opérant un grillage préalable du minerai qui transforme le sulfure en oxyde de fer et laisse échapper le soufre sous forme de gaz sulfureux.

Une partie du soufre du minerai est éliminé au haut fourneau et passe dans le laitier.

Le phosphore du minerai de fer se retrouve entièrement dans la fonte.

Donc pour obtenir des fontes sans phosphore appelées aussi fontes fines ou fontes hématites, il faut des minerais contenant très peu de phosphore.

On a classé les minerais de fer d'après leur teneur en phosphore ; en minerais purs, ceux qui en contiennent très peu, moins de 0,035% ;

en minerais moyennement phosphoreux, ceux en contenant jusqu'à 0,5%, et en minerais phosphoreux, ceux qui contiennent plus de 0.5% et atteignent jusqu'à 2 et 3% de phosphore.

Les fontes phosphoreuses peuvent être débarrassées du phosphore lorsqu'on les transforme en acier.

Ceci est très important, car le phosphore rend les aciers ou fers cassants à froid.

Les minerais sont triés à la mine pour les séparer des gangues, ils sont lavés, concassés dans certains cas, grillés si ce sont des carbonates. Parfois aussi on opère un triage électro-magnétique.

Les minerais sont manutentionnés et transportés par des moyens très variés: à la main, par grues, ponts roulants, bennes-dragueuses, etc., par chemin de fer, canaux, par mer, etc.

A l'usine ils sont mis en stock en tas, dans des estacades, dans des trémies etc.

On met aussi en stock les autres matières utilisées en sidérurgie, par exemple le fondant, le minerai de manganèse, la chaux, la dolomie, les briques réfractaires, etc.

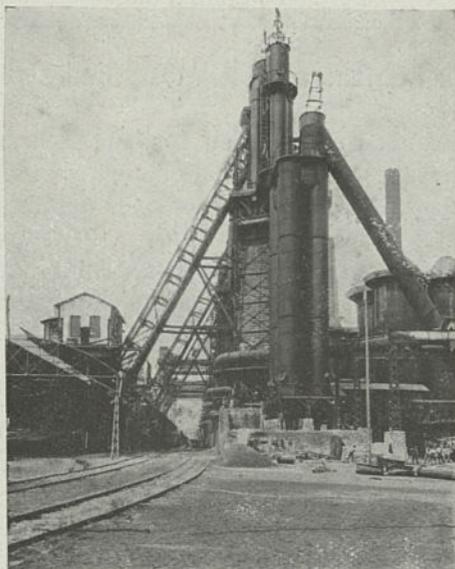


FIG. 48.

TYPE DE HAUT FOURNEAU MODERNE

On aperçoit à gauche le monte-charge incliné ou skip, en avant la prise de gaz et une série de tuyaux pour l'épuration, à droite les appareils Cowper pour le chauffage du vent reconnaissables à leur coupole. Le briquetage et le cerclage sont visibles à travers la charpente ajourée et très accessibles.

CHAPITRE V

Le haut fourneau ou appareil producteur de fonte, sa forme, sa construction, sa conduite.

Le haut fourneau est, à l'heure actuelle, le point où convergent tous les procédés de fabrication du fer et de l'acier.

La raison de cette tendance s'explique par ce fait que l'obtention directe du fer et de l'acier est, présentement, moins économique que par la méthode indirecte du haut fourneau.

Et quand bien même le four électrique donnerait tout ce qu'on en attend, il est probable que le haut fourneau restera encore l'appareil idéal de production de la fonte destinée aux fondeurs pour le moulage.

Nous avons vu dans le second chapitre le principe du haut fourneau, rappelons-le en quelques mots.

Dans une grande cavité on charge, par la partie supérieure, des lits alternés de charbon, de minerai de fer et de fondant.

Vers la partie inférieure on insuffle de l'air servant à la combustion d'une partie du charbon qui chauffe toute la masse des matières chargées.

Le minerai de fer est réduit et le fer obtenu s'unit à un excès de

charbon pour former la fonte, fusible à température relativement basse (1.200°).

La gangue du minerai s'unit au fondant pour former un corps fusible à la température de l'intérieur de l'appareil : le laitier.

Ce dernier corps est beaucoup plus léger que la fonte et surnage sur elle comme l'huile sur l'eau.

Il s'ensuit que les produits obtenus sont très nettement séparés, en couches superposées par ordre de densité, à la partie inférieure du creuset, d'où on les laisse s'écouler par des trous situés à des niveaux différents.

Signalons aussi que l'air insufflé pour la combustion, donne avec le charbon des gaz qui, après certaines transformations sur lesquelles nous reviendrons, s'échappent à la partie supérieure du fourneau.

Cet appareil — selon les circonstances locales et les matières premières qui l'alimentaient — a subi des transformations nombreuses.

Constitué d'abord par de gros massifs de maçonnerie, espèces de tours contenant une cheminée dans laquelle on exposait le minerai à l'action du combustible, c'est peu à peu que cet appareil est devenu semblable à ceux représentés (*fig. 13*) où l'on voit apparaître déjà les éléments essentiels des fourneaux contemporains.

Profil. — Les considérations logiques, qui ont conduit à l'adoption de la forme actuelle, peuvent se résumer comme suit :

En premier lieu, la forme ronde, en coupe horizontale, est presque exclusive, parce qu'elle favorise sa construction et la régularité dans la descente des matières et l'insufflation du vent.

On donna au profil la forme cylindrique (*fig. 49*). Mais les élévations successives qui furent faites firent apparaître certains inconvénients, parmi lesquels l'écrasement de la charge. On essaya d'y remédier par un rétrécissement vers la base (*fig. 50*), puis par un rétrécissement au sommet (*fig. 51*) : l'un permettait la formation d'une voûte qui soulageait la partie inférieure ; l'autre laissait à l'air un passage plus libre.

Ces deux moyens furent cause d'un nouvel embarras dans la diffusion du vent. On le surmonta en combinant les deux procédés dans la forme (*fig. 52*) qui a été conservée pendant longtemps pour les minerais facilement réductibles.

La partie la plus large de ce profil — ventre — était augmentée lorsqu'on avait à traiter des minerais fusibles et qu'on disposait d'une forte machine soufflante (*fig. 53*); on la diminuait avec une machine faible et pour les minerais réfractaires (*fig. 54*).

Mais la pratique démontra que pour réduire encore l'effet d'écrasement et mieux traiter des minerais réfractaires au moyen du coke, il fallait abaisser encore le ventre du profil et rétrécir le point où s'opère la fusion (*ouvrage*). Cette considération conduisit à la création des *étalages* (*fig. 55 et 56*).

Ceux-ci étaient considérés comme indispensables pour les minerais pauvres et réfractaires ou pour la fusion au coke. On admettait

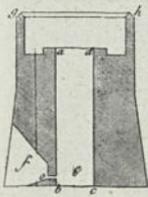


FIG. 49.

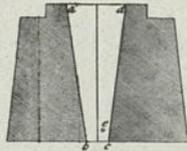


FIG. 50.

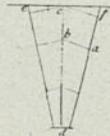


FIG. 51.

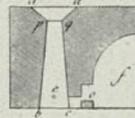


FIG. 52.

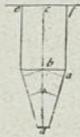


FIG. 53.

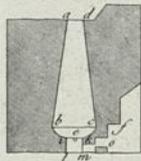


FIG. 54.

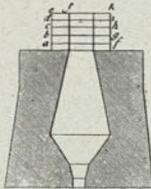


FIG. 55.

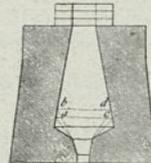


FIG. 56.

Dans ces différentes figures 1 est le trou de laitier ad le gueulard. La fig. 55 de droite montre le rétrécissement du ventre qui passe à la largeur ac puis bd. La fig. 56 montre le ventre ml, les étalages mi et kl, l'ouvrage iuvk et le creuset a. On voit aussi sur cette figure l'usure des étalages en marche de sorte que la forme se rapproche de celle de la figure 54 correspondant aux minerais difficilement réductibles.

même que si les minerais fusibles et riches pouvaient être traités dans des fourneaux sans ouvrage, pour des fontes courantes, il était préférable d'avoir des étalages pour la fonte grise de moulage.

De telle sorte que le profil complet d'un haut fourneau comprend le gueulard, la cuve, le ventre, les étalages, l'ouvrage et le creuset avec ses trous de coulée de la fonte et du laitier.

Nous venons de faire comprendre que le profil d'un haut fourneau est en relation directe avec les minerais et le charbon traités, la puissance des machines soufflantes et la nature de la fonte à produire.

Cette question est beaucoup moins importante à l'heure actuelle. On construit, en effet, des machines de puissance variable, on sait combiner les éléments de la charge, les adapter à la fonte à obtenir et enfin utiliser — grâce à cette technique — des hauts fourneaux de profils déterminés, à l'emploi de matières premières, ainsi qu'au rendement de produits très variables.

Il n'est pas moins vrai que pour un minerai déterminé, un charbon

d'une certaine nature et une production journalière fixée d'avance ⁽¹⁾, d'une fonte donnée, il y a un profil ⁽²⁾ qui est le plus convenable,

(1) La production journalière des hauts fourneaux dépend dans une certaine mesure de leur capacité ou cube du vide intérieur. Ce cube varie lui-même avec la nature du charbon, la richesse du minerai, etc.

Pour pouvoir comparer différents fourneaux on a déterminé dans différents cas la capacité nécessaire pour produire une tonne de fonte par 24 heures. On a ainsi reconnu que ce chiffre varie de 1 m³ 5 à 3 m³ 5 par tonne de fonte, pour les appareils actuels, et qu'il a atteint parfois 6 à 7 mètres cubes pour les hauts fourneaux au bois.

(2) Le volume d'un haut fourneau étant déterminé (par exemple d'après sa production journalière et la nature des minerais et charbons qu'il emploie) peut être réalisé de différentes manières dont les modalités constituent l'étude du profil du haut fourneau.

Grüner après un examen approfondi d'une série de hauts fourneaux a établi une classification basée sur la valeur du rapport $\frac{H}{Dv}$ de la hauteur totale (H) au diamètre de la partie la plus large ou ventre du haut fourneau (Dv).

Ceux pour lesquels le rapport $\frac{H}{Dv}$	est inférieur à 3	sont dits <i>trapus</i>
— — — — —	$\frac{H}{Dv}$ est compris entre 3 et 4	— <i>moyens</i>
— — — — —	$\frac{H}{Dv}$ est supérieur à 4	— <i>élancés</i>

Actuellement, pour les fourneaux au coke — oscille de 3, 2 à 4, la hauteur moyenne étant 20 à 25 mètres et le diamètre au ventre 5 à 6 m. 50. Pour les hauts fourneaux au charbon de bois — est compris entre 4 et 7.

Le diamètre du gueulard est pris égal aux deux tiers, aux trois quarts ou aux cinq sixièmes du diamètre au ventre.

Celui de l'ouvrage est au minimum $\frac{Dv}{2}$ et varie de Dv à $\frac{Dv}{2}$ et la hauteur correspondante dépasse rarement Dv d'un mètre à partir du fond du creuset.

Quant au creuset, ses dimensions dépendent de la production et son diamètre à peu près semblable à celui de l'ouvrage dépasse rarement 4 m. Sa hauteur varie de 1 m. 50 à 2 m. 50.

Ajoutons que les étalages sont souvent caractérisés par leur angle avec l'horizontale qui varie de 75 à 80° 70° étant minimum, et que leur hauteur atteint au maximum le diamètre au ventre, le minimum étant supérieur à la moitié (0,6 Dv).

On caractérise aussi souvent le diamètre du gueulard en s'assignant un angle de 86 à 88° pour la paroi de la cuve avec l'horizontale.

Disons enfin que les tuyères à laitier sont placées aux deux tiers de la hauteur correspondant aux tuyères à vent.

Le tableau ci-dessous donne pour une série de hauts fourneaux des chiffres caractéristiques correspondants aux notes 1 et 2.

Numéros d'ordre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Production du haut fourneau en tonnes (1.000 kg.) par 24 heures	20	30	50	80	95	160	160	160	180	200	250	300	330	400	400	475	500
Nature du charbon employé.	charbon de bois	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke	coke
Richesse du lit de fusion en % de fer	45	33	30	48	32	45	40	32	32	57	37	58	48	52	60	52	50
Volume utile du haut fourneau en mètres cubes par tonne produite en 24 heures	2,9	3,3	2,9	4,05	3,5	2,7	3,25		2,15	1,08	2,32	1,50	1,5	1,25	1,40	1,25	1,4
Volume total utile du haut fourneau en mètres cubes	58	100	145	324	330	275	520		375	216	580	444	500	510	560	600	700
Hauteur totale utile du haut fourneau (H) en mètres	15,80		14,70	24,00	21,70	17,90	22,00	19,50	21,00	18,00	23,80	21,00	24,00	23,00	24,00	24,50	25,50
Diamètre au ventre (Dv) en mètres			4,50	6,90	5,70	5,50	6,25	6,25	6,00	4,70	6,75	6,25	6,90	6,25	6,50	6,55	6,70
Rapport (H/Dv)			3,3	3,5	3,8	3,6	3,5	3,15	3,5	3,85	3,5	3,35	3,5	3,7	3,7	3,75	3,8
Diamètre au gueulard (dg) en mètres			2,80	4,80	4,00	3,60	4,75	4,75	4,50	3,20	4,40	4,60	4,80	4,25	4,75	4,85	5,00
Diamètre du creuset (dc) en mètres			1,80	2,40	2,15	2,80	3,00	3,00	3,50	3,20	4,00	3,50	3,30	4,10	4,00	4,55	4,25
Hauteur du creuset (hc) en mètres			1,60		1,20	1,55	1,50	1,50		2,60	2,50	2,60		2,65	3,35	3,20	3,15
Angle des étalages (α) en degrés						74		76			73,50						
Angle de la cuve (β) en degrés						85,25		86			85,40						

c'est-à-dire qui donne le maximum de production pour le minimum de dépenses, et, en particulier, pour le minimum de consommation de charbon.

Ce profil synthétique résulte, pour partie, de calculs, et d'autre

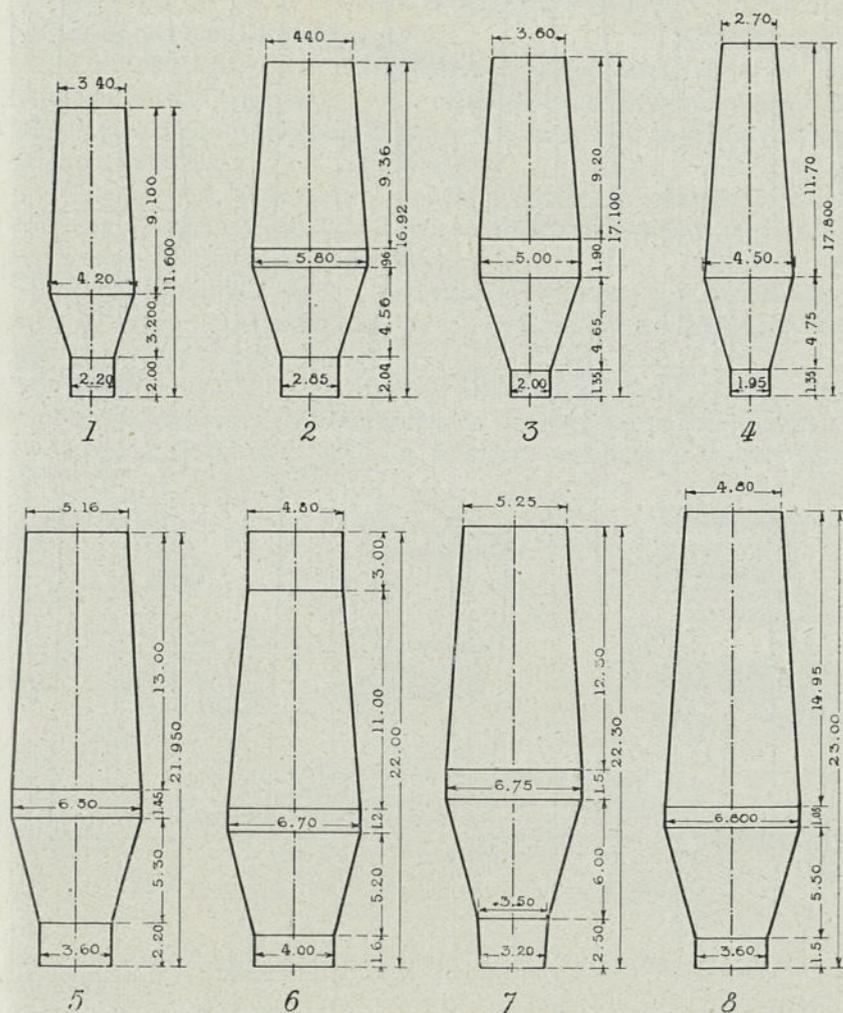


FIG. 57.

PROFILS DE HAUTS FOURNEAUX PRODUISANT DE LA FONTE HEMATITE.

Numéro et Désignation ..	1 Ff	2 PJ	3 Df	4 Bf	5 Tf	6 Mu	7 Gu	8 Du
Prod. en T/24 heures ..	70	120			100	400	475	508
Cube en m ³	145	300			275	510	600	700
% fer du lit de fusion ..	32 %	45 %			45 %	52/54	52/54	

f) Français .

u) U. S. A.

part d'observations de fourneaux ayant fonctionné dans des conditions comparables.

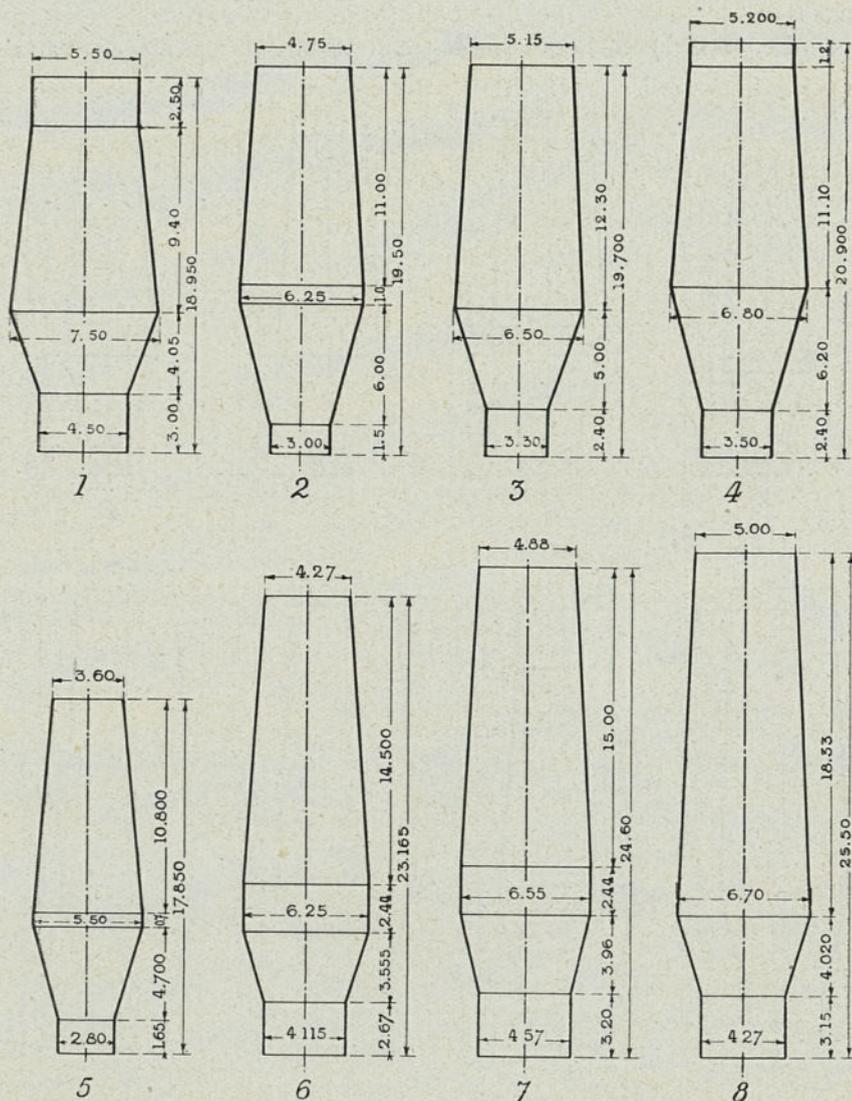


FIG. 57 BIS.

PROFILS DE HAUTS FOURNEAUX PRODUISANT DE LA FONTE THOMAS.

Numéro et Désignation ..	1 Va	2 Ba	3 Hf	4 Dl	5 Pf	6 Ha	7 If	8 Cb
Prod. en T/24 heures ..	200	160	175	175	200	250	120	220
Cube en m ³							550	
% fer du lit de fusion ..	32	31		30		42	33	31
	a) Allemagne	b) Belgique		f) France		l) Luxembourg		

Ainsi, les hauts fourneaux servant à la production de la fonte Thomas, au moyen des minettes lorraines, ont des profils très voisins des uns des autres, et une production de 130 à 160 tonnes par 24 heures pour les plus économiques.

Au point de vue de l'enveloppe extérieure, le haut fourneau a eu des variations plus étendues encore.

Elles ont d'abord été sensibles sur la maçonnerie énorme du haut fourneau dont la résistance n'était cependant pas à l'épreuve des dilatations dues aux différences de températures très grandes entre l'intérieur et l'extérieur.

D'autre part, des murailles aussi massives, laissent difficilement évaporer l'eau employée à la fabrication des mortiers. Il en résultait des fissures à la mise en route.

Enfin, l'inconvénient le plus grave venait des dégradations de la cuve, et même des percées de métal dont on s'apercevait trop tard pour pouvoir y remédier.

Construction et briquetage. — Présentement, on dégage l'ensemble des maçonneries réfractaires, de façon qu'on puisse les surveiller de très près (fig. 48 et 99). On les sépare en plusieurs parties qu'on

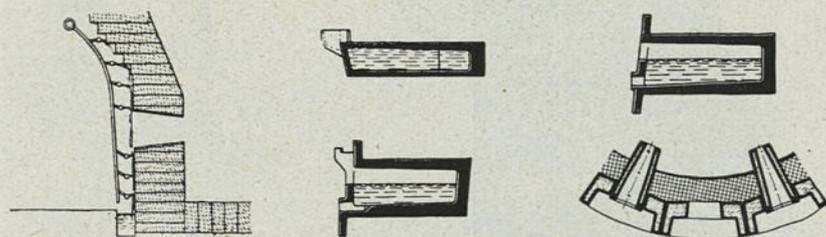


FIG. 58.

REFROIDISSEMENT DES HAUTS FOURNEAUX

A gauche refroidissement de la maçonnerie réfractaire par arrosage direct des briques. Au milieu et à droite trois types de briques ou pièces creuses en fonte ou bronze et disposées de distance en distance dans la maçonnerie de la cuve, des étalages ou même du creuset. A droite et en bas, une portion de creuset avec refroidissement continu par tympes comportant ou non des tuyères. Un courant d'eau traverse ces pièces creuses d'une façon constante et refroidit l'ensemble de la maçonnerie.

rend indépendantes pour permettre leurs dilatations respectives et relatives.

Enfin et surtout, on s'efforce d'approprier les différents matériaux et leurs dimensions ⁽¹⁾ aux réactions chimiques qui se passent à l'inté-

(1) Les épaisseurs des maçonneries des hauts fourneaux oscillent entre

600 et 900 mm. pour les parois de la cuve,
500 et 700 mm. pour les parois des étalages,
600 mm. pour les parois de creuset de petits fourneaux produisant 50 à 75 T.
1.000 et 1.500 mm. pour les fourneaux à grosse production ;
enfin, pour la sole, l'épaisseur varie de 1.000 pour les petits à 2.500 mm. pour les plus gros.
Les briques employées sont ou de très grosses pièces de 150 à 250 mm. d'épaisseur et jusqu'à 800 mm. ou 1 mètre de longueur, ou des briques moyennes de 75 à 100 mm. d'épaisseur et 250 à 400 mm. de longueur.

rieur de l'appareil ainsi qu'aux efforts mécaniques qu'ils doivent subir. Ainsi, la cuve est constituée en matériaux réfractaires résistant par destination aux frottements et aux agents mécaniques.

Les étalages, où la température atteint jusqu'à 1.500° , exigent une brique plus réfractaire encore. On n'arrive à les préserver d'une destruction rapide que par un refroidissement énergique au moyen d'un arrosage continu; souvent on interpose des briques creuses en fonte ou bronze (*voir fig. 58*).

Quant au creuset, qui doit résister à l'action chimique du laitier et où les briques subissent la plus haute température de l'appareil, jusqu'à 1.850° et même 1.900° , un choix de matériaux très réfractaires s'impose également.

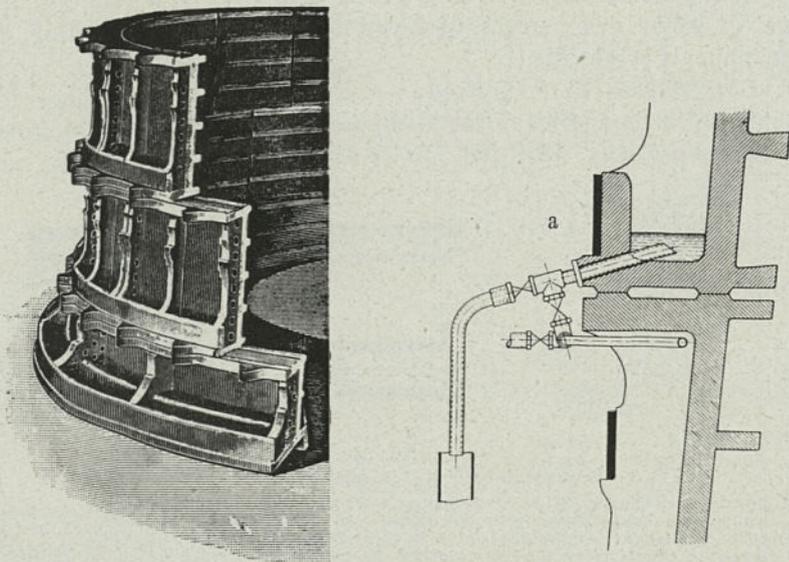


FIG. 59.

ARMATURE DE HAUT FOURNEAU EN ACIER COULÉ

Cette armature est constituée de voussoirs assemblés, avec arrosage continu suivant détail de droite. Les briques placées à l'intérieur de cette carcasse d'acier sont ainsi énergiquement refroidies et se conservent très bien. On peut aussi constituer l'intérieur au moyen d'un pisé de chrome et de goudron très réfractaire pour le creuset.

En un mot, la dilatation, les efforts dus à la charge et à la pression du vent, les actions chimiques déterminent et rendent délicate l'appropriation des matières qui constituent ces appareils.

C'est, d'ailleurs, un problème résolu dont la solution dépend de la nature des briques et plus particulièrement des moyens de refroidissement du creuset.

On emploie couramment des briques composées ⁽¹⁾ de 36 à 40 % d'alumine et 58 à 59% de silice fondant à une température de 1.800 à 1850° environ et qu'on refroidit soit par un courant d'eau énergique, en contact immédiat, comme dans la fig. 58, soit par l'intermédiaire d'un picotage (fig. 101) — série de barres d'acier juxtaposées qui augmentent la conductibilité —, soit enfin, par l'interposition d'une véritable paroi d'acier rivée ou fondue (fig. 59).

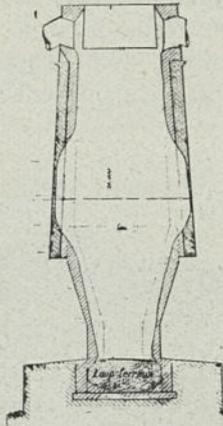


FIG. 60.

USURE DU BRIQUETAGE D'UN HAUT FOURNEAU
APRES UN CERTAIN NOMBRE D'ANNEES DE MARCHÉ

Le relevé exact des dimensions permet de rectifier le profil conformément aux constatations faites, pour une marche analogue, après reconstruction du Haut Fourneau.

Dans certains cas, on adopte pour le creuset, des briques de carbone ou d'autre matière pratiquement inattaquable par les laitiers ⁽²⁾

(1) L'analyse des éléments entrant dans la composition des briques joue un grand rôle et donne une indication précise sur leur qualité au feu. Mais ce renseignement est insuffisant car, à teneurs égales d'alumine et de silice, le point de fusion peut être différent pour des quantités infimes de matières étrangères. Aussi est-il bon d'indiquer la provenance des terres.

Ci-dessous nous donnons quelques analyses de briques et leur emploi.

	CREUSETS ET ÉTALAGES		CUVE	CREUSET	ÉTALAGES
Silice	52	59,55	62,95	58,60	59,50
Alumine	29,2	34,40	31,37	38,00	36,25
Chaux	—	—	—	0,90	0,60
Magnésie	—	—	—	0,25	0,50
Fer ou oxydes de fer	4,2	2,00	1,78	1,40	1,85
Alcalis	—	2,24	1,86	—	—
Ramollissement	—	1,700°	1,650°	—	—
Fusion	1,850°	1,800°	1,750°	1,820°	1,750°
Provenance	Bollène (Vaucluse)		Bollène	Andennes (Belgique)	

(2) Les briques de carbone ont été employées pour la première fois, en France, à Terrenoire. On a utilisé parfois des briques en mineral de chrome. Ce corps n'est pas attaqué par les laitiers riches en chaux et magnésie qui attaquent l'alumine et les briques en terre réfractaire (note 1, page 79). Les scories silicieuses ne les rongent que lentement. Ce corps contient environ 40% d'oxyde de chrome, 18 à 20% d'oxyde de fer et alumine, 15 à 20% de magnésie et 3 à 5% de silice. Mais c'est coûteux et il est nécessaire de mélanger cette matière à une autre pour confectionner les briques, ce qui limite son emploi au haut fourneau. Par contre, il est très employé pour les fours Martin.

Malgré toutes ces précautions, les parois du haut fourneau, ou plus simplement le briquetage subit une destruction progressive d'intensité variable, et cela selon la conduite de l'appareil, les matières qui y sont introduites et les causes accidentelles.

Autrefois, les fourneaux, poussés moins activement, pouvaient durer jusqu'à 15, 20, et même 30 années. La durée moyenne des fourneaux actuels à marche intensive est de 5 à 6 ans.

Nous pouvons, cependant, signaler que, par suite des réactions qui se passent dans ces appareils, le profil est amené à changer et à s'adapter à la marche réalisée, avec diminution ou augmentation de certaines épaisseurs (fig. 60). En particulier, les augmentations sont

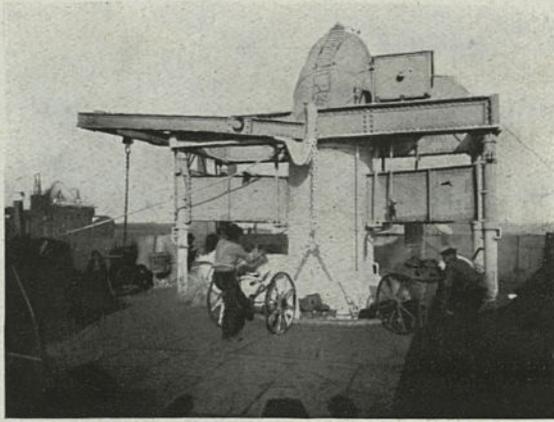


FIG. 61.

CHARGEMENT AU GUEULARD D'UN HAUT FOURNEAU.

Les leviers avec chaînes supportent le cône fermant la coupe. L'ouvrier bascule dans la coupe un wagonnet de minerai ou de coke qui a été monté sur la plateforme par un monte charges.

dues à des dépôts de carbone appelés « garnissage », ⁽¹⁾ qui sont du plus heureux effet pour la durée du briquetage. Cette circonstance a d'ailleurs donné l'idée des creusets de carbone.

Mais avant d'aborder l'explication complète des phénomènes dont le haut fourneau est le siège, nous allons examiner ses dispositions matérielles ainsi que celle de ses appareils accessoires et nous familiariser avec les raisons qui ont conduit à leur adoption.

(1) Les garnissages sont des dépôts contenant jusqu'à 40 % de carbone, 20 % de silice, 20% de chaux, de l'alumine, de la magnésie, etc. Ils se forment surtout lorsque le creuset est bien refroidi, que l'allure du haut fourneau est chaude et le laitier très réfractaire par la chaux. Les laitiers acides ou très siliceux rongent le garnissage.

A la mise en route d'un haut fourneau, et pendant plusieurs semaines parfois, les gaz (parmi lesquels SO₂ et CO) filtrent par les joints des briques et s'allument avec une flamme bleuâtre. Ce phénomène disparaît lorsque le garnissage s'est formé.

Chargement. — Le chargement a forcément dû se modifier depuis l'époque où les fourneaux étaient peu élevés et s'alimentaient à bras d'homme.

Les figures du second chapitre permettent de se faire une idée de ces installations anciennes.

Au début, on essaya d'adosser les fourneaux à la colline, pour arriver plus commodément à la plateforme. Mais des inconvénients en résultèrent, entre autres l'infiltration des eaux, et l'on dut laisser un intervalle entre le haut du fourneau et l'élévation du terrain, intervalle au-dessus duquel on établissait un pont de communication.

Il existe cependant, encore de nos jours, quelques installations ainsi disposées, où le minerai sortant de la mine à flanc de coteau, est amené directement au gueulard. Elles sont assez rares.

Le premier perfectionnement apporté au chargement des hauts

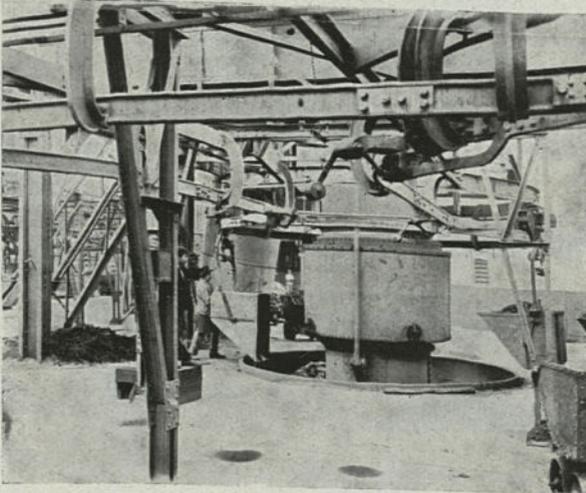


FIG. 62.

PLATEFORME DE CHARGEMENT D'UN HAUT FOURNEAU
Le minerai et le charbon arrivent au gueulard au moyen de bennes circulant sur des rails ou un câble et venant directement soit de la cokerie soit de la mine.

fourneaux fut le remplacement des rasses ou paniers par des wagonnets à basculement, moyen qui diminua le nombre d'hommes, ou plutôt permit de desservir les fourneaux à plus grosse production avec le même personnel.

Le perfectionnement qui suivit, complémentaire de celui-ci, fut l'installation de monte-charges, qui servirent à élever mécaniquement les minerais et les charbons à hauteur du gueulard. Ces monte-charges ont été actionnés de différentes manières : tantôt à bras d'homme ou par des chevaux, tantôt par l'eau, la vapeur, l'électricité.

L'ouverture du puits ou de la cuve du fourneau était autrefois libre d'accès, au milieu de la plate-forme de chargement, et présentait ainsi un réel danger aux chargeurs. Un faux pas pouvait les précipiter à l'intérieur du fourneau ; ils pouvaient être pris de vertige sous l'action nocive des gaz du gueulard.

On essaya de prévenir ces accidents en entourant la cuve d'une margelle de protection, la plateforme d'un mur, et en disposant une cheminée d'appel au-dessus du gueulard. Cette dernière précaution avait en outre, l'avantage d'empêcher l'influence de la pluie et du vent sur la marche de l'appareil.

Certains maîtres de forges, pour faciliter le travail de leurs chargeurs, qui subissent durement les intempéries, ont eu l'idée de couvrir

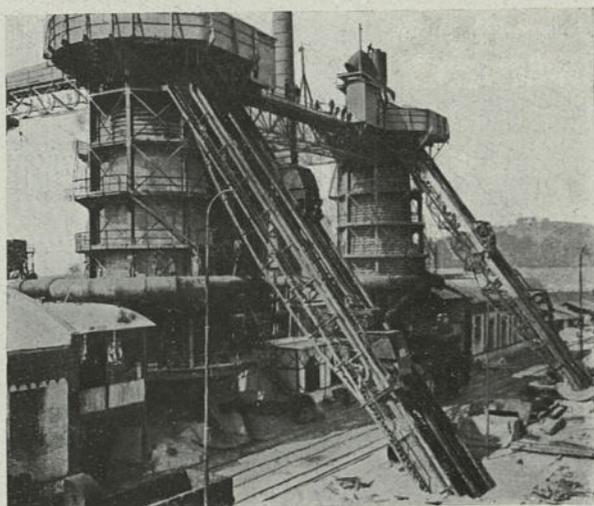


FIG. 63.

CHARGEMENT AUTOMATIQUE PAR SKIP
OU MONTE CHARGE INCLINE.

On voit les bennes, l'une montante, l'autre descendante circulant sur les skips et le déversement à la partie inférieure sur la figure 64.

la plateforme d'un appentis. Cette attention ne fut pas heureuse : les gaz délétères causèrent maints accidents.

Actuellement, le gueulard des hauts fourneaux est complètement fermé ; d'autant plus que les gaz qui se dégagent sont combustibles et que, captés, on les utilise, ainsi que nous le verrons plus loin.

Leur action n'est donc à craindre qu'au moment où l'on manœuvre l'appareil de fermeture pour laisser tomber le minerai dans le fourneau.

La fig. 61 montre le déversement de bennes dans la coupe de l'appareil de chargement. Ces bennes ont été montées à la partie supérieure du fourneau, par un monte-charge.

Mais ce procédé exige un effort assez considérable des ouvriers chargeurs, qui poussent les wagonnets et les amènent du monte-charge au gueulard.

On a essayé de rendre ce travail plus facile au moyen d'installations mécaniques qui conduisent, du stock ou de la mine, les wagonnets au gueulard. Ces wagonnets, à voie aérienne, circulent, à bras d'homme, quelques mètres seulement. Leur renversement est presque automatique, et l'effort de roulage est, de beaucoup, plus faible. La fig. 62 montre le chargement d'un haut fourneau organisé de cette façon.

Enfin, on a pensé à supprimer totalement la présence des hommes au gueulard, car, bien moins dangereux qu'auparavant, le séjour y est encore périlleux au moment de l'ouverture de l'appareil. De plus,



FIG. 64.

CHARGEMENT AUTOMATIQUE D'UN HAUT FOURNEAU.

On voit la benne qui se déverse automatiquement et sans personnel, dans la trémie placée au-dessus du gueulard du haut fourneau (système Brown).

la marche intensive des fourneaux modernes et leur régularité nécessitent des chargeurs un effort continu, laborieux et difficile à obtenir.

Les fig. 63 et 64 montrent un haut fourneau où le chargement se fait automatiquement par un monte-charge incliné — ou skip. La benne contenant le coke ou le minerai vient directement se déverser dans le haut fourneau. Les divers mécanismes sont combinés de façon à répartir les différentes bennes sur tout le pourtour du haut fourneau.

Le dernier stade de perfectionnement dans le chargement des hauts fourneaux a consisté à éviter les chutes successives des matières, qui provoquaient la formation de menu — dont l'influence est désastreuse — en employant le système de la benne-trémie.



FIG. 65.
BENNE TREMIE.

*Arrivée de la benne trémie sur le gueulard
du haut fourneau.*

Jusqu'alors on versait dans une coupe de chargement un certain nombre de wagonnets et, lorsque la coupe était pleine, on la déversait dans le haut fourneau. Avec le système de la benne-trémie, qui a la

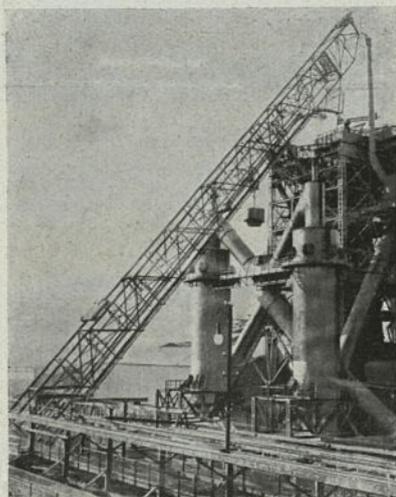


FIG. 66.
CHARGEMENT AUTOMATIQUE PAR MONTE CHARGE
INCLINE ET BENNE TREMIE.

*La benne trémie monte et la fig. 66 fait voir son arrivée
sur le gueulard.*

LE HAUT FOURNEAU

LA COULÉE DE LA FONTE



Le Haut-Fourneau caractérise la grosse Métallurgie Moderne, par l'importance des moyens qu'il met en œuvre et l'impression de puissance qu'il dégage.

Autour du Haut-Fourneau, la chaleur est grande, le bruit du vent, le ruissellement de l'eau d'arrosage, les chocs fréquents des bennes de minerai arrivant à destination et se déversant au gueulard, constituent déjà une atmosphère un peu étourdissante pour les profanes.

Quand à ces bruits constants se superpose le spectacle de la coulée, de ce ruisseau rouge et brûlant de la fonte liquide avec son éclairage diabolique, alors les plus sceptiques sont empoignés par la magie du feu.

C'est cette impression qui est imparfaitement rendue par cette figure.

contenance de la coupe des appareils ci-dessus décrits, le déversement se fait directement dans le fourneau et supprime une ou plusieurs chutes successives et leurs inconvénients.

La benne-trémie simplifiée aussi tout l'organisme de chargement: la répartition de la matière se faisant forcément sur toute la section du haut fourneau.

Ce procédé est représenté par les fig. 65 et 66.

Il faut avoir soin dans le déchargement des matières, de faire des lits alternés comprenant, soit du coke seulement, soit le minerai ou le mélange de minerais et le fondant.

Lorsqu'on emploie un mélange de minerais, il faut prévoir des dispositifs permettant de réaliser ce mélange, conformément aux indications des techniciens.

Pour un fourneau déterminé, il y a une grandeur ou « charge » la plus favorable à sa marche, et qui est relative aux quantités de charbon ou minerais qui sont introduites en une seule fois par le gueulard.

Une charge⁽¹⁾ trop faible peut déterminer un contact entre deux lits différents de minerais, alors que ceux-ci doivent être séparés par une couche de charbon, comme nous le verrons ci-après.

Il faut noter que, lors de la chute des matières dans le cuve, il se fait un classement mécanique qui s'opère de telle façon, que les morceaux les plus gros et les plus lourds vont à la périphérie et le menu au centre, ce qui présente de graves inconvénients puisque les vides existent aux parois et non au centre.

De plus, le minerai le plus lourd a tendance à descendre plus vite en traversant les lits de coke. On remédie à cela au moyen des appareils de chargement (fig. 88, 89, 90) qui envoient les matériaux vers les parois, forçant ainsi l'éboulement à se faire à l'inverse, ou encore en chargeant sciamment sur un point déterminé du haut fourneau, si on a remarqué une irrégularité.

Enfin, le chargement doit être suivi de très près, car la marche de

(1) La charge est variable avec la dimension et la production des hauts fourneaux et, pour des hauts fourneaux de même type, elle varie suivant les usines.

En moyenne elle est de 1.800 à 2.200 kg. de coke pour un haut fourneau de 100 tonnes, la charge en minerai étant variable avec la richesse, par exemple 5.000 à 5.500 kg. pour des minettes.

Cette charge peut s'élever à 4.500 kg. de coke pour des hauts fourneaux produisant 500 ou 600 tonnes de fonte par 24 heures.

Il est à remarquer que pour un fourneau déterminé la charge de coke mesurée est constante et que les variations d'allure s'obtiennent en agissant sur la quantité ou la nature du minerai et des fondants correspondants.

Exemple de charges pour les hauts fourneaux de diverses provenances :

VOLUME UTILE en mètres cubes	PRODUCTION journalière	CHARGE de coke	CHARGE de minerai	CHARGE de fondant	MINERAI et fondant
135	40 tonnes	1.500 kg.	3.300 kg.	730 kg.	4.030 kg.
145	50	2.000 —	3.300 —	600 —	3.900 —
275	100 —	2.500 —	4.000 —	1.000 —	5.000 —
525	165 —	5.000 —	10.300 —	2.000 —	12.300 —
	200 à 250 tonnes	5 à 6.000 kg.	10 à 15.000 kg.		

l'appareil en dépend. Toute irrégularité ⁽¹⁾ dans la descente peut provoquer un dérangement du haut fourneau.

Par ailleurs, la mise en route ⁽²⁾ d'un haut fourneau, exige d'autres précautions. Il n'est pas possible d'en faire le chargement en précipitant les minerais et le charbon de toute la hauteur de la cuve. On opère en laissant descendre les ouvriers à l'intérieur et en leur faisant parvenir les éléments de la charge par petites quantités qu'ils disposent méthodiquement.

Lorsque ces charges de remplissage sont à peu près au niveau des étalages, on peut terminer suivant le mode courant.



FIG. 68.

DECHARGEMENT DE FONTE A LA MAIN.

La fonte arrivée par péniches est déchargée par morceaux à la main. Actuellement cette opération se fait au moyens de grues ou ponts spéciaux.

(1) Des tiges traversant l'appareil de chargement viennent s'appuyer sur les charges et en indiquent le niveau par leur longueur. Les indications de ces tiges peuvent être transmises automatiquement au bureau de l'ingénieur.

(2) Mise à feu d'un haut fourneau.

Lorsque la maçonnerie du haut fourneau est terminée (et on doit toujours la faire autant que possible pendant la belle saison) on la laisse sécher un certain temps naturellement, puis artificiellement en entretenant du feu à l'intérieur. Enfin on procède au remplissage méthodique et on met en route.

Le remplissage en vue de la mise route se fait en disposant à la base une grande quantité de bois (des madriers et des fascines). Le bois atteint la mi-hauteur des étalages. Au-dessus on dispose du coke pur avec le fondant nécessaire pour scorifier les cendres. Le coke atteint souvent le ventre du haut fourneau. Enfin on commence à mettre des charges alternées de coke, de minerai et de fondant, mais la quantité de minerai est faible et on opère de manière à obtenir un laitier facilement fusible.

On augmente progressivement la dose de minerai de façon à se rapprocher de la charge normale. Lorsque tout est prêt, on allume au moyen d'une torche qu'on introduit dans le creuset, et au bout de douze à dix-huit heures on commence à recueillir la fonte et le laitier. Le fourneau est en marche normale un jour ou deux après la mise en route.

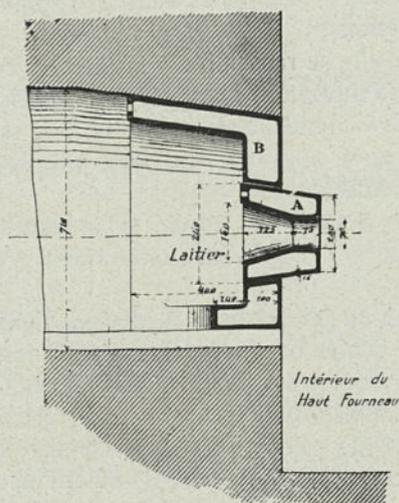


FIG. 69.

TROU DE COULEE DU LAITIER.

Actuellement le laitier s'écoule par une ouverture en bronze à refroidissement d'eau, pour éviter la détérioration de la maçonnerie



FIG. 70.

GRANULATION DU LAITIER

Installation d'une grosse Usine française du Centre

Sur la gauche de la figure, on voit plusieurs rigoles amenant le laitier liquide des différents Fourneaux, dans le bassin de granulation commun. La grue munie d'une benne dragueuse à parois percées de trous, puise le laitier granulé dans le fond du bassin pour le charger sur wagons, à destination du crassier ou de l'usine à ciment de laitier. L'eau en excès s'écoule en pluie par les trous. De la vapeur s'élève au-dessus du bassin.

Coulée de la fonte. — La façon dont on recueille la fonte, mérite que nous nous y arrêtions.

Nous savons qu'elle se rassemble à la partie inférieure du creuset, d'où elle sort par une ouverture ménagée dans le briquetage.

Cette ouverture — bouchée par du sable fort (sable jaunâtre très argileux) ou de la terre à brique ordinaire (argile plastique) — est appelée « trou de coulée » (1).

On le débouche, au moment voulu, au moyen d'un ringard biselé (barre de fer pointue à l'une de ses extrémités). (*Hors-texte en couleurs, fig. 67*).

Le métal sort en un jet qui grossit, devient tumultueux et s'écoule dans un chantier de coulée ou dans des poches à fonte (*fig. 70*).

Le chantier de coulée est disposé en rigoles ménagées dans le sable, ou constitué par de vastes moules ou lingotières en fonte.

On obtient ainsi des gueuses de fonte ou des plaques de moindre épaisseur, qu'on casse pour être livrées, ou qu'on met en dépôt sur parc. La *fig. 68* montre la manutention de fontes en forme de plaques.

La fonte coulée en poche peut être transportée pour être coulée directement dans des moules, et aussi pour être transformée en acier.

Parmi les différentes fontes obtenues, nous citerons la grise, la blanche et la fonte truitée ou mêlée.

La fonte grise, qui tire son nom de sa cassure à facettes grises, à froid, est d'une couleur plus ou moins rouge en sortant du fourneau. Elle coule avec une extrême limpidité et forme après le refroidissement des surfaces concaves.

La fonte blanche, qui présente, à froid, une cassure blanche, brillante et plutôt lamelleuse que rayonnante, donne, au sortir du fourneau, une couleur beaucoup plus claire que la fonte grise; elle se refroidit très vite en jetant des étincelles. Sa surface est très rude après le refroidissement.

La fonte truitée, intermédiaire entre les deux premières, offre une cassure à fond blanc parsemé de taches grisâtres, plutôt rayonnante que lamelleuse; elle sort du trou de coulée avec une couleur rouge et conserve une surface unie après le refroidissement.

Nous arrêtons ici les quelques observations relatives aux fontes (2). Une classification de celles-ci fait l'objet du chapitre suivant. Mais ces notions ne sauraient être étrangères à notre sujet et elles nous étaient nécessaires pour aborder la question du *laitier*.

(1) Cette partie du creuset s'abîme et, peu à peu, on est amené à refaire non seulement le trou de coulée, mais bien toute une partie du creuset qui l'avoisine; c'est ce qu'on nomme le bouchage.

(2) La couleur des fontes dépend d'une part de leur teneur en silicium qui est d'autant plus élevée que la fonte est plus grise et d'autre part de leur teneur en carbone combiné ou dissout. Les fontes blanches contiennent plus de carbone à l'état combiné.

Voir page suivante un tableau d'analyses de fontes grises, blanches et truitées.

Coulée du laitier. — Le laitier, dont on ne savait comment se défaire autrefois est devenu, aujourd'hui, un sous-produit dont l'utilisation est rémunératrice.

On le recueille à l'état liquide, à la sortie du « trou de laitier »⁽¹⁾, — qui est analogue à celui destiné à la fonte, — dans des cuves qu'on a préparé à cet effet et qu'on déverse sur le terril. D'autrefois, on laisse refroidir le pain avant de le culbuter au crassier.

Actuellement, on moule le laitier sous forme de pavés ou d'objets utilisables en construction, ou bien on le granule⁽²⁾ en le déversant dans un courant d'eau, à sa sortie du haut fourneau (*fig. 70*).

Le laitier granulé est ensuite transformé en ciment par des procédés très variés.

Même non transformé, le laitier granulé a ceci d'intéressant que sa manutention est facile, — ce que montrent les *fig. 71* et *72* où l'on aperçoit d'énormes dépôts de laitier⁽³⁾ dont la mise en tas a été opérée au moyen d'appareils spéciaux.

Les analyses ci-dessous correspondent à des fontes grise, truitée et blanche nettement caractérisées.

	Carbone total	Carbone graphitique	Carbone combiné	Si	Mn	S	Ph	Fe
<i>Première série</i>								
Fonte grise n° 1	3.60	3.42	0.48	2.60	1.40	0.029	0.041	92.60
— truitée n° 4	3.00	2.35	0.65	0.49	1.20	0.039	0.060	95.20
— blanche	4.00	3.30	0.70	0.42	1.23	0.099	0.059	94.10
<i>Seconde série. — Très peu manganésée</i>								
Fonte grise n° 1	4.24	3.85	0.39	1.00	0.25	0.012	0.055	94.45
— truitée	3.67	2.37	1.30	0.40	0.42	0.065	0.063	95.70
— blanche	3.20	0.85	2.35	0.30	0.14	0.095	0.070	96.20
<i>Troisième série. — Hématites</i>								
Fonte grise	3.48	3.40	0.08	1.20	1.20	0.021	0.044	91.05
— truitée	3.81	3.00	0.81	1.28	1.35	0.082	0.057	93.40
<i>Quatrième série. — Phosphoreuses</i>								
Fonte grise n° 1	3.20	3.20	trace	3.50	0.65	0.05	1.65	90.95
— truitée	3.09	1.84	1.25	1.00	0.60	0.30	1.55	93.45
— blanche	3.20	—	3.20	0.65	0.40	0.40	1.60	93.75
<i>Cinquième série Moyennement phosphoreuses, dites Cleveland</i>								
Fonte grise n° 1	3.70	3.30	0.40	1.90	0.40	0.02	0.71	93.25
— truitée	2.35	1.25	1.10	1.09	0.36	0.17	0.56	95.55
— blanche	2.20	0.20	2.00	0.70	0.50	0.19	0.48	96.00

(1) Le trou de laitier n'est pas pratiqué dans la maçonnerie car il s'userait très vite, mais il est disposé dans une gaine métallique à circulation d'eau appelée tuyère à laitier (*fig. 69*). Il est situé à une certaine hauteur au-dessus de la sole puisque le laitier a une densité environ 3,0 à 4 fois plus faible que celle de la fonte.

(2) La granulation peut aussi se faire à sec en incorporant au laitier les éléments nécessaires pour pouvoir le transformer ultérieurement en ciment. Le laitier granulé par l'eau contient 20 à 33 % d'eau et pèse 500 à 1.000 kg. au mètre cube, alors que le laitier solidifié en morceaux pèse 2.500 kg. au mètre cube.

(3) La quantité de laitier produite par tonne de fonte est très variable, elle dépend de la nature et de la quantité des gangues qui accompagnent le minerai et de la richesse de ce dernier.

Elle atteint 1.150 à 1.300 kg. pour les minerais pauvres de l'Est et ne doit pas descendre au-dessous de 400 kg. par tonne de fonte pour les minerais très riches. Une bonne moyenne est de 700 à 800 kg. pour des minerais moyennement riches (45% environ).

Insufflation du vent. — Le vent donne la vie au haut fourneau. Il en est la respiration, le mouvement interne. Dès que le vent cesse, le fourneau languit. C'est le vent qui, par sa variation, influe le fourneau au point de transformer la fonte ou d'en doser la quantité obtenue.

Le vent doit être produit, puis introduit dans le haut fourneau.

Sa production a suivi des étapes d'activité croissante : du souf-



FIG. 71.

SYSTEME DE MISE EN DEPOT (TERRIL) DU LAITIER.

Le système est complètement automatique et on voit sur la partie supérieure gauche de la photographie, le wagonnet spécial automoteur. Il a l'avantage d'éviter le séjour sur le terril qui présente certains dangers, à cause des émanations.

flage à bras au mouvement hydraulique, de ce dernier à l'emploi de la vapeur, du gaz et de l'électricité.

Le mouvement hydraulique, dont on voit des exemples (*fig. 1, 10, 13 et 73*) avait de graves inconvénients, parmi lesquels une régularité forcée et une puissance limitée par le débit et la hauteur de chute de la rivière auprès de laquelle la forge se trouvait. Il s'ensuivait que l'extension de l'usine était en dépendance directe de sa situation.

L'emploi de la vapeur dans la machine de Watt, permit à la forge d'affranchir sa situation jusque là riveraine et d'approprier la puissance de ses machines à une extension sans limites étroites.

Mais c'est l'historique de la machine à vapeur qu'il faudrait entreprendre si l'on voulait montrer les étapes parcourues depuis l'apparition des premières soufflantes à vapeur. Contentons-nous, dans notre cadre, d'indiquer les organes essentiels d'une machine soufflante à vapeur actuelle :

D'une part, des cylindres moteurs à vapeur qui commandent le mouvement de l'ensemble et sont susceptibles d'admettre des variations⁽¹⁾ de puissance et de vitesse;

(1) Voir renvoi (1) page suivante, n° 91.



FIG. 72.
SYSTEME DE DEPOT DE LAITIER PAR TRANSPORT-
TEUR AERIEN.

Dans ce système, la station de retour pour les bennes vides est placée à l'extrémité du terrain disponible pour le dépôt du laitier. On peut déverser en un point quelconque intermédiaire.

D'autre part, des cylindres à vent qui aspirent l'air dans l'atmosphère au moyen de clapets et le refoulent à une certaine pression dans une conduite de gros diamètre, en communication avec le haut fourneau.

Un réservoir d'air assez important permet d'avoir un débit sensiblement régulier, malgré le mouvement alternatif des pistons (fig. 74 et 75).

La puissance de la machine soufflante est naturellement en rapport avec le haut fourneau à alimenter, et elle dépend de la quantité et de la pression de l'air à fournir.

On caractérise soit par la puissance en chevaux-vapeur ⁽²⁾, soit par le nombre de mètres cubes et la pression de l'air que les cylindres soufflants peuvent débiter par minute ⁽³⁾.

(1) On a longtemps réglé la marche du haut fourneau en spécifiant le nombre de tours de la soufflante par minute. Ceci s'expliquait par la difficulté de mesure du débit et de la pression du vent. Actuellement on mesure la pression et le débit par des appareils spéciaux et on règle la marche de la soufflante de façon à ne pas dépasser les chiffres prévus.

(2) Rappelons que le cheval vapeur est la puissance qui correspond à un déplacement de 75 kg. sur une hauteur de 1 mètre par seconde, ou à un travail de 75 kilogrammètres par seconde.

(3) Caractéristiques de quelques machines soufflantes :

PRODUCTION du haut fourneau en tonnes	PUISSANCE de la machine en chevaux vapeur	NOMBRE de tours	DÉBIT de la machine en mètres cubes à la minute	PRESSON de l'air par centimètre carré
50 à 70	200 à 300	—	200	9 kg. 15
500	950	90	7.0	0 kg. 6
400	1.600	25 à 80	1.000	0 kg. 5 à 1 kg.
400	2.500		1.500	

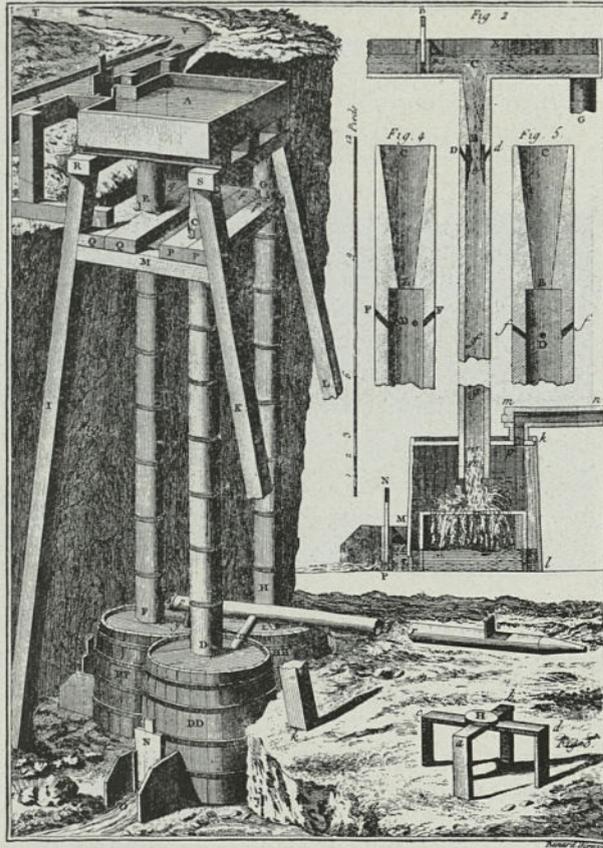


FIG. 73.

SOUFFLANTE ANCIENNE OU TROMPE HYDRAULIQUE

Cet appareil nécessite l'adossement du Haut Fourneau ou de la Forge Catalane, à une colline où on peut se procurer de l'eau par la trompe. L'eau tombe d'un bassin supérieur à niveau constant alimenté par la rigole TVX et le registre B, dans des caisses inférieures ou boîtes à vent par l'intermédiaire de tuyaux comportant des ouvertures F F', Dd. Dans sa chute l'eau entraîne de l'air par les ouvertures qu'on distingue nettement sur le détail de droite de la figure. Dans la boîte à vent l'eau rencontre une plaque qui laisse l'air s'échapper et se diriger vers la tuyère par m n, tandis que l'eau s'écoule. Le réservoir est à une hauteur de 8 à 10 mètres au-dessus de la boîte à vent et la pression obtenue pouvait atteindre 100 à 150 grammes par centimètre carré.

Présentement on emploie des machines soufflantes à gaz (fig. 76).

Ce sont des cylindres soufflants (fig. 77) commandés par des moteurs à gaz. Le gaz qui alimente les moteurs peut, en particulier, provenir des fours à coke ou du haut-fourneau lui-même (fig. 78).

Enfin, on commence à employer des soufflantes basées sur un principe complètement différent : les soufflantes rotatives ou centri-

fuges. Elles sont commandées, en général, par des moteurs également à rotation continue : turbines ou moteurs électriques (fig. 80).

On peut dès maintenant concevoir le retour à l'utilisation des

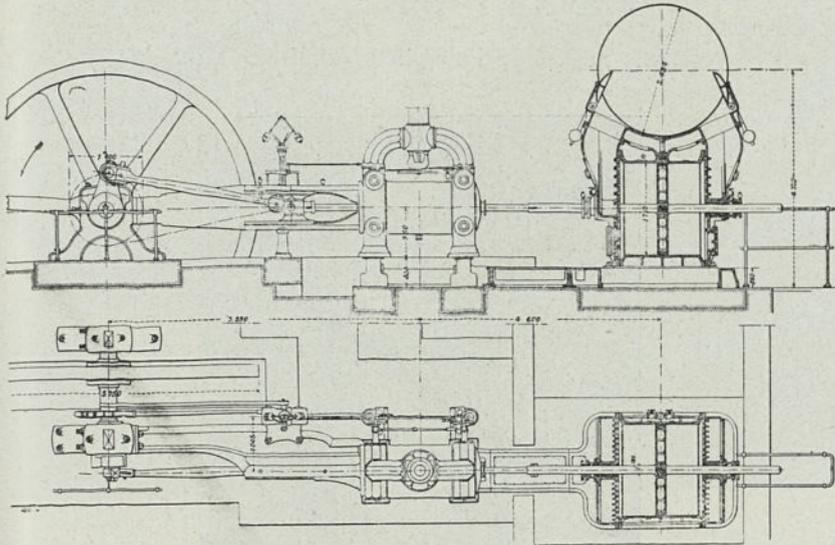


FIG. 74.

SOUFFLANTE HORIZONTALE A VAPEUR

Pression de la vapeur = 6 kgs.

Cyl. à vapeur	$d = 0^m,750$	Section de refoulement	: $0^m2,331$
Cyl. à vent	$D = 1^m,770$	Pression du vent en cm. de mercure	= 30 cm.
Course commune,	$1^m,400$	Dépres. à l'aspiration en mm. d'eau	= 17
Nombre de tours par min.	= 50	Débit de vent par tour à $0^o,760$	= $6m306$
Poids du volant	: 11,000 kgs	Travail de compression du vent	: 288 HP.
Section d'aspiration	: $0^m2,276$	Travail du cylindre à vapeur	: 378 HP.

chutes d'eau, au moyen de turbines hydrauliques produisant du courant électrique facilement transportable aux usines.

Le vent des machines soufflantes arrive au haut fourneau dans une conduite de gros diamètre appelée conduite circulaire. De cette conduite partent des ramifications qui vont aux porte-vents, puis aux tuyères (fig. 81). Ces dernières, par lesquelles l'air afflue, sont à l'intérieur même du creuset, au contact des matières en fusion.

On doit donc les prévoir telles qu'elles puissent résister à cette haute température. Le procédé le meilleur consiste à les faire en cuivre battu, à double paroi, pour permettre un refroidissement énergique par l'eau sous pression⁽¹⁾.

La fig 82 représente une tuyère complète.

(1) L'ouverture par laquelle le vent est insufflé a $100^m/m$ de diamètre environ pour les petits fourneaux et atteint jusqu'à $250^m/m$ pour les gros. On peut faire varier la section de passage de l'air en introduisant une brique dans la buse de la tuyère.

Enfin, concernant l'eau nécessaire au refroidissement des tuyères, on peut compter environ 200 litres par minute par tuyère. Signalons que pour l'ensemble d'un fourneau il faut 1 à 5 mètres cubes par minute suivant la dimension.

Chauffage du vent. — Le vent est indispensable à la marche du haut fourneau, qu'il soit froid ou chaud.

Cependant, en 1828, des essais conduisirent les usiniers anglais à chauffer le vent insufflé, et ce procédé fut le point de départ d'un essor prodigieux.

N'en retenons que ceci : l'air chaud diminue la quantité de com-

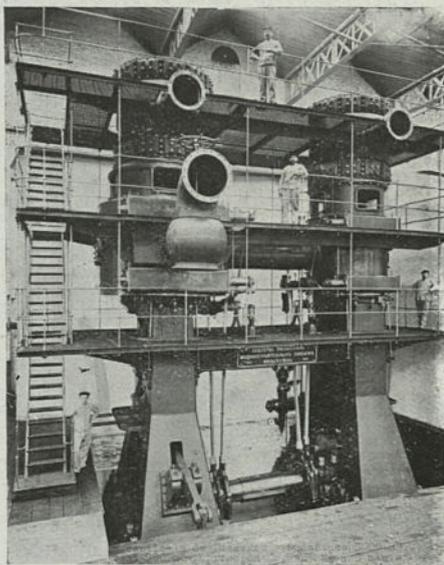


FIG. 75.

SOUFFLANTE VERTICALE A VAPEUR

Puissance 3.000 HP. Débit de vent 900 m.c

Pression du vent 2 1/2 à 3 atmosphères.

Les cylindres à vent sont au dessus, les cylindres à vapeur en dessous. Ce type de machine est utilisé aussi bien pour Hauts Fourneaux que pour convertisseurs à acier. Pour Haut Fourneau il existe des machines de ce type de 300 HP de puissance.

bustible nécessaire par tonne de fonte, tous les autres éléments : haut fourneau, minerais, charbons, soufflante, restant les mêmes ⁽¹⁾.

Il s'en suit donc qu'il faut interposer un système de chauffage du vent entre la machine soufflante et le haut fourneau.

Le système a consisté tout d'abord à faire passer l'air soufflé dans une série de tuyaux en fonte, chauffés extérieurement.

Pour le chauffage de ces tuyaux, on employa du charbon et on y eut avantage. Plus tard, en 1850, un Français, Fabre Dufour, eut l'idée

(1) On peut dire à ce sujet qu'une élévation de 100° dans la température du vent économise 50 kg. de coke par tonne de fonte produite. La note (1) page 107 explique théoriquement cette économie.

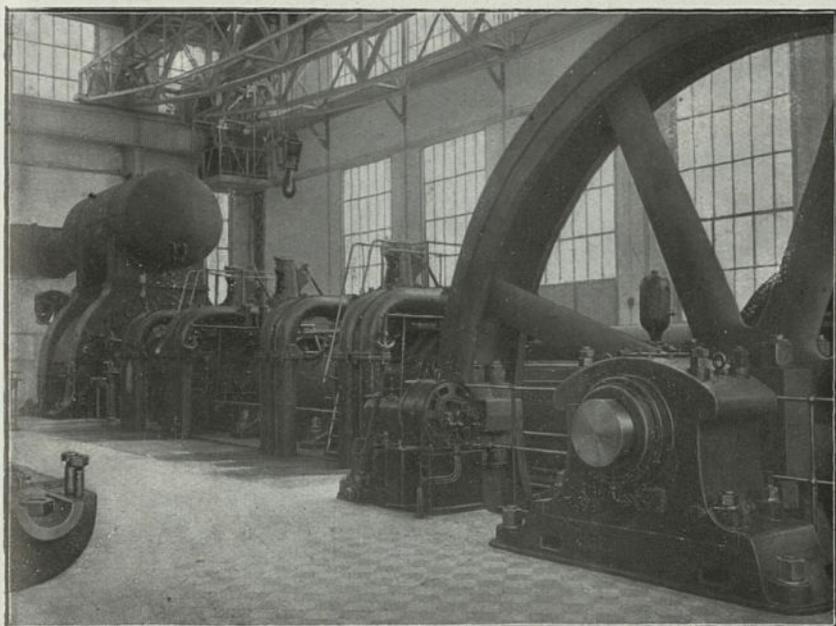


FIG. 76.
SOUFFLANTE A GAZ.

Le moteur à gaz de Haut Fourneau est constitué de deux cylindres en tandem et le cylindre soufflant (fig. 77) est sur la même ligne. On voit au-dessus du cylindre soufflant le réservoir d'air qui sert à atténuer la pression oscillatoire produite par le mouvement alternatif des pistons. Un volant permet d'avoir une marche régulière oscillant aux environs de 90 tours par minute.

d'utiliser les gaz combustibles qui s'échappent du gueulard et dont on voyait les flammes éclairer le ciel en pure perte. Captés, ils servent de combustible.

L'augmentation de température du vent conduit à la suppression des tuyaux de fonte ⁽¹⁾.

Les appareils modernes employés pour le chauffage du vent se désignent par Whitwell (fig. 83) et Cowper (fig. 84 et 85), noms de leurs inventeurs respectifs.

Ces appareils sont basés sur le principe suivant : Une grosse masse de matière réfractaire est chauffée à haute température, grâce à la combustion d'une partie des gaz sortant du gueulard du haut fourneau.

(1) La température du vent oscille de 400 à 900°.

Elle est de 400° environ dans les anciens fourneaux et particulièrement pour ceux marchant avec des minerais riches et munis d'appareils Whitwell.

Elle atteint 600 à 800° en moyenne pour les fourneaux modernes et spécialement pour ceux de la région de l'Est fabricant de la fonte Thomas. Pour certains munis d'appareils Cowper de grande dimension, le vent est chauffé à 900°.

Lorsque la matière réfractaire a été fortement chauffée, on suspend l'arrivée des gaz combustibles du gueulard, et, grâce à un jeu de

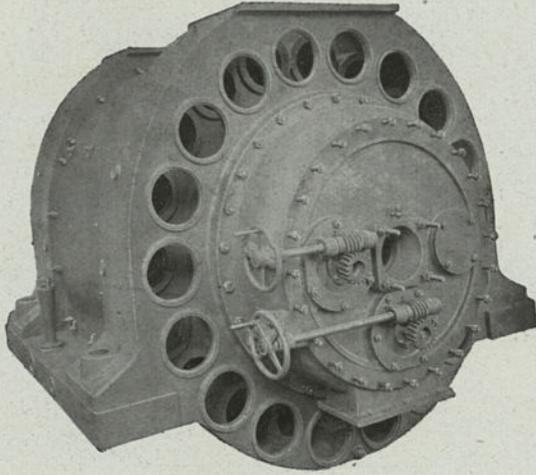


FIG. 77.

CYLINDRE DE MACHINE SOUFFLANTE A PISTON

On voit sur la photographie, le passage de la tige de piston au centre. Tout autour on voit le réservoir où les clapets débouchent et qui est en communication par le dessous avec le gros réservoir collecteur. On voit également l'emplacement des clapets d'aspiration et de refoulement. En face de chacun d'eux une ouverture permet de les surveiller, de les entretenir et de les changer s'il y a lieu. On voit également les volants de réglage, permettant de faire varier la pression de refoulement et le débit.

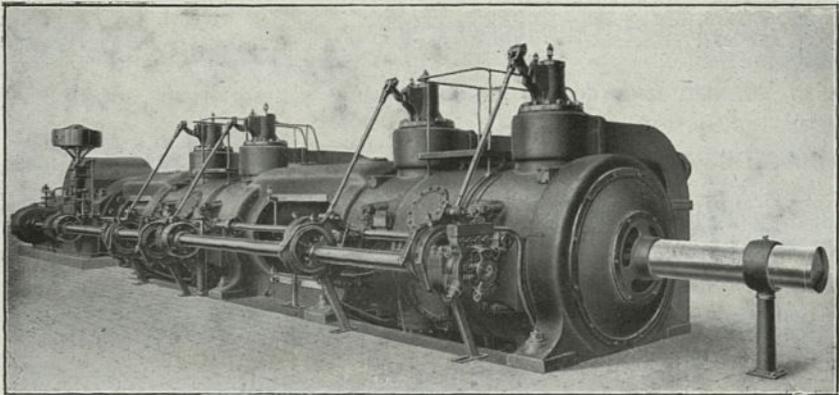


FIG. 78.

MOTEUR A GAZ DE HAUT FOURNEAU

Ce moteur est constitué de deux cylindres en tandem ou de deux files de deux cylindres accouplés sur le même arbre, par l'intermédiaire de manivelles calées à 90°. On peut avoir sur l'arbre une génératrice produisant du courant continu ou alternatif.

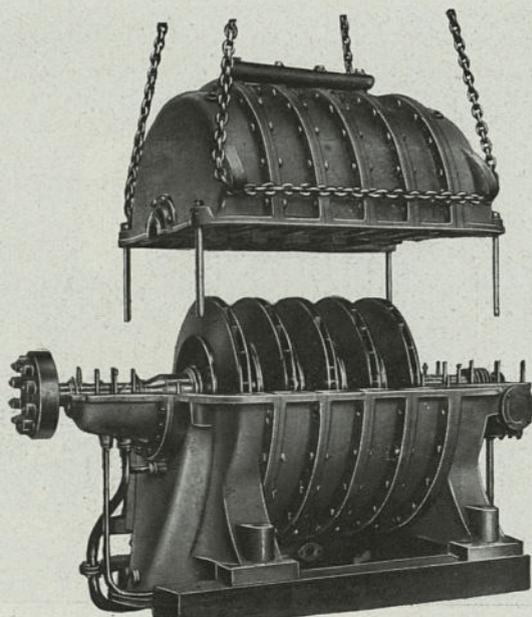


FIG. 79.

SOUFFLANTE CENTRIFUGE

Cette soufflante centrifuge est constituée de sections en série, c'est-à-dire que l'air soufflé par l'une des sections est aspiré par la suivante qui la refoule à son tour, etc. Ici ces cinq sections permettent d'obtenir une pression allant à 0^m,30 ou 0^m,50 de hauteur de mercure.

vannes, on fait arriver, au contact des briques rouges, le vent en provenance de la soufflante. Cet air se réchauffe aux briques réfractaires auxquelles il enlève une partie de leur chaleur⁽¹⁾, puis rend aux tuyères.

(1) On calcule la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer l'air d'insufflation à la température désirée. On sait, d'autre part, le poids de briques nécessaire pour pouvoir fournir par réchauffage 1.000 calories à l'air. On en déduit donc le poids des briques à employer dans les appareils Whitwell ou Cowper.

Les chiffres qu'on peut donner sont :

Chaleur spécifique de l'air 0,24 calories, c'est-à-dire que pour échauffer 1 kg. d'air de 1° il faut 0,24 calories.

D'autre part, la quantité de briques nécessaire pour fournir 1.000 calories à l'air est différente suivant la température à laquelle il doit être porté et la durée de passage.

Par exemple, si la température finale est 600°, 1.000 calories exigent 250 kg. de briques, alors que si la température est de 900°, pour 1.000 calories il faut 400 kg. de briques.

Ces deux chiffres permettent de trouver le poids des empilages. Souvent on fait intervenir la surface qui correspond avec le poids. On compte en moyenne 5 mètres carrés par tonne d'empilage. On peut donc obtenir indifféremment le poids ou la surface.

Ainsi, à supposer qu'on doive chauffer 1.000 kg. d'air de 20° à 900°. Il faudrait $880 \times 1.000 \times 0,24$ calories soit 211.200 calories. Pour 1.000 calories il faut 400 kg. de briques, pour 211.200 calories il faudrait donc 84.480 kg. de briques ou 420 mètres carrés de surface de chauffe.

Types d'appareils Cowper :

Diamètre extérieur	Hauteur	Volume en mètres cubes	Surface utile
5,80	17	449	5.100
6,00	16	459	4.100
6,40	23	766	5.400

Actuellement la surface oscille entre 15.000 et 20.000 mètres carrés divisée entre trois appareils.

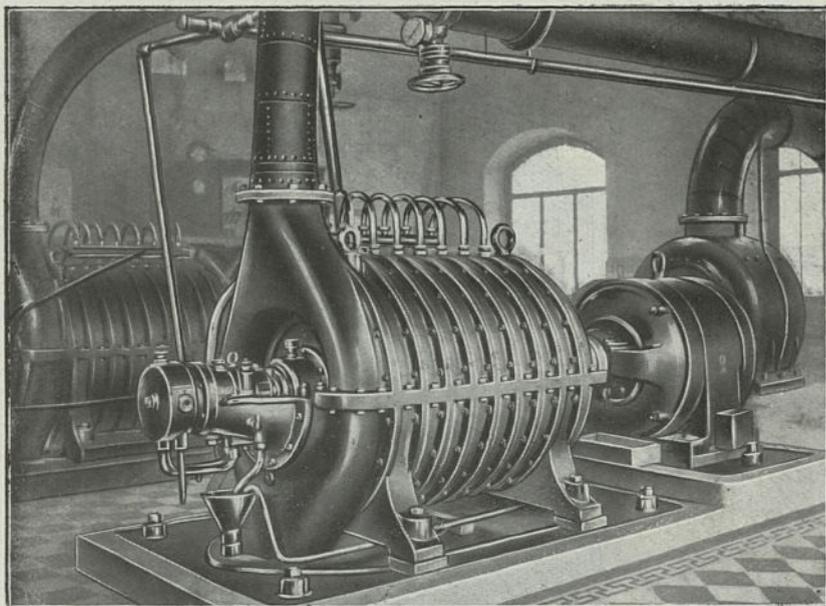


FIG. 80.

SOUFFLANTE CENTRIFUGE COMMANDEE PAR MOTEUR ELECTRIQUE

Les soufflantes du type de la fig. 79 peuvent être commandées soit par turbine à vapeur, soit par moteur électrique. Dans cette salle de machine on aperçoit plusieurs soufflantes centrifuges commandées par moteur électrique.

Lorsqu'on juge que les briques sont à température trop faible, et que, par suite, la température du vent est trop basse, on arrête l'arrivée d'air et on recommence le chauffage au moyen des gaz combustibles du gueulard ⁽¹⁾.

Pour avoir de la continuité dans cette opération, on dispose, pour un seul haut fourneau, de plusieurs appareils Whitwell ou Cowper, de

(1) Généralement un haut fourneau est muni de trois ou quatre appareils, l'un servant de rechange pour les nettoyages ou réparations. S'il y a plusieurs hauts fourneaux, on peut avoir sept appareils, c'est-à-dire un seul rechange pour les deux groupes. Il y aurait donc toujours trois appareils en marche (deux au gaz, c'est-à-dire recevant les gaz combustibles du gueulard pour le chauffage et un au vent, c'est-à-dire recevant le vent à réchauffer destiné aux tuyères). Il en résulte que toutes les vingt minutes on doit opérer un changement pour mettre un nouvel appareil au vent et remettre au gaz celui précédemment au vent.

Cette opération, bien que fort simple, doit se faire dans un ordre déterminé pour éviter les accidents dus à l'introduction de l'air dans un appareil contenant des gaz combustibles. On y arrive en faisant les opérations dans l'ordre ci-après.

Pour faire passer un appareil du gaz au vent : on ferme la vanne à gaz, on ferme la valve de cheminée, on ferme l'arrivée d'air de combustion, on ouvre l'arrivée du vent froid, puis la valve à vent chaud permettant ainsi l'envoi à la conduite circulaire et aux tuyères.

La limite théorique qu'on peut atteindre dans le chauffage du vent est la température de combustion des gaz du gueulard, c'est-à-dire 1.300° environ. Pratiquement elle ne dépasse pas 900 ou 950° (très rare), et encore n'est-ce que pendant peu de temps, car à la fin d'une période la température s'abaisse, donnant ainsi des oscillations de 50 à 100°. Pour éviter cet inconvénient, certaines usines font venir tout l'air chaud destiné aux différents fourneaux dans un réservoir commun de grande dimension où il y a égalisation de la température, puis l'air est distribué. Malheureusement, si la température du vent obtenu est constante, ce qui est bien, par contre, il y a perte de chaleur à cause des conduites nécessaires.

sorte que lorsque l'un d'eux sert à chauffer le vent venant de la soufflante, les autres sont chauffés par les gaz du gueulard.

Les fig. 83, 84 et 85 permettent de saisir, sans autre explication, le fonctionnement de ces appareils qui ne sont compliqués qu'en apparence.

Dans la recherche des perfectionnements, l'imagination des ingé-

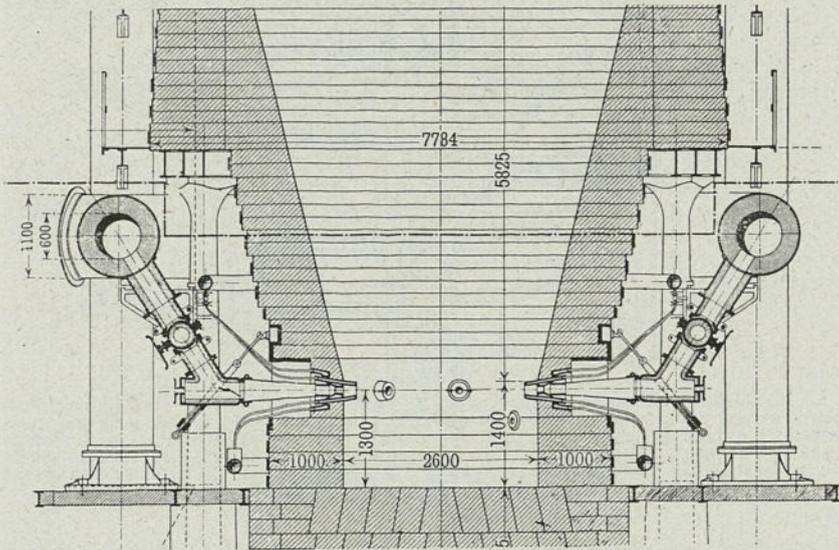


FIG. 81.

DISPOSITION DE LA CONDUITE CIRCULAIRE

Cette figure montre l'ensemble de la conduite circulaire, la bride de raccordement à gauche, entre cette conduite et les appareils à chauffer le vent. On voit aussi, le raccordement de deux tuyères à la conduite circulaire, avec les porte-vents, l'œilillon permettant de regarder dans l'axe de la tuyère les conduites d'eau de refroidissement, le système de démontage rapide de l'ensemble, etc.

niers s'est donné libre cours. Ainsi un américain s'est avisé il y a quelques années à peine, (en 1900), qu'avec l'air introduit dans les machines soufflantes et par suite aussi dans les appareils Cowper et le haut fourneau on véhicule la vapeur d'eau en suspension dans l'atmosphère.

Or, si l'air est nécessaire à cause de son oxygène, la vapeur d'eau absorbe une certaine quantité de chaleur qui serait mieux utilisée autrement.

Cet ingénieur eut donc l'idée d'extraire la vapeur d'eau contenue dans l'air en le refroidissant fortement avant son aspiration par la soufflante.

De cette façon la vapeur est transformée en eau puis en glace,

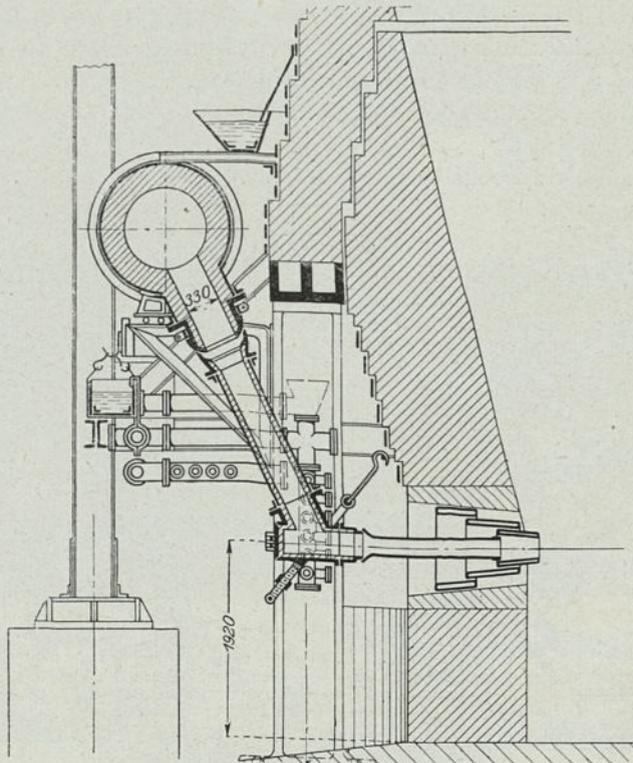


FIG. 82.

DISPOSITION D'UNE TUYERE

Sur cette figure on voit la conduite circulaire avec son garnissage réfractaire, au point où une tuyère est branchée sur elle. Le porte-vents est en fonte avec un garnissage réfractaire également. Il est maintenu par un système permettant un démontage rapide en cas d'accident. La tuyère proprement dite est en cuivre à double paroi à circulation d'eau et débouche dans le Haut Fourneau même. Elle est placée elle-même dans une ou deux tympes à double paroi en bronze à circulation d'eau. Entre le porte-vent et la tuyère un tube légèrement conique : la buse, sert à l'amenée du vent.

enlevée facilement et l'air sec suit le cycle précédent pour arriver au fourneau après réchauffage dans les Cowpers.

On prétendait que ce procédé avait permis en Amérique de réaliser des économies importantes dans la fabrication de la fonte. Un essai fait en Europe, en 1913-1914, n'a pas démontré nettement le fait.

Un autre ingénieur français, partant du fait que seul l'oxygène est utile dans l'air insufflé au haut fourneau, en conclut que si on éliminait l'azote, les machines soufflantes, entre autres résultats seraient réduites des quatre cinquièmes.

Point n'est besoin d'envisager dans cet opuscule toutes les conséquences de cette profonde modification qui n'est pas encore sanctionnée par une pratique courante, bien qu'un essai ait été fait dans une usine européenne.

Captage et purification des gaz. — Nous avons indiqué que les gaz qui s'échappent du gueulard sont encore combustibles⁽¹⁾. Ce qu'il convient de mettre en lumière, dès maintenant, c'est que l'utilisation de ces gaz a complètement transformé la physionomie de l'usine moderne.

On s'est bien vite aperçu, en effet, que ces gaz, convenablement

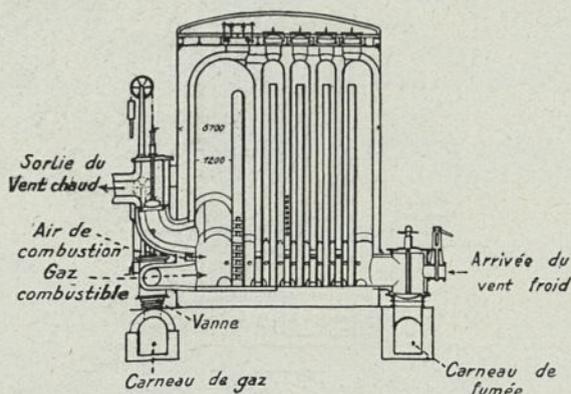


FIG. 83.

APPAREIL WHITWELL

Cet appareil sert au chauffage du vent. Il est à marche discontinue. Tantôt le gaz de haut fourneau épuré, brûlé au moyen d'air de combustion, passe dans les différentes chambres de l'appareil, de gauche à droite et s'échappe à la cheminée par le carneau de fumée. Tantôt l'air froid venant de la droite, traverse l'appareil et en sort chaud à gauche pour se rendre à la conduite circulaire. Caractéristique de cet appareil : plusieurs circulations en haut et en bas.

captés, pouvaient fournir la force motrice aux différentes machines, et donner même un excédent appréciable.

La première conséquence de cette application fut donc d'éviter la perte de ces gaz, et l'on concevra, avec plus de netteté, le changement de physionomie qui s'est fait dans la disposition du gueulard, autrefois réservé uniquement à la charge des matières, agencé dorénavant pour capter le combustible nouveau.

Les fig. 85, 86, 87 montrent les diverses fermetures et appareils de prises⁽²⁾, qui sont tellement liés entre eux, qu'il est impossible de mentionner les uns sans nommer les autres.

(1) La quantité de gaz recueillie est d'environ 4.500 mètres cubes par tonne de fonte produite.

(2) Dès le moment que l'on commença à capter les gaz combustibles se dégageant par le gueulard, deux méthodes se firent jour : la prise de gaz centrale ou les prises de gaz latérales. Elles ont toutes deux leurs inconvénients et leurs avantages tant au point de vue théorie qu'au point de vue exécution.

Elles dépendent beaucoup de l'appareil de chargement qui commande souvent un système au détriment de l'autre, spécialement dans le cas des doubles fermetures.

Pour le système à gueulard ouvert et celui à gueulard fermé avec simple coupe et cône, on a indifféremment la prise centrale ou latérale comme le montrent les figures 86, 87, 88, 89.

Pour le système à double coupe et cône, la prise centrale est assez difficile à réaliser et l'a été rarement, la fig. 90 montre une réalisation de ce système.

Les autres réalisations de système de double fermeture avec ou sans chargement automatique ont presque toutes des prises de gaz latérales (voir fig. 91-92). Les prises de gaz latérales sont spécialement obligatoires avec le système de chargement par benne-trémie, car celle-ci occupe le centre.

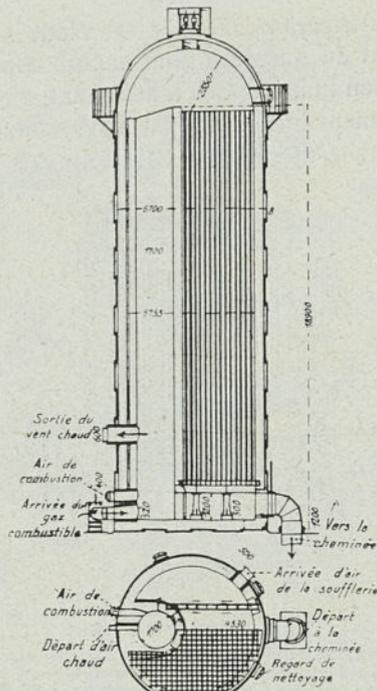


FIG. 84.
APPAREIL COWPER

Cet appareil sert également à chauffer le vent et sa marche est discontinue comme celle de l'appareil fig. 83. Il diffère du précédent par sa hauteur beaucoup plus grande et parce qu'il y a beaucoup moins de changements de sens dans la circulation des gaz brûlés ou de l'air à réchauffer. Tantôt combustion dans le puits de gauche et réchauffage des empilages de briques à la descente. Tantôt l'air à réchauffer monte par la droite dans les empilages et ressort en descendant par le puits, au point le plus chaud pour se rendre à la conduite circulaire du Haut Fourneau.

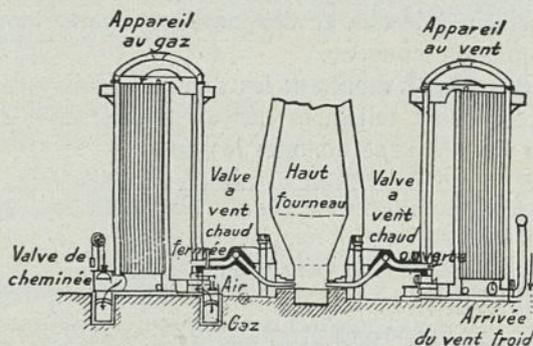


FIG. 85.
DISPOSITION CONJUGUÉE D'UN HAUT FOURNEAU
ET DE DEUX APPAREILS A CHAUFFER
LE VENT SYSTEME COWPER.

L'appareil de gauche est en réchauffage, tandis que l'appareil de droite réchauffe le vent froid venant de la soufflante. Cet air chaud se rend ensuite à la conduite circulaire qui alimente les tuyères.

Dans tous ces appareils apparaissent la coupe où l'on verse le minerai et le cône, qui sert de fermeture et de guide pour lutter contre les tendances naturelles de classement des minerais.

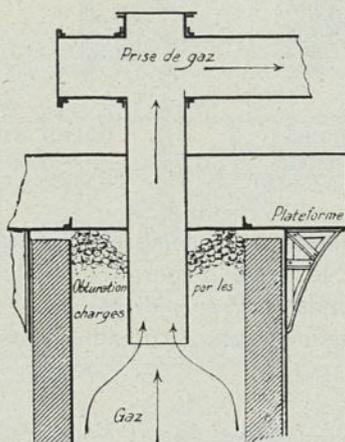


FIG. 86.
GUEULARD OUVERT
(fermeture par les charges) avec prise de gaz centrale.

Ces coupe et cône, sont combinés avec prises de gaz centrales ou latérales, suivant le cas (fig. 88 et 89).

Enfin, la nécessité d'éviter la communication de l'atmosphère avec l'intérieur de la cuve, pendant toute la durée du chargement, a conduit

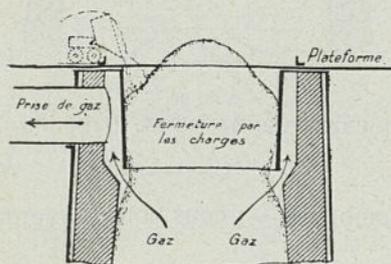


FIG. 87.
GUEULARD OUVERT
(fermeture par les charges) avec prise de gaz latérale.

à l'adoption du système à double fermeture qui limite la perte de gaz (fig. 90, 91 et 92).

Ainsi recueillis, les gaz portent eux avec des éléments étrangers : poussières de minerai et de charbon, résidus divers, vapeur d'eau, etc.,

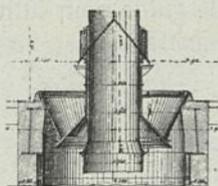


FIG. 88.
COUPE ET CONE
(prise de gaz centrale)

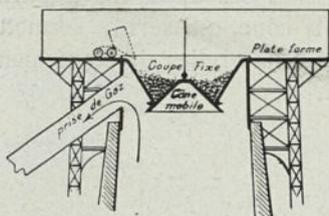


FIG. 89.
COUPE ET CONE
(prise latérale)

qui diminuent leur valeur et encombrant les appareils d'utilisation. C'est ici qu'intervient le mode d'épuration dont le but est d'éliminer des gaz, les éléments nuisibles.

Il n'entre pas dans nos vues de détailler tous les appareils d'épu-

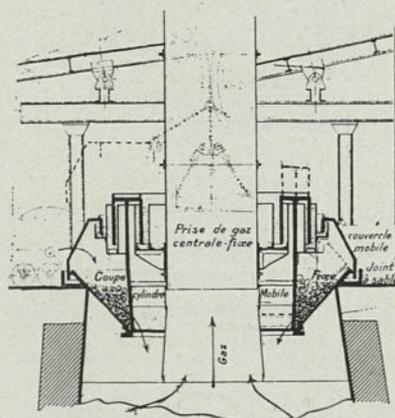


FIG. 90.
GUEULARD A DOUBLE FERMETURE ET PRISE DE GAZ CENTRALE

ration — qui sont nombreux —; nous nous bornerons à en exposer les principes.

Le premier de ces principes consiste à faire subir au gaz des changements de direction brusques en même temps que de grandes variations de vitesses, au moyen de conduites de directions et de sections variables. Les poussières, plus lourdes que les gaz, se déposent en des points déterminés ou on les recueille (*fig. 93 et 94*).

Le second principe⁽¹⁾ a son essence dans le refroidissement des

(1) L'épuration des gaz se fait d'autant mieux qu'on a plus d'eau et que celle-ci est de meilleure qualité (ni saumâtre, ni calcaire). On peut compter un minimum nécessaire d'environ 2 litres par mètre cube de gaz.

gaz, au moyen de pluies d'eau, ou au moyen d'une grande masse d'eau, au-dessus de laquelle on les fait circuler, ou encore en les faisant passer dans l'eau, où, la vapeur d'eau contenue dans les gaz se condense entraînant avec elle la majeure partie des poussières (fig. 95).

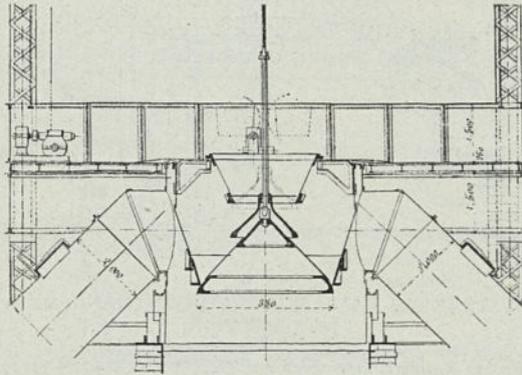


FIG. 91.

FERMETURE DU GUEULARD PAR DOUBLE COUPE ET CONE
ET PRISES DE GAZ LATÉRALES

Le troisième principe consiste à faire passer le gaz dans des appareils à rotation où l'on injecte de l'eau. Celle-ci, pulvérisée par le mouvement, s'attache aux fines particules de poussières qu'elle alour-

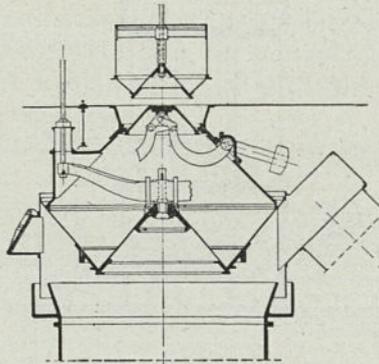


FIG. 92.

FERMETURE A DOUBLE COUPE ET CONE REALISEE AVEC UTILISATION
DE LA BENNE TREMIE ET PRISE DE GAZ LATÉRALE.

*La benne trémie est figurée au-dessus du premier cône
et avant de se poser sur l'appareil de chargement.*

dit. L'ensemble est éliminé par suite de combinaisons de mouvements qui les projettent contre les parois (fig. 96 et 97).

Ces appareils sont souvent combinés avec des séparateurs d'eau

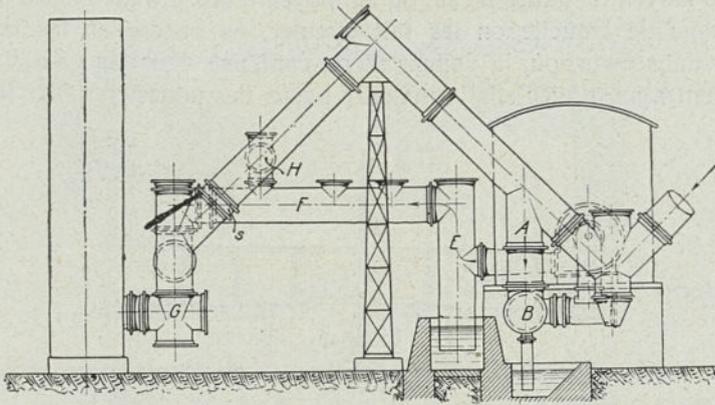


FIG. 93.
SYSTEME DE CANALISATION AVEC CHANGEMENT
DE DIRECTION

pour le dépôt des grosses poussières. Certaines tuyauteries débouchent sur des basses hydrauliques formant clapets de sécurité et permettant l'enlèvement des dépôts en marche. Des conduites en V rassemblent les poussières par gravité dans des points bas munis de clapets et qu'on vide au moment des arrêts du Haut Fourneau.

(fig. 98) ou des filtres (fig. 99) servant à éliminer l'eau dont les gaz ont pu se charger pendant ces opérations.

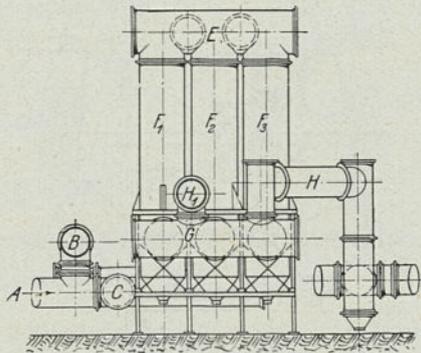


FIG. 94.
SYSTEME DE CANALISATION AVEC CHANGEMENT
DE DIRECTION

permettant le dépôt des grosses poussières lourdes. Des trémies de réception des poussières sont disposées aux changements de direction.

Tout récemment, on a expérimenté un procédé d'épuration dit « à sec », où l'on opère comme il suit :

Les gaz bruts sortant du gueulard sont refroidis jusque vers 60 à

75° environ. Puis on les fait passer au travers de sacs filtrants. Ces sacs sont disposés de telle façon que les gaz les traversent de l'intérieur où ils abandonnent leurs poussières vers l'extérieur où ils sont aspirés par des ventilateurs (fig. 100).

Les sacs sont ouverts par le bas, fermés par le haut et fixés à leur base d'une façon quelconque. L'extrémité supérieure, au contraire, est mobile et solidaire d'un mécanisme agitateur qui, par secousses péri-

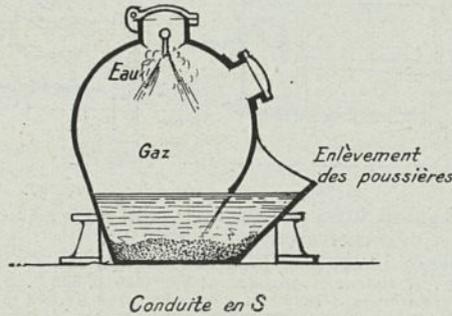


FIG. 95.
CONDUITE EN S

Elimination des poussières et refroidissement des gaz par pluie d'eau envoyée par pulvérisateurs. L'enlèvement des poussières se fait en marche, grâce à la garde d'eau, qui agit en même temps comme sécurité en cas d'explosion.

diques, provoque la chute des poussières qui sont évacuées. On favorise le dépeussierage en faisant agir de temps en temps sur les sacs, de l'extérieur vers l'intérieur, cette fois, un courant de gaz pur ⁽¹⁾.

Quoi qu'il en soit, le but cherché est d'obtenir un gaz sec, contenant le minimum de poussières.

Utilisation. — Ce gaz combustible peut être employé ⁽²⁾ aux

(1) Depuis une quinzaine d'années un procédé d'épuration complètement différent est apparu : le système électro statique Cottrell. Il consiste à faire circuler le gaz dans des tubes au centre desquels passe un fil formant électrode de charge et recevant du courant électrique à haute tension jusqu'à 100.000 volts. Les poussières contenues dans le gaz, chargées électriquement, sont projetées sur les parois des tubes formant électrodes de dépôt. Ces poussières se rassemblent par gravité et au besoin en frappant mécaniquement et périodiquement sur les tubes et sont évacuées.

On épure ainsi le gaz à 0 gr. 5, 0 gr. 10 de poussière par m³ avec une quantité d'eau de 1 à 1,5 litre par m³ et un dépense de force motrice de 2,5 à 3,5 HP par 1000 m³ de gaz épuré. Dans certaines usines on a réussi à épurer les gaz à 0 gr. 010-0 gr. 011 par m³.

Au contraire avec le système d'épuration Beth par filtration sur des sacs on épure couramment à 0 gr. 001 de poussière par m³ de gaz avec une dépense de force motrice équivalente.

(2) Le gaz de hauts fourneaux a une composition qui oscille entre les limites ci-après :

CO₂ = 11 à 13 ; CO = 27 à 24 ; H = 2 à 5 ; Az = 60 à 55 ; CH₄ = 0,5 à 2%.

C'est la teneur en gaz combustible, oxyde de carbone et hydrogène, qui lui donne sa valeur, ainsi que sa puissance calorifique, qu'on détermine par la combustion d'une certaine quantité de gaz, un mètre cube par exemple. Cette puissance calorifique oscille entre 750 et 1.000 calories au mètre cube.

Des essais très suivis ont démontré d'autre part que pour produire un cheval heure il faut environ 5.000 à 6.000 calories dans une machine à vapeur et 2.200 calories dans un moteur à gaz.

On en conclut qu'il faut environ 2 mètres cubes à 2 m³ 5 de gaz de haut fourneau pour produire un cheval heure au moyen du moteur à gaz et 5 à 6 mètres cubes en brûlant ces gaz sous des chaudières alimentant des machines à vapeur.

mêmes usages que le gaz d'éclairage, c'est-à-dire au chauffage, à l'éclairage et à la production de force motrice dans des moteurs à gaz.

La première utilisation qui en a été faite a consisté à les brûler en

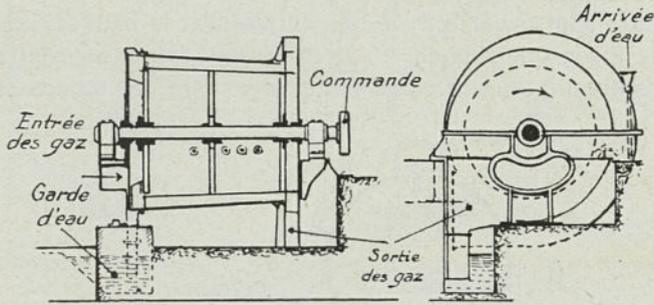


FIG. 96.

FIG. 97.

APPAREIL ROTATIF D'EPURATION DES GAZ
DESINTEGRATEUR THEISEN

Cet appareil brasse le gaz avec l'eau en projetant les poussières par force centrifuge. Il tourne à grande vitesse (400 à 500 t. p. minute). Il permet de réduire la teneur en poussière à 0 fr. 02 par m³ en utilisant 0 l. 75 à 1 l. d'eau par mètre cube de gaz. Il nécessite une puissance de 5 à 7,5 HP par 1.000 m³ de gaz épuré.

partie dans les appareils de chauffage du vent, et, pour l'excédent, sous les chaudières à vapeur. La vapeur ainsi produite servait d'abord à alimenter la soufflante, puis les monte-charges, etc.

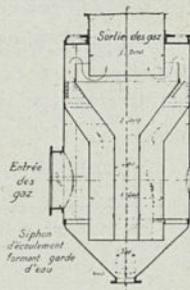


FIG. 98.

APPAREIL SEPARATEUR D'EAU

Sert à éliminer la majeure partie de l'eau entraînée après épuration.

Lorsque les gaz furent purifiés avant utilisation, on en fit une économie sérieuse, augmentant ainsi la vapeur et, par suite, la puissance disponible.

Mais ce fut surtout dans les moteurs à gaz que l'emploi de ce combustible purifié révolutionna la répartition de la force motrice. Cependant, pour que ces gaz puissent être appliqués aux moteurs à gaz, il faut que l'épuration en soit poussée très loin, car les poussières

qu'ils peuvent encore contenir sont de nature à encrasser les moteurs et à les mettre rapidement hors service (1).

Nous voici, maintenant, assez familiarisés avec le haut fourneau

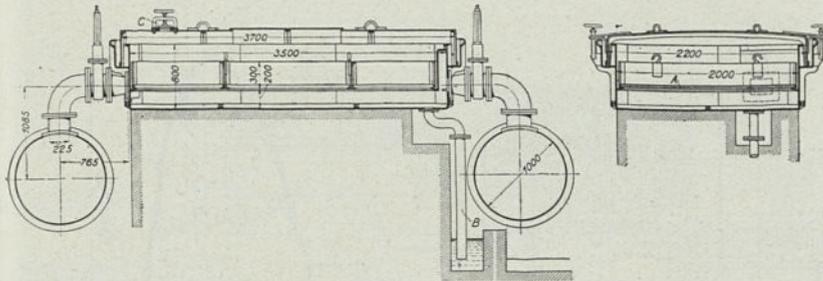


FIG. 99.
FILTRE A GAZ

Cet appareil sert soit à sécher complètement les gaz épurés, avant leur emploi dans des moteurs à gaz, soit à éliminer l'hydrogène sulfuré en faisant passer les gaz sur des matières déterminées par exemple un mélange de sciure de bois et d'oxyde de fer.

et ses divers organes accessoires, pour nous représenter les phénomènes qui s'y passent.

Théorie complète du haut fourneau. — Les matières, chargées au gueulard, rencontrent des températures croissantes à mesure qu'elles descendent dans la cuve et s'approchent de l'ouvrage.

De ce que ces matières subissent des transformations qui peuvent se résumer par les termes suivants : dessiccation, calcination, réduction, carburation et fusion, on a voulu déduire qu'il y avait des zones plus particulièrement réservées à chacune de ces opérations, et ces zones avaient été établies conformément aux indications portées sur la fig. 101.

Mais bien que cette conception renferme une part de vérité, elle ne représente pas la réalité des faits : les zones peuvent varier avec

(1) Les procédés d'épuration des gaz varient suivant qu'on veut du gaz moyennement épuré 0 gr.5 par m³ pour le chauffage, ou parfaitement épuré 0 gr.01 à 0 gr.001 de préférence pour les moteurs à gaz. Ils varient d'autre part suivant la quantité d'eau disponible et la force motrice nécessaire pour l'épuration. Le petit tableau ci-après donne quelques indications de comparaison.

Appareil utilisé	Tours d'arrosage et ventilateur	Theisen	Beth	Electro statique Cottrel
Epuration obtenue en grammes par m ³	0 gr.03	0 gr.01	0 gr.001	0 gr.05
Eau nécessaire par m ³ de gaz	5/6 l	4/5 l	1 l	0 l.
Puissance nécessaire par 1000 m ³ de gaz épuré	6 à 8 HP.	5 à 7,5 HP.	1,5/2 HP.	2,5/3,5 HP.

tous les fourneaux et, dans un même fourneau, avec les minerais qu'il a à réduire.

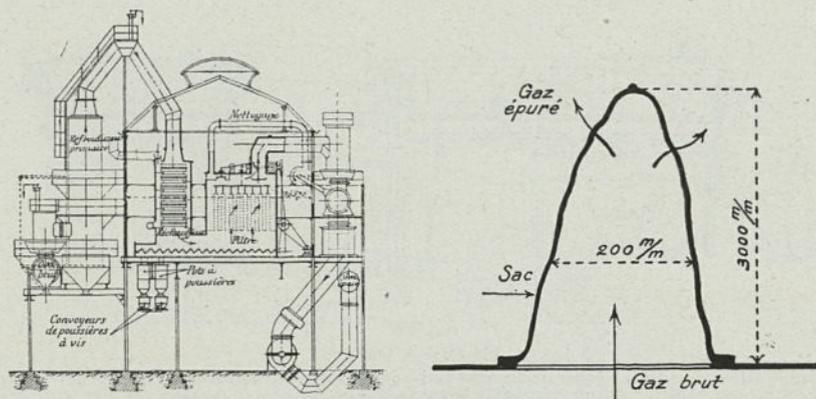


FIG. 100.

EPURATION A SEC PAR FILTRATION

La fig. de droite montre un sac filtrant en coton et la circulation théorique des gaz en cours de filtration. La fig. de gauche montre l'ensemble d'une installation d'épuration de gaz de Haut Fourneau, du système Beth. On peut y retrouver le refroidisseur primaire, le réchauffeur, la chambre des filtres avec les sacs filtrants, les ventilateurs de circulation des gaz et enfin les convoyeurs de circulation et accumulateurs de poussière.

Par ailleurs, la zone qui, pour nous, aurait le plus d'importance, celle de *réduction*, n'est rien moins que définie. A notre avis, elle s'étend sur toute la hauteur du fourneau.

Pour nous en convaincre, voyons comment on explique ce phénomène.

Nous avons dit que les minerais et le charbon sont versés par couches alternées.

Lorsque l'air insufflé par les tuyères arrive au contact du coke incandescent, tout se passe comme s'il se produisait presque uniquement du gaz oxyde de carbone ⁽¹⁾, s'il se formait même un peu de gaz carbonique, celui ci se dissocierait à cette haute température et donnerait du gaz oxyde de carbone avec le charbon en excès ⁽²⁾.

On peut donc dire que quelques centimètres au-dessus des tuyères il ne subsiste que de l'oxyde de carbone.

Cet oxyde de carbone peut se transformer en gaz carbonique au contact de l'oxygène. Mais l'oxygène n'existant plus à l'état libre, ce sont les oxydes de fer des minerais qui sont attaqués ou réduits, et le fer est mis en liberté ⁽³⁾.

Cette réduction du minerai de fer forme du gaz carbonique, qui rencontrant une couche de charbon reforme de l'oxyde de carbone ⁽²⁾ lequel peut recommencer le cycle ⁽³⁾.

(1) $C+O = CO$.(2) $CO_2+C = 2 CO$.(3) $CO+FeO = CO_2+Fe$.

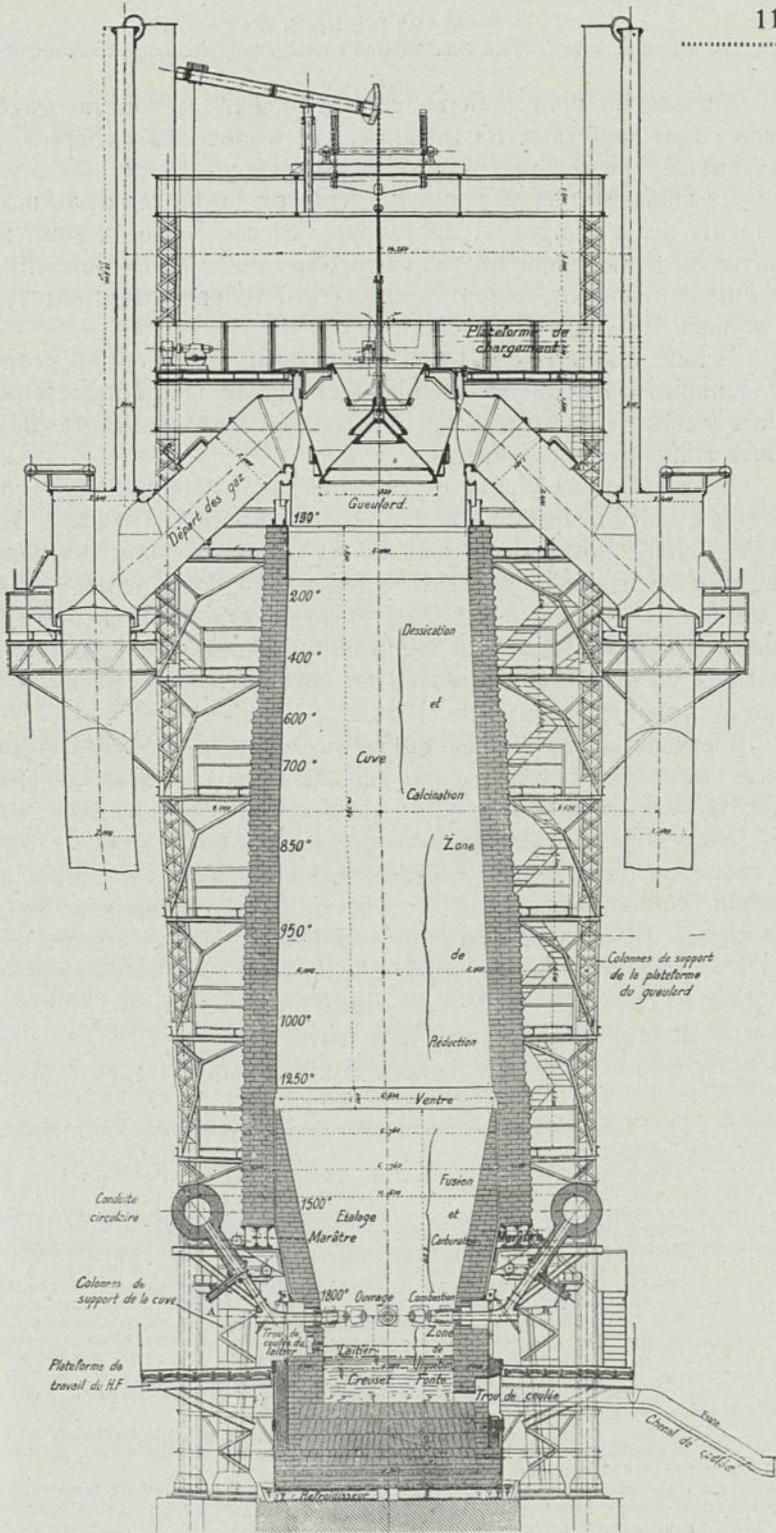


FIG. 101. — COUPE D'UN HAUT FOURNEAU MODERNE.

On conçoit donc qu'à un certain moment le courant gazeux qui s'élève doit renfermer un mélange, en proportions variables, de gaz carbonique, d'oxyde de carbone et d'azote provenant de l'air.

La masse solide, au contraire, renferme du fer réduit au milieu des éléments de la gangue et du fondant. Si ces éléments sont, naturellement ou artificiellement, en proportions telles qu'ils puissent former un corps fusible, ils coulent, goutte à goutte, entraînant le métal dans le creuset.

Il faut pour cela que les éléments du laitier soient en proportions convenables — ce qui se calcule — et que la température soit supérieure à celle de sa formation. (*Voir fig. 101 les températures des différentes zones du haut fourneau.*)

La température voulue est obtenue par la combustion du coke aux tuyères et par l'insufflation de l'air chaud quand c'est le cas⁽¹⁾. De sorte qu'en marche normale, on peut concevoir dans le haut fourneau deux courants : l'un gazeux à grande vitesse, dont l'origine est aux tuyères et qui monte en opérant la réduction du minerai qu'il rencontre; l'autre solide, à marche lente, qui comprend les minerais, le fondant et le charbon, va en s'enrichissant en fer, se liquéfie à la partie inférieure pour se transformer en fonte et laitier.

L'ensemble des solides forme une voûte au-dessus des tuyères. Cette voûte fond peu à peu par son intrados se reforme à l'extrados, grâce à la colonne des matières qui descend doucement du gueulard.

Nous voyons donc d'après ce qui précède que le principal agent de la réduction dans le haut fourneau est l'oxyde de carbone et non le carbone solide, comme nous l'avions indiqué au début pour simplifier les choses. Et nous pouvons dire encore que puisque l'oxyde de carbone se transforme en gaz carbonique lorsqu'il a agi sur l'oxyde de fer, la proportion entre ces deux gaz peut donner une indication sur la marche de la réduction dans le haut fourneau.

Ainsi l'absence complète d'oxyde de carbone dans les gaz sortant du

(1) Economie de coke par l'emploi de l'air chaud dans la réduction du minerai de fer au Haut-fourneau.

De prime abord, il semble que si la même quantité totale de charbon est employée, partie à l'intérieur du haut fourneau, partie à l'extérieur pour chauffer le vent, le résultat final doit être le même. En fait, le charbon brûlé à l'intérieur, l'est incomplètement sous forme d'oxyde de carbone, donc en dégageant moins de calories, que celui brûlé à l'extérieur pour chauffer le vent. Il s'ensuit que le charbon utilisé extérieurement pour chauffer le vent est trois fois plus efficace que celui brûlé à l'intérieur. De plus si l'on brûle moins de charbon à l'intérieur, on aura aussi moins de cendres à fondre et probablement moins de fondant à ajouter, donc une nouvelle économie s'ajoutant à la première. Enfin passant moins de matières pour une même quantité de fonte, on peut arriver à produire davantage dans le même appareil pendant un intervalle de temps déterminé. Les pertes de chaleur du rayonnement restant les mêmes, on conçoit que le chauffage du vent fait réaliser une nouvelle économie de charbon.

Il est presque superflu d'ajouter que l'afflux d'une grande quantité de chaleur au même point, par le soufflage à l'air chaud, augmente la température de combustion, ce qui facilite les réactions chimiques des corps en présence.

Il y a bien entendu une limite à l'économie réalisée par l'élévation de température du vent insufflé et cette limite résulte en particulier de la quantité de carbone indispensable à la réduction du minerai de fer.

gueulard, indiquerait que l'utilisation du carbone, pour la réduction, aurait été parfaite.

Ce n'est jamais le cas. Le rapport entre le gaz carbonique et l'oxyde de carbone oscille de 0.90 à 0.50, dans les conditions les plus défavorables (1).

Cette question est plus complexe qu'elle ne paraît : le minerai qui se trouve aux étalages, immédiatement au-dessus des tuyères, est bien en présence d'oxyde de carbone (presque pur) mélangé d'azote, mais il n'en est ainsi lorsqu'on s'approche du gueulard. Au fur et à mesure que le courant gazeux s'élève, il se charge en gaz carbonique, et l'on est obligé d'envisager l'action que peut avoir le mélange des deux gaz, oxyde de carbone et gaz carbonique, sur la réduction des oxydes de fer.

Des expériences ont démontré que l'action de l'oxyde de carbone sur les minerais, commence vers 200° sur les plus réductibles, et qu'elle augmente avec la température et la vitesse du courant gazeux. A 400°, la réduction est active pour tous les minerais.

D'un autre côté, le gaz carbonique donne sur le fer obtenu par réduction, une réaction inverse qui tend à reformer de l'oxyde de carbone et de l'oxyde de fer.

Ce phénomène commence aux environs de 400°, et devient très intense au rouge.

Par contre, si au lieu du gaz carbonique seul, on a un mélange composé de volumes égaux d'oxyde de carbone et de gaz carbonique, la réaction inverse cesse et on a uniquement la réduction.

Plus la température est élevée, plus il faut que la proportion d'oxyde de carbone soit *dominante* dans le mélange (oxyde de carbone, gaz carbonique) pour empêcher la réaction d'oxydation du fer réduit.

Mais on doit entendre aussi, qu'au rouge clair, l'action de l'oxyde de carbone pur sur le fer tend à l'oxyder à nouveau.

On doit conclure qu'il y a un équilibre entre les différents corps en présence : oxyde de fer, fer réduit, gaz carbonique et oxyde de carbone, mais que la réduction complète du minerai n'en peut résulter.

La réduction ne s'achève que grâce à l'action du carbone, à l'état pulvérulent, qui imprègne le minerai. Ce carbone provient en grande partie d'une réaction de décomposition de l'oxyde de carbone (2), qui se produit sur une assez grande étendue dans le haut fourneau, et d'une façon particulièrement intense aux points où la température oscille entre 400 et 450°.

$$(1) \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 0,7 \text{ à } 0,9 \text{ au maximum pour les fourneaux au coke.}$$

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} = 0,85 \text{ pour l'emploi du charbon de bois.}$$

$$(2) \quad 22 \text{ l. } 3 \text{ oxyde de carbone} = 22 \text{ l. } 3 \text{ gaz carbonique} + 12 \text{ gr. charbon avec un dégagement de } 3.144 \text{ calories par kilogramme de charbon.}$$

Ce phénomène semble transporter le carbone sous forme d'oxyde de carbone, de la région des tuyères où il prend naissance, vers le sommet de la cuve où il donne du gaz carbonique et du carbone. Il est appelé, pour cette cause, phénomène de *transfert du carbone*.

C'est grâce à lui, probablement, que la réduction complète du minéral s'achève et que le fer réduit, intimement mélangé au carbone et enrobé dans la gangue et le fondant, arrive dans la zone la plus chaude, où il fond sous forme de fonte.

Disons en passant, que c'est cette réaction qui donne lieu à la formation du dépôt de carbone ou garnissage sur les briques de la cuve.

Jusqu'ici, nous nous sommes bornés à ne faire mention que du fer et du carbone. Or nous savons que les minerais contiennent, outre les oxydes de fer, des oxydes d'autres métaux parmi lesquels prennent place les gangues ; que de plus, certains corps introduisent comme éléments le soufre et le phosphore, qui jouent un rôle important en métallurgie.

Nous allons d'abord examiner l'influence du haut fourneau sur les différents oxydes terreux ou métalliques, introduits avec la charge, et en tirer des règles pratiques pour sa conduite.

Parmi les oxydes de la gangue, la silice ou oxyde de silicium joue un rôle prépondérant ; en ce sens que l'oxyde de silicium est généralement réduit par le charbon, en plus ou moins grande proportion, et que le silicium se dissout dans le fer fondu ⁽¹⁾. Mais cette réduction de la silice ne s'opère qu'en présence du fer. Parmi les autres corps réduits, l'oxyde de manganèse donne du manganèse et les phosphates donnent du phosphore, qui se dissolvent tous deux dans la fonte ⁽²⁾.

Cependant, à la différence de la silice, les teneurs en phosphore et manganèse de la fonte obtenue, sont presque indépendantes de la marche du haut fourneau et résultent pour la plus grande part de la teneur des minerais.

Reste le soufre, qui est introduit par le sulfure de fer.

Pour cet élément, la quantité obtenue dans la fonte peut être complètement différente, suivant la conduite du fourneau pour une charge indentique.

La façon de régler la proportion de ces différents éléments s'appelle le réglage de l'allure du haut fourneau ou de l'intensité de l'action de réduction.

Si l'intensité de réduction est insuffisante dans le haut fourneau,

(1) $Si O_2 + 2C = Si + 2 CO$, ceci se passe en présence du fer.

(2) Tout le phosphore et le cuivre introduits dans la charge se retrouvent dans la fonte. Par contre, le tiers du chrome, de l'arsenic et du manganèse vont dans le laitier et les deux tiers seulement entrent dans la fonte. Le plomb et le zinc sont volatilisés et se retrouvent en grande partie dans les poussières du gueulard. Signalons cependant que le plomb empêche le grain de la fonte, de plus, il s'infiltré dans les briques du creuset et peut causer des accidents graves.

par manque de carbone par exemple, il subsiste du fer sous forme d'oxyde, lequel est réduit par le carbone du garnissage : le briquetage est en contact avec la scorie, aussi avec l'oxyde de fer en excès, et se « ronge » au détriment de la durée de l'appareil.

Une partie de l'oxyde de fer non réduit s'écoule avec le laitier qu'il colore en noir et une perte de fer s'ensuit.

La quantité de silicium réduit est plus faible, et la fonte en contient une moindre quantité. La fonte contient aussi plus de soufre ⁽¹⁾.

Au contraire, en augmentant l'intensité de la réduction, il se forme un garnissage protecteur; la presque totalité du fer est récupérée; il entre une plus grande quantité de silicium dans la fonte et une quantité moindre de soufre.

Ceci s'explique surtout par ce fait que lorsque le métal formé se liquéfie, le laitier emprisonne encore des parcelles d'oxyde de fer, qui sont réduites grâce à la haute température du creuset.

Pour régler l'intensité de réduction, on peut agir :

- 1° sur le rapport entre les charges de combustible et de mine ;
- 2° sur la température, la quantité et la pression du vent insufflé par les tuyères ;
- 3° sur la composition du laitier.

On se rend compte qu'en augmentant la quantité de combustible, par rapport à la charge de mine, on augmente la température du creuset et qu'il en résulte une augmentation de l'intensité de réduction. Comme conséquence : une augmentation du silicium, une diminution du soufre dans la fonte obtenue.

En surélevant la température du vent soufflé par les tuyères, on obtient le même résultat.

Enfin, en augmentant la teneur en chaux et en magnésie dans le laitier, c'est-à-dire en rendant celui-ci plus infusible, on augmente d'autant la température du creuset et par suite on a les mêmes résultats.

Ces différents moyens peuvent être employés tour à tour ou simultanément pour graduer l'effet qu'on vise.

La fonte est, suivant le cas, grise si elle contient beaucoup de silicium et si l'intensité de réduction a été poussée très loin; blanche dans le cas contraire; truitée dans les cas intermédiaires.

Lit de fusion. — Nous avons dit que les proportions de minerais, fondants et charbon, se calculent et qu'en particulier on dosait les éléments du laitier, de façon à influencer sur l'intensité de réduction.

Ce calcul se nomme le « calcul du lit de fusion ».

(1) $Fe S + Ca O + C = Fe + Ca S + CO$. Réaction de désulfuration du fer ou de désoxydation du calcium. Si la chaux est moins réduite, il reste du sulfure de fer (FeS). Dans le cas contraire, le sulfure de fer permet la formation de sulfure de calcium moins soluble dans le fer que dans le calcium.

Les éléments de ce calcul sont évidemment les analyses des minerais, fondants et charbon à employer, et celui de la fonte à produire.

Le laitier résulte des gangues, du ou des minerais, des éléments du fondant et des cendres du combustible.

Il ne peut être question de faire ici un calcul de lit de fusion, mais en principe on opère ainsi :

La quantité de minerai à employer par tonne de fonte résulte du rapport entre la teneur en fer de la fonte et celle du minerai, ou de la moyenne des teneurs des minerais, si on en mélange plusieurs⁽¹⁾.

La quantité moyenne de minerai étant trouvée, la répartition entre les différents minerais résulte, d'une part, des teneurs en phosphore et manganèse qu'on veut dans la fonte ; d'autre part, du laitier qu'on cherche à produire.

On peut aussi calculer la quantité⁽²⁾ de charbon à employer, mais

(1) Ainsi si l'on veut fabriquer la fonte phosphoreuse grise n° 1 du 4^e tableau, page 89 contenant 90,95 % de fer au moyen du minerai n° 12 du tableau, page 61, on voit qu'il faudra par tonne de fonte

$$90,95 \times 1.000 = 3.130 \text{ kg. de minerai.}$$

29

Mais le problème n'est pas terminé là, il faut ensuite examiner exactement ce qui entre dans le fourneau en détaillant les éléments, fer, silice, alumine, etc. résultant du poids de minerai ci-dessus et du poids de coke correspondant nécessaire.

On voit en particulier si les différents éléments alumine, silice, chaux, etc. sont en proportion telle qu'ils puissent former un laitier fusible et d'autre part si ce laitier correspond bien à la fonte qu'on veut fabriquer (voir note (1), page 117).

Si ces différents éléments ne concordent pas, on ajoute un fondant convenablement choisi, ou un minerai corrigeant le premier.

On recommence le calcul, en faisant intervenir le fer apporté par le coke ainsi que les cendres.

Ainsi pour l'exemple ci-dessus on aurait le tableau ci-après :

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Mn	S	Fe	P
Minerai	3,130	343	246	446	200	22	3,4	909,5	456
Coke	1.250	40	25	—	4	—	12,5	8	0,45
Total		353	244	446	204	22	15,6	917,5	456,45
Entrant dans la fonte		43	—	—	—	14	1,2	909,5	456,45
Entrant dans le laitier	904,4	240	244	446	204	8	14,4	8	—
Pour cent du laitier		34,4	26,8	42,9	22,6	0,9	1,6	0,9	—
Pour cent de la fonte		Si=2	—	—	—	1,4	0,12	90,95	4,56

On en conclut que les proportions du minerai sont telles qu'il exige un fondant calcaire, car la silice est en excès d'après l'analyse qui serait nécessaire pour une fonte de ce genre (le tableau page 117 indique pour cette fonte CaO = 46 % et non 22,6 % comme nous trouvons).

On refait donc les diverses opérations en ayant ajouté la quantité de castine voulue.

(2) La quantité de coke exprimée en kilogrammes nécessaire pour produire une tonne de fonte s'appelle *mise au mille*. Elle est variable avec la richesse et la réductibilité du minerai employé et pour des matières premières identiques avec la nature de la fonte à fabriquer. Elle est plus élevée pour la fonte grise que pour la fonte blanche. Toutes choses étant égales, elle dépend aussi du profil du haut fourneau.

Ci-dessous quelques chiffres entre lesquels oscille la mise au mille.

	40 0/0	Minettes 30 0/0
Fonte grise	4.000 à 4.450	4.250 à 4.300
Fonte blanche	900 à 1.000	4.050 à 4.250

en général, on prend cette quantité par comparaison avec d'autres fourneaux, en se contentant de tenir compte de l'apport des cendres dont la majeure partie entre dans le laitier.

Nous verrons comment le chiffre adopté est modifié, puis rectifié en cours de marche.

Quant au fondant, on en détermine la quantité nécessaire d'après l'analyse du laitier qu'on cherche à créer, qui, lui, correspond à la fonte à obtenir et à une température de fusion donnée (1).

Calcul de la force motrice. — Nous avons démontré que les gaz qui se dégagent du gueulard sont combustibles et peuvent être employés au chauffage du vent, à la production de la force motrice, au moyen de chaudières et machines à vapeur, ou de moteurs à gaz.

On peut exactement calculer la quantité de gaz produite d'après le charbon utilisé, aussi d'après quelques coefficients pratiques (4.500 mètres cubes de gaz par tonne de fonte produite en 24 heures).

Or, on sait quelles sont les proportions de gaz nécessaires pour les appareils de chauffage du vent (30 à 40%)⁽²⁾. On en déduit donc la quantité disponible pour produire de la force motrice et l'on définit ce qui manque ou excède en établissant une sorte de bilan de la force motrice. Les expériences montrent que l'utilisation des gaz dans les moteurs à gaz donne un excédent de gaz.

Cela s'explique par ce fait que pour produire une puissance d'un cheval-vapeur pendant une heure, il faut beaucoup moins de gaz en l'utilisant directement dans un moteur à gaz qu'en le brûlant sous des chaudières à produire de la vapeur utilisée ensuite dans une machine à vapeur.

Des calculs très simples permettent de se rendre compte qu'un haut fourneau produisant 100 tonnes de fonte par 24 heures peut

(1) Limites entre lesquelles oscillent les laitiers :
 Fonte grise : Silice, 28 à 35%; Alumine, 13 à 15%; Chaux, 40 à 55%; Oxydes métalliques, 0,5 à 1,5%; Soufre, 0,9 à 2,5%.
 Fonte blanche : Silice, 30 à 40%; Alumine, 17 à 10%; Chaux, 35 à 45%; Oxydes métalliques, 2 à 6%; Soufre, 0,5 à 1,30%;

Types de fontes et laitiers correspondants.

TYPE DE FONTE	Couleur	Carbone		P	Si	S	Mn	Fer	LAITIER							
		Graphi- tique	Com- biné						SiO ₂	Al ₂ O ₃	Oxydes Fer	MnO	CaO	MgO	S	
Hématite	Grise	—	—	0,052	1,93	0,025	2,85	—	28,5	14,12	0,39	0,96	52	2,22	2,2	
—	Grise	—	—	0,060	1,45	0,065	2,65	—	32,3	20,54	0,70	0,96	39,6	3,84	2,54	
Bessemer	Grise	3,5	—	0,08	2,00	0,06	1,00	93,35	32	13	0,50	0,30	48	3,7	2,5	
Cleveland	Blanche	3,00	—	1,40	0,70	0,12	1,40	—	33	13,00	2,00	3,25	46	4,...	1,5	
Phosphoreuse	Grise	2,90	0,25	2,80	2,80	0,045	0,43	—	39,4	13,3	0,95	0,52	41,25	3,65	1,...	
Thomas	Blanche	3,50	—	2,05	0,45	0,08	1,45	—	30,20	18,20	1,10	2,40	44,5	2,1	1,72	
Thomas froide	Blanche	—	—	1,80	0,35	0,55	1,35	—	36,80	20,36	2,07	0,96	35,17	3,5	—	
Moyenne Thom	Blanche	—	—	—	—	—	—	—	30	31	17,5	419	—	2,00	43	45
Spiegel	Blanche	4 à 5	—	<0,1	1,3	0,2	—	8	31	12	—	0,5	8	43	2,...	3,5
Ferromanganés	Blanche	5 à 7	—	<0,2	1,3	0,2	—	20	33	9	—	13	35	—	—	

(2) L'utilisation d'appareils perfectionnés pour le chauffage du vent permet de réduire à 20-25 % la quantité de gaz nécessaire à cet usage.

donner une puissance disponible de 2.750 chevaux-heures, après que tous les appareils accessoires (monte-charges, soufflantes, pompes, ponts etc.) du haut fourneau ont puisé l'énergie qui leur est indispensable⁽¹⁾. Si l'on tenait compte des gaz en excès que donnerait la batterie de fours à coke nécessaire à l'alimentation en charbon du même fourneau, la puissance disponible atteindrait 4.000 chevaux-heure. Or, beaucoup d'usines produisent 300, 400 et même 1.000 tonnes de fonte par jour. Il en résulte donc un excédent de force motrice énorme.

Cette puissance disponible peut servir à faire de l'éclairage, à mouvoir des tramways ou à faire fonctionner d'autres usines⁽²⁾, et c'est pourquoi on a pu dire assez judicieusement que, dans l'avenir, le haut fourneau pourrait être établi comme producteur d'énergie, la fonte et le laitier étant des produits accessoires.

Conduite du haut fourneau. — Jusqu'ici nous avons étudié le haut fourneau et ses conditions normales de marche, nous ne nous sommes point préoccupé de la façon dont cette marche était ordonnée pour obtenir un produit déterminé, non plus des incidents ou accidents qui troublent ce formidable engin d'industrie.

Disons d'abord qu'on nomme *allure normale* du haut fourneau, la résultante d'un ensemble de faits qui corrobore les données d'une fonte prévue.

Tout phénomène qui conduit à un changement, même momentané, de cet état de choses, est un *dérangement d'allure* dont l'aggravation peut amener l'arrêt, voire l'avarie du haut fourneau, au préjudice du produit devenu inutilisable.

L'allure du haut fourneau est caractérisée par un certain nombre de facteurs qui sont : le vent, au point de vue de sa quantité, de sa pression et de sa température ; le lit de fusion ou, plus souvent, la variation dans la quantité de charbon introduite par unité de fonte à obtenir.

L'examen de ces divers facteurs et leur influence sur l'allure de l'appareil nécessiteraient des in-quarto, car de multiples observations ont été enregistrées depuis des années dans les usines.

(1) D'après le chiffre pratique donné, 100 tonnes de fonte par 24 heures correspondent à 100×4.500 mètres cubes de gaz par 24 heures. Sur cette quantité 40% est nécessaire pour le chauffage du vent. Il en reste donc 60 % de disponible en 24 heures et par heure. 4.500×60

soit 11.250 mètres cubes de gaz. Or, pour produire 1 cheval-heure au moyen d'un moteur à gaz, il faut 2 m³ 5de gaz environ. On peut donc obtenir $\frac{11.250}{2,5} = 4.500$ chevaux-heure. En défalquant de cette puissance totale celle nécessaire

pour les monte-charges, les pompes, les soufflantes, l'éclairage et tous les services du haut fourneau lui-même, ainsi que celle correspondant à l'épuration des gaz, on obtient approximativement 2.750 chevaux.

On obtiendrait sensiblement le même résultat en partant de l'analyse du gaz produit et de sa puissance calorifique.

(2) Dans le cas des usines sidérurgiques complètes, la puissance en excès au haut fourneau est utilisée à l'aciérie, aux laminoirs, etc.

Notons en peu de mots que l'on analyse les gaz sortant du gueulard et les produits obtenus, qu'on regarde à l'intérieur de l'ouvrage au moyen d'œilletons placés dans l'axe des tuyères, qu'on écoute le bruissement du vent, examine la couleur, la viscosité et la cassure du laitier⁽¹⁾, la nature de la fonte au moment de la coulée et sa cassure après refroidissement.

De cet ensemble d'observations on conclut à la bonne ou mauvaise allure et on agit en conséquence pour la maintenir ou la modifier en vue du but qu'on se propose.

Certaines allures ont été nettement caractérisées. On connaît et on pratique l'allure froide, l'allure chaude ou extra-chaude⁽²⁾.

L'allure chaude s'emploie quand on cherche à obtenir une fonte grise très carburée. Elle nécessite un laitier réfractaire, du vent chaud, une consommation de charbon plus forte.

L'allure froide donne une fonte pauvre en carbone et silicium ; le

(1) Caractères des différents laitiers :

Les laitiers calcaireux ou basiques obtenus en allure chaude ou extra-chaude, renferment moins de 35% de silice. Ils sont épais, visqueux, ne filent pas, sont peu fluides et ont un aspect pierreux après leur refroidissement. Ils fusent dans l'eau. Ils contiennent du sulfure de calcium (Ca S) qui, à l'air, s'oxyde pour donner de l'anhydride sulfureux (SO₂) qui dégage une odeur de soufre.

Quand ces laitiers basiques renferment de l'alumine (Al₂ O₃) ils ont un aspect porcelanique. La magnésie, au contraire, rend ces laitiers très fluides et forme des silicates cristallisés.

Lorsque ces laitiers basiques résultent d'une allure chaude, ils sont blancs. S'ils résultent d'une allure froide, ils sont noirs.

Le sulfure de manganèse lui donne une coloration d'améthyste, tandis que le silicate de manganèse donne une coloration verdâtre. Le zinc et le titane lui donnent une coloration bleue.

Les laitiers siliceux ou acides, qui renferment plus de 35% à 40% de silice, sont filants, c'est-à-dire s'étirent en fils comme le verre, se solidifient rapidement et ont après leur refroidissement un aspect vitreux. Les couleurs sont de même ordre pour les mêmes agents.

(2) Pour obtenir une fonte grise très carburée et peu siliceuse, on marche en allure chaude, avec un laitier très réfractaire par excès de chaux (par exemple Si O₂ = 33%, Al₂ O₃ = 13 %, CaO+MgO = 52 % dont 42 % de chaux, oxydes métalliques 1 %).

Pour obtenir une fonte grise très carburée et très siliceuse, on marche aussi, en allure chaude, mais avec un laitier très réfractaire par excès d'alumine. (Le silicate d'alumine laisse une certaine quantité de silice libre qui est réduite à haute température par le fer en donnant du silicium.)

Pour obtenir une fonte blanche d'affinage peu carburée et peu siliceuse on marche en allure froide, avec un laitier très fusible et polybasique, c'est-à-dire comprenant chaux, silice, alumine, magnésie et beaucoup d'oxydes métalliques (par exemple : Si O₂ = 40%, Al₂ O₃ = 10 %, CaO+MgO = 46 % avec beaucoup de magnésie, oxydes métalliques 4 %).

L'incorporation du manganèse dans la fonte est délicate, car le minéral de manganèse n'est réductible qu'à haute température, il a de l'affinité pour la silice et l'oxyde de manganèse rend les laitiers fusibles.

Or obtenir une haute température nécessite un laitier réfractaire. L'oxyde de manganèse rendant le laitier fusible, l'allure chaude devient difficile.

On y arrive en marchant en allure extra-chaude avec un laitier réfractaire par excès de chaux et de magnésie.

Exemples de laitiers pour Fontes spéculaires	Fontes Spiegel	Ferro-Manganèse
Si O ₂	38 %	31 %
Al ₂ O ₃	10 %	8 %
CaO + MgO	48 %	47 %
Oxydes métalliques	4 %	15 %

Obtention d'une fonte très siliceuse et manganésée, type Bessemer.— C'est le problème précité où l'on libère la silice pour permettre sa réduction. On emploie une allure extra-chaude avec un laitier réfractaire par l'alumine, du vent très chaud et une grande quantité de coke. (Exemple ; Si O₂ = 35%, Al₂ O₃ = 20%, CaO+MgO = 44%.

Obtention d'une fonte blanche d'affinage phosphoreuse et manganésée, type Thomas.— On emploie une allure chaude mais avec laitier réfractaire par la chaux, du vent chaud et beaucoup de coke.

laitier correspondant est très fusible, le vent est moins chaud et moindre la consommation de charbon.

Accidents de marche. — Les dérangements d'allure⁽¹⁾ en plus qu'ils ont l'inconvénient de ne pas donner la fonte cherchée, peuvent, en s'aggravant, mettre l'existence du haut fourneau en danger.

Ces dérangements peuvent être dus à de mauvaises proportions du lit de fusion, à une insuffisance ou à un excès dans la quantité ou la température du vent insufflé.

On s'en rend compte en examinant les facteurs cités précédemment.

Ces dérangements d'allure peuvent se traduire par des phénomènes appelés : descente irrégulière des charges, accrochage, engorgement.

Ces phénomènes sont susceptibles de présenter chacun un caractère plus ou moins grave, dont la solution est d'autant plus aisée que la cause en a été trouvée plus tôt.

Si la cause reste obscure et que le phénomène s'accroît, il peut amener la « prise » en masse du haut fourneau et son arrêt définitif, avec toutes ses conséquences.

La descente irrégulière des charges, par exemple, peut uniquement provenir d'un chargement non uniforme au gueulard, tout le gros étant versé en un point déterminé où les gaz affluent au détriment des autres points.

Si l'on s'en aperçoit on corrige facilement l'erreur.

Dans le cas contraire, la marche du haut fourneau peut s'arrêter complètement, d'un seul côté, en produisant un *accrochage*, puis un *engorgement*.

Peur remédier à cet accident, on cherche à favoriser la réduction du côté où elle s'est arrêtée partiellement en soufflant davantage de ce côté. On dirige même sur l'endroit voulu des tuyères supplémentaires

(1) Les dérangements d'allures sont caractérisés par des laitiers noirs, des fontes moins carburées et une plus grande proportion d'oxyde de carbone dans les gaz du gueulard, qui deviennent ainsi plus combustibles.

Dans une marche trop rapide, les laitiers se forment prématurément, le minerai imparfaitement réduit arrive dans le creuset où il décarbure la fonte déjà formée en donnant un loup ferreux.

La fonte obtenue à la coulée est caverneuse, les laitiers s'enrichissent en oxyde de fer et la sole se recouvre d'une masse ferrugineuse qui peut augmenter jusqu'à englober tout le creuset.

Si le minerai descend trop rapidement et que le combustible soit en quantité insuffisante, la réduction est incomplète et le même accident que ci-dessus se produit par allure froide.

Si dans une marche en allure chaude on augmente progressivement la quantité de minerai, il se produit d'abord des fontes de moins en moins carburées, puis on passe à l'allure froide et, à la limite, on peut avoir un engorgement du creuset. Dès qu'on s'est rendu compte du phénomène on le pallie en diminuant la quantité de minerai de la charge et en augmentant la température du vent.

En allure extra-chaude, avec laitiers réfractaires très calcaires, il se forme des dépôts de calcaire qui peuvent engorger le creuset. Ce dernier phénomène est accentué quand on rapproche les tuyères opposées en les avançant vers le centre du creuset. On y remédie en agissant sur le lit de fusion pour rendre les laitiers plus fusibles et en éloignant du centre les tuyères.

dites tuyères de secours. Dans certain cas, on insuffle encore du pétrole ou d'autres matières inflammables destinées à activer la combustion et à réchauffer la partie refroidie en favorisant la fusion des gangues par formation d'un laitier très fluide.

Dans d'autres cas, une allure très chaude peut provoquer un déplacement de la zone, à haute température, qui détermine la réduction bien au-dessus des étalages.

Le fer obtenu par réduction à la partie extérieure des blocs de minerai s'agglutine et forme une véritable voûte solide, qui s'arcboute aux parois et empêche la descente des charges.

Cet accrochage doit être supprimé au plus vite par fusion ou



FIG. 102.

même mécaniquement en employant la dynamite si l'on veut éviter des accidents plus graves.

Parfois, des laitiers corrosifs arrivent à dissoudre les parois du creuset et à occasionner des *percées* de la paroi, donnant passage à la fonte. Ce dernier phénomène est excessivement dangereux.

Signalons enfin que des fuites d'eau provenant des tuyères ou de tout autre appareil de refroidissement, peuvent provoquer des engorgements, voire même l'explosion du haut fourneau, par suite de la production instantanée d'une très grande masse de vapeur.

Les causes de ce dernier accident, qui a parfois revêtu le caractère d'une véritable catastrophe, n'ont pas toujours pu être expliquées par suite de la disparition de tous vestiges (*fig. 102*).

Ensemble d'une usine à fonte. — Il nous reste, maintenant, à jeter un coup d'œil d'ensemble sur l'installation d'une usine à fonte.

Nous avons dit que les hauts fourneaux peuvent constituer à eux seuls une organisation homogène indépendante.

Cet ensemble devrait comprendre :

Des parcs à charbons et à minerais ;

Des fours à coke ;

Les hauts fourneaux proprement dits ;

Les appareils à chauffer le vent ;

Les machines soufflantes avec tous leurs services annexes épura-



FIG. 103.

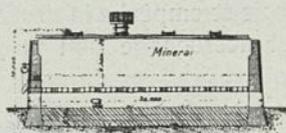


FIG. 104.

ESTACADE A MINERAI

Système permettant le déchargement direct des trains de minerais dans des cases, et la reprise, par en-dessous, avec wagonnets sur petites voies circulant dans des tunnels transversaux.

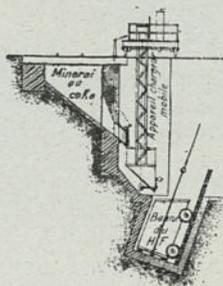


FIG. 105.

SILOS A MINERAIS OU CHARBON AVEC REPRISSE MECANIQUE.

Un appareil chargeur mobile permet de reprendre les minerais ou le charbon dans un silo quelconque et de les charger dans la benne circulant sur le skip ou monte charge incliné du Haut Fourneau.

tion des gaz, chaudières, moteurs à gaz, pompes, groupes électrogènes ;

Les halles de coulées ;

La granulation des laitiers ;

L'usine à ciment ou la briqueterie⁽¹⁾ ;

(1) Sans approfondir les questions de compositions de laitiers nécessaires à l'obtention de bons ciments de laitier, voici le processus :

1° Le laitier granulé contenant 25 à 30% d'eau est séché parfaitement, puis broyé finement.

2° On le mélange avec une certaine proportion de chaux vive et on en fait des briques qu'on peut utiliser à la construction après séchage.

Si l'on veut du ciment, les briques ci-dessus sont soumises à une cuisson jusqu'à commencement de fusion. On obtient ainsi ce qu'on nomme les clinkers.

Le *ciment portland de laitier* est un mélange de ces clinkers finement broyés avec une certaine proportion de laitier granulé, séché et broyé provenant de la première opération.

Le *ciment de laitier ordinaire* est constitué par du laitier granulé séché, mélangé d'une certaine proportion de chaux, broyé finement et ensaché.

Voir page suivante quelques chiffres pratiques sur les ciments de laitier.

Les dépôts de fonte, de briques pour le haut fourneau et les cowers ;

Les dépôts de terre et de sable pour le bouchage, l'atelier de réparation, etc.

Nous avons expliqué déjà que dans une telle organisation, les manutentions jouent un rôle primordial, eu égard aux quantités mises en jeu. Il faut donc prévoir de grandes voies de communication avec roulage circulaire, et des moyens de chargement et de déchargement automatique. (*Type d'estacades et de trémies, fig. 103, 104 et 105*).

Il faut aussi que l'ordonnance des divers appareils soit rationnelle,

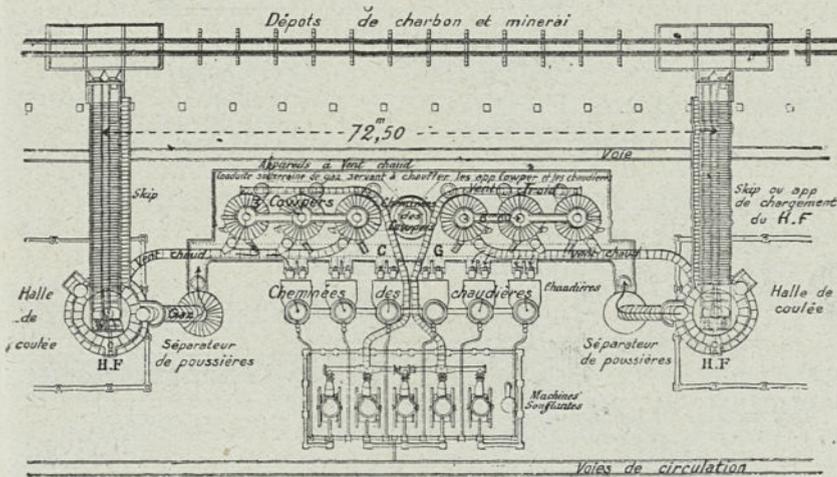


FIG. 106.

DISPOSITION D'ENSEMBLE D'USINE A FONTE.

que pour leur réparation l'accès en soit facile, et cependant que, pour un tel ensemble, les frais d'installation et de conduite ne soient pas trop onéreux.

Ainsi, les appareils à chauffer le vent doivent être près du haut fourneau pour éviter les pertes de chaleur, près des machines soufflantes pour éviter de trop longues tuyauteries, et par suite des pertes

(1) Analyse d'un bon ciment de laitier :

Si O₂ = 26 à 27 % Ca O = 47 à 48 Al₂ O₃ = 14 à 15 Mg O = 1
S = 0,5 à 1 Fe₂ O₃ = 1 Mn O = 1

Proportions moyennes pour 1.000 kg. de ciment de laitier :

Laitier 720 à 725 kg. Chaux 265 à 270 kg.
Sulfate 10 à 11 kg. Poussier de coke 16 à 20 kg.

de charges, etc. Il faut aussi que les appareils à chauffer le vent ou les soufflantes puissent exceptionnellement servir à l'un ou l'autre des fourneaux au moyen de jeux de vanes et de communication.

Enfin il faut toujours prévoir l'extension de l'usine par l'adjonction de nouveaux hauts fourneaux.

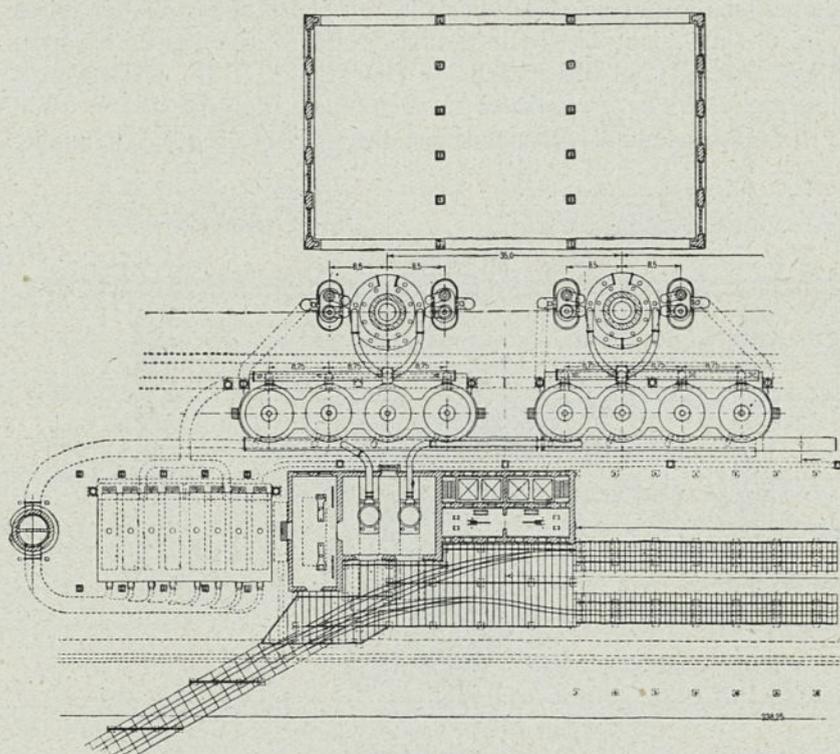


FIG. 107.

DISPOSITION D'ENSEMBLE D'USINE A FONTE.

Halle de coulée commune aux deux Hauts Fourneaux et placée au centre et au-dessus du plan. On distingue les deux sacs à poussières pour chaque Haut Fourneau, la conduite circulaire et son raccordement à la conduite de vent chaud alimentée par les quatre appareils à vent chaud en ligne. On voit également les soufflantes, les batteries de chaudières, les voies de raccordement aux estacades, etc.

Les schémas des fig. 106 et 107 montrent la réalisation de plusieurs de ces conditions.

On verra dans la suite la liaison du haut fourneau exceptionnellement avec des fonderies de fonte et couramment avec des aciéries.

RESUME DU CHAPITRE V

Le haut fourneau est l'appareil dans lequel le minerai de fer est transformé en fonte par réduction au moyen du coke.

La forme générale du vide intérieur du haut fourneau est celle de deux pains de sucre retournés ou troncs de cône, accolés par leur base et prolongés à la partie inférieure par une partie cylindrique.

La partie cylindrique inférieure, nommée creuset, est celle où se rassemblent à l'état liquide la fonte, produit cherché, et au-dessus d'elle le résidu ou laitier (résultat de la fusion des gangues et du fondant).

Le creuset porte à la partie inférieure un trou normalement bouché, dit trou de coulée de la fonte, par lequel on recueille la fonte produite.

Au-dessus du niveau maximum que peut atteindre la fonte, un autre trou, dit chio ou trou de coulée du laitier, sert au départ des laitiers.

Au-dessus du trou de coulée des laitiers, des ouvertures, nommées embrasures, laissent passer les tuyères à vent, ou plus simplement tuyères, qui permettent l'injection de l'air nécessaire à la combustion du carbone.

L'endroit du fourneau où débouchent les tuyères se nomme l'ouvrage : c'est là que se passent les réactions les plus vives du haut fourneau.

Au-dessus, on a les étalages, puis le ventre (partie la plus large du haut fourneau), la cuve et le gueulard.

C'est par le gueulard qu'on déverse les minerais, le combustible et le fondant, et c'est aussi par là que s'échappent les divers gaz résultant de l'air introduit après son action sur le coke.

Le chargement du haut fourneau se fait, soit au moyen de petits wagonnets qu'on monte avec des ascenseurs, ou monte charges verticaux hydrauliques, à vapeur ou électriques, et que des hommes déversent directement au gueulard.

On peut aussi avoir des chargements complètement mécaniques par bennes circulant sur des monte-charge inclinés, ou skip, et se déversant dans la cuve sans le secours de l'homme.

Enfin, les hauts fourneaux récents sont chargés par des

bennes-trémies qui, remplies aux fours à coke ou à la mine, se déversent directement dans le fourneau.

La fonte obtenue est coulée soit en gueuses, soit en poches.

En gueuses, elle peut être refondue pour moulage ou pour acier.

En poches, on peut la transporter liquide à l'aciérie ou la couler directement dans des moules.

Le laitier est coulé liquide en poches sèches ou granulé, c'est-à-dire coulé dans l'eau.

On peut le déverser liquide au dépôt ou crassier, ou le laisser se solidifier et le mettre en dépôt à l'état solide.

Le laitier granulé peut être mis en dépôt ou transformé en briques de laitier ou ciment de laitier.

Le vent est envoyé au haut fourneau au moyen de machines soufflantes à vapeur, à gaz ou électriques.

Il entre dans le haut fourneau à l'aide des tuyères refroidies par un courant d'eau.

Avant d'entrer au haut fourneau, le vent est chauffé dans des appareils dits appareils à chauffer le vent (Whitwell ou Cowper).

Les gaz sortant du gueulard sont encore combustibles, on les capte au moyen de tuyauteries de gros diamètre et on les purifie pour enlever les poussières et l'eau qu'ils entraînent.

Les gaz purifiés sont utilisés comme combustible, soit dans les appareils à chauffer le vent, soit pour la production de force motrice, en chauffant des chaudières qui produisent de la vapeur, ou directement dans des moteurs à gaz.

L'oxygène de l'air introduit par les tuyères est immédiatement transformé au contact du coke en gaz carbonique aux tuyères. Au-dessus des tuyères, le gaz carbonique rencontre un excès de charbon et se transforme en oxyde de carbone. Ce dernier gaz est combustible, il s'attaque à l'oxygène des oxydes de fer du minerai pour libérer le fer et reformer du gaz carbonique. Ce dernier gaz, rencontrant une nouvelle couche de charbon, donne de l'oxyde de carbone, et le cycle recommence.

Au-dessus de l'ouvrage, on peut donc concevoir qu'on a une masse dans laquelle le fondant à haute température, le fer réduit entouré de sa gangue et le charbon voisinent.

Le laitier se forme et commence à fondre entourant chaque grain de fer d'une gaine protectrice au passage des tuyères où le tout acquiert une température plus forte, se liquéfie et se rassemble dans le creuset.

Là, il se produit une séparation très nette par différence de densité et le laitier surnage la fonte.

Le calcul des proportions de minerais et de charbon à adopter pour une fabrication de fonte donnée s'appelle le calcul du lit de fusion.

La fonte contient du carbone, du silicium, du manganèse, du phosphore, du soufre et parfois d'autres éléments.

Les teneurs de ces différents éléments dépendent, et des minerais employés, et de l'allure du haut fourneau.

L'allure influe surtout sur les teneurs en carbone, silicium et soufre.

L'allure chaude produite par un excès de coke, augmente la teneur en silicium et en carbone dissout, elle diminue la teneur en soufre.

L'allure froide diminue la teneur en silicium, augmente la teneur en soufre ; elle peut provenir d'un excès de mine ou de vent trop froid.

L'allure normale est celle correspondant à une production de fonte déterminée.

Les accidents de marche se produisent lorsque l'allure change d'une façon anormale, et que le fourneau s'échauffe ou se refroidit d'une façon exagérée. Ils peuvent être plus ou moins graves et comprendre l'accrochage, la percée, le loup et même la prise-en masse du creuset.

Il peut aussi arriver qu'un haut fourneau fasse explosion, soit par suite d'une arrivée d'eau inopinée, soit pour des causes encore inexplicables.

L'ensemble d'une usine à fonte peut comprendre : les parcs et estacades à minerais et charbons, les fours à coke, les hauts fourneaux et leurs accessoires, appareils à chauffer le vent, machines soufflantes, appareils d'épuration des gaz, halle de coulée, station centrale de machines et parc à fonte.

Si le nombre des hauts fourneaux est grand, l'amenée des matières premières (minerais et charbon) exige une véritable gare de chemins de fer avec un très grand nombre de voies très longues.

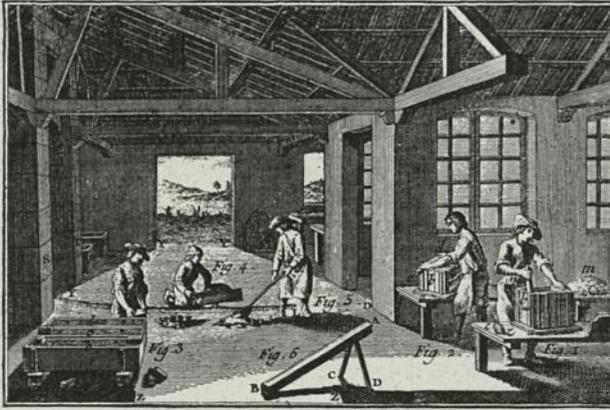


FIG. 108.

MOULAGE EN SABLE POUR LA COULÉE DE LA FONTE
 Ouvrier 1 tassant le sable; ouvrier 2 enlevant le sable en excès
 d'un châssis; ouvrier 3 chargeant les châssis de fonte pour
 éviter leur séparation à la coulée; ouvrier 5 mouleur; B, C, D,
 chevalet pour l'ébarbage des objets creux.

CHAPITRE VI

Où le lecteur apprendra à connaître plus particulièrement le produit fabriqué au Haut-Fourneau et sa transformation en objets de formes variées par le moulage et la Fonderie.

Dans le précédent chapitre nous avons étudié le problème de l'obtention de la fonte et l'appareil industriel qui sert à la produire : le haut-fourneau.

Nous avons aussi indiqué, rapidement il est vrai, qu'on produisait différentes espèces de fonte, en particulier la grise, la truitée et la blanche.

Mais nous nous sommes bien gardés d'approfondir cette question dont nous avons réservé l'étude pour ce chapitre.

Les Fontes. — Un mot tout d'abord sur les fontes en général, et sur l'influence de divers éléments : carbone, silicium, soufre, phosphore, etc... sur ses propriétés.

Fontes grise et blanche. — Les qualités de la fonte sont très différentes suivant qu'il s'agit de la fonte grise ou de la blanche.

Toutes les deux peuvent se mouler, mais tandis que la fonte grise est dure, résistante, se laisse facilement limer ou travailler à l'outil, la blanche, au contraire, est cassante, ne se laisse pas entamer à l'outil ni limer.

Il s'ensuit qu'on peut employer la fonte grise lorsqu'on doit obtenir des pièces résistantes pouvant être terminées au moyen de machines-outils : raboteuses, tours, perceuses, etc.

La fonte blanche ne peut être employée pour la construction (sauf cas exceptionnel) ⁽¹⁾ elle est destinée à être transformée en acier par exemple.

Etant données ces différences, un des premiers problèmes qui a tenté les chercheurs fut la transformation de la fonte blanche en fonte grise.

Pour nous permettre d'approfondir cette question, revenons sur les caractères distinctifs des fontes grise et blanche.

Nous avons vu que de deux fontes grise et blanche obtenues dans un même fourneau, la grise est plus carburée (contient plus de carbone) et plus siliceuse (contient plus de silicium) que la blanche.

Plus carburée est insuffisant comme caractère pour la fonte grise. Il y a lieu de préciser qu'elle contient une plus grande proportion de carbone libre ou graphite qu'on peut distinguer à l'œil nu.

Ainsi, on peut fort bien avoir deux fontes, l'une grise et l'autre blanche contenant *la même quantité totale* de carbone. Mais pour la *grise*, la proportion de *carbone libre* ou graphite est beaucoup plus grande que dans la *blanche* où la majeure partie du *carbone* est *combinée* avec le fer et n'apparaît pas dans l'aspect de la cassure.

Passage de la fonte blanche à la fonte grise. — Des recherches très précises ont permis de dévoiler l'influence du silicium sur la nature de la fonte obtenue.

On peut la résumer comme suit :

Le fer fondu à haute température dissout le carbone. Lorsque l'on refroidit le tout, le carbone incorporé ou combiné au fer n'apparaît pas et le métal est à cassure blanche.

Le silicium a aussi la faculté de dissoudre le carbone à haute température, et cela avec beaucoup plus d'avidité même que le fer auquel il prend son carbone. Mais à la différence du fer, le silicium ne dissout pas le carbone à froid.

De sorte que si l'on a une fonte produite à très haute température c'est-à-dire contenant beaucoup de silicium, elle dissoudra beaucoup de carbone. Mais au refroidissement le silicium abandonnera sous forme de graphite le carbone qu'il aura dissous. Ce carbone abandonné par le silicium ne peut plus être dissout par le fer, la température étant trop basse.

Si cette explication est vraie, on arrive à cette conclusion qu'en incorporant du silicium à une fonte blanche, la laissant fondre et refroidir lentement, on doit obtenir une fonte grise.

Or ce fait est parfaitement exact et il est couramment utilisé dans les fonderies.

(1) Nous faisons allusion ici à la fabrication des objets en fonte malléable qui, comme nous le verrons ultérieurement sont coulés en fonte blanche, et d'autre part à l'exécution de pièces très dures résistant à l'usage comme des bandages pour meules de broyeurs, des plaques d'usure pour broyeurs, etc...

Nous voyons donc l'influence primordiale du carbone et du silicium sur les fontes eu égard à leur nature grise ou blanche et par suite sur leurs propriétés physiques et mécaniques.

Fonte grise, se lime facilement, se travaille aux outils, est résistante, donc utilisable en construction.

Fonte blanche, inutilisable en construction.

Il nous faut dire que le silicium, indépendamment de son rôle ci-dessus défini, a une influence capitale sur la résistance des fontes.

Rappelons que cette résistance est caractérisée par l'effort en kilogrammes qu'il faut déployer pour rompre des barreaux coulés avec la fonte à essayer ⁽¹⁾.

On a constaté à ce point de vue que la résistance de la fonte

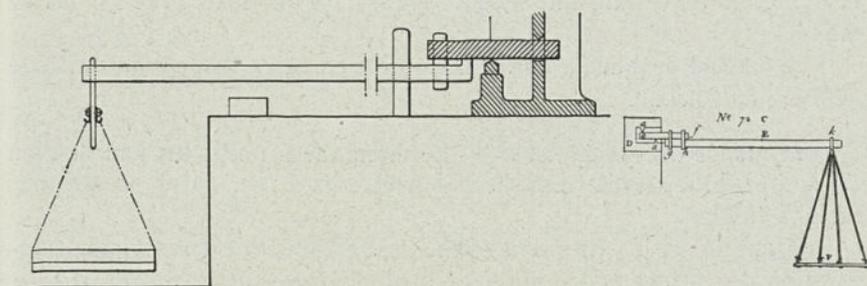


FIG. 109.
MACHINES D'ESSAI DE FLEXION DES FONTES.

(1) Dimensions des barreaux d'essai.

Traction. — Pour ces essais, on fait des éprouvettes à section carrée ou ronde de 20 m/m de côté ou de 20 ou 30 m/m de diamètre dans la partie faible. La traction se fait sur des parties coniques ou des œils venus de fonte.

Flexion. — On utilise pour ces essais des barreaux carrés de 40 m/m de côté et de 500 m/m de longueur.

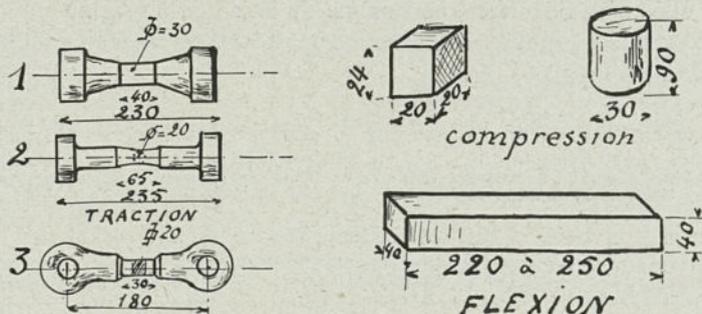


FIG. 110.
ÉPROUVETTES DE TRACTION, FLEXION ET COMPRESSION
POUR LES ESSAIS DES FONTES.

Compression. — Barres de section ronde ou carrée de 15, 20, 25 ou 30 m/m de côté ou diamètre avec une hauteur égale à 1, 2 ou 3 fois le côté ou diamètre de la base.

Dureté. — Mesurée par des essais de perçage.

Choc. — Barreau carré de 40 m/m de côté et 220 à 250 m/m de longueur à placer entre 2 couteaux espacés de 160 m/m, mouton de 12 kg. tombant de 40 cm. de haut au milieu des appuis, hauteur augmentée de 5 cm. chaque fois jusqu'à rupture. Poids de l'enclume supportant les couteaux, 800 kg. minimum.

croît avec la teneur en silicium jusqu'à 1,5 à 2% ⁽¹⁾ et qu'elle décroît ensuite. ⁽²⁾

D'autres éléments incorporés dans la fonte volontairement ou non ont une telle influence sur sa résistance et son emploi que nous allons les passer rapidement en revue.

Influence du phosphore. — Le phosphore rend les fontes fluides à chaud et par conséquent favorise les moulages délicats. Par contre, plus la teneur en phosphore est grande et plus les fontes sont cassantes à froid. Il est donc des cas où l'on sacrifie l'une des propriétés (résistance par exemple) en vue d'en obtenir une autre (fluidité). ⁽³⁾

Influence du soufre. — Le soufre ⁽⁴⁾ a une influence néfaste sur la fonte. Il lui donne une peau rugeuse, caverneuse. Elle se moule mal.

Si elle est destinée à être transformée en acier, son action doit être évitée à tout prix.

Influence du manganèse. — Le manganèse pallie un peu l'action du soufre qu'il semble masquer. Il peut exister en toutes proportions dans la fonte.

Étant donné les différents éléments qui peuvent entrer dans la composition des fontes et les modifier profondément, étant donné, d'autre part, les usages multiples et variés auxquels on peut l'employer, une classification précise des diverses fontes est indispensable.

Mais les divers facteurs qui interviennent pour différencier les fontes, ont rendu cette classification délicate.

Classification des fontes. — A la vérité il existe plusieurs classifications dépendant soit de leur composition chimique, soit de l'emploi auquel elles sont destinées, soit même de leur lieu d'origine.

Nous sommes obligés d'indiquer ces classifications au moins dans leurs grandes lignes.

(1) Une fonte contenant 1,5 à 2 % de silicium, 0,90 % de carbone combiné, 0,50 % de manganèse et moins de 0,08 de soufre et de 0,3 % de phosphore, se travaille sans difficulté et résiste à 20 kg. par m². Pour augmenter la résistance, il faut réduire encore le soufre et le phosphore.

(2) Chiffres de résistance, des fontes suivant leur nature grise ou blanche :

	Chiffres moyens	Fonte grise	Fonte blanche
Allongement	0,5 à 0,7 %	0,70	0,5
Traction	13,5 à 15 kg. par m ²	12 kg.	16 kg.
Flexion	25 à 30 kg. par m ²	—	—
Compression	75 kg. par m ²	70 kg.	90 kg.
Choc	30 kilogrammètres	—	—

(3) Pour la poélerie, les marmites minces, on utilise des fontes tenant jusqu'à 1,5 à 2 % de phosphore.

(4) L'arsenic qui est à éviter en général favorise également la fluidité. Ainsi avec des fontes contenant 2 à 3 % d'arsenic on peut mouler de véritables dentelles de métal. On a fabriqué ainsi des bijoux de fonte dits bijoux de Berlin.

D'après la composition chimique. — Si l'on s'en tient à la composition chimique seule, on a ⁽¹⁾ les fontes très pures en phosphore et soufre ou fontes hématites ; les fontes à teneur moyenne en phosphore ; les fontes phosphoreuses et enfin les fontes dites spéciales, tenant un élément prédominant, silicium, manganèse, etc., appelées ferro-silicium, ferro-manganèse, etc.

D'après l'emploi. — La classification d'après l'emploi comporte la catégorie des fontes de moulage et celles des fontes d'affinage.

Suivant le lieu d'origine. — Enfin la classification d'après le lieu d'origine est tout à fait factice et peut donner lieu à des mécomptes.

(1) Tableau de fontes classées d'après la composition chimique, mais comportant cependant le numéro à titre d'indication.

I. Fontes hématites au bois	N°	Cgr	Cc	Ct	Si	Mn	Ph	S	Qualité
De Suède :									
Fagersta	3	3,5	1	4,5	0,85	4,00	0,03	0,01	Tenace
Finspong	4	2,2	1,7	3,9	0,95	0,2	0,05	0,10	
Dannemora	3	3,6	1	4,6	0,35	traces	0,02	0,02	
Anglaises :									Très tenace
1	1	4,00	0,64	4,64	0,47	traces	0,28	traces	
2	2	4,02	1,03	5,05	0,46	traces	0,15	traces	
Française	blanche spéciale	0,10	6,50	6,60	0,58	4,30	traces	traces	Tenace
Allemande		5	2,79	0,55	3,34	0,7	4,1	0,18	
II. Fontes hématites au coke									
Anglaises :									
Middlesbrough	1	3,35	0,35	3,70	2,67	1,25	0,145	0,045	
Harrington	1	3,92	0,45	4,07	3,05	0,25	0,04	0,025	
Whitehaven	1	2,24	traces	2,24	2,77	0,07	0,05	0,01	
Risdale	3	2,70	0,9	3,60	1,30	1,05	0,01	0,04	
Allemande		4,1	0,4	4,5	2,50	1,60	0,07	traces	
Françaises									
Trignac	1	3,55	0,40	3,95	3,5	1,30	0,065	0,03	
Boucau	1	3,55	0,35	3,9	2,2	1,45	0,07	0,01	
III. Fontes phosphoreuses									
Anglaises :									
Type Cleveland	3	2,15	0,65	2,80	1,80	0,60	1,17	0,40	
Anglaises spéciales pour Fonderies ..									
Coltness	1	3,45	0,435	3,585	2,285	1,58	0,98	0,012	
Gardsherrie	1	3,26	0,51	3,77	3,07	2,04	0,87	0,018	
Glegarnock	1	4,10	0,45	4,25	3,00	1,55	1,25	0,03	
Eglinton	1	3,05	0,65	3,70	2,85	2,10	0,95	0,04	
Clarence	1	3,39	0,43	3,52	2,52	0,68	1,49	0,055	
Langloan	1	3,40	0,46	3,86	2,93	1,62	0,75	0,044	
Allemande :									
Phœnix	3	3,42	0,47	3,29	2,12	1,50	0,90	traces	
Luxembourgeoise :									
3	3	3,448	0,479	3,927	1,409	0,784	1,503	0,045	
4	3	2,97	0,38	3,35	1,82	0,54	1,85	0,004	
Françaises :									
Marnaval	1	2,78	0,51	3,29	2,28	0,67	0,81	0,07	
3	3	2,81	0,61	3,42	1,56	0,9	1,00	0,03	
4	4	2,48	1,07	3,25	1,54	0,76	0,9	0,03	
1	1	2,99	0,34	3,33	2,25	0,48	1,80	traces	
2	2	2,09	0,39	2,48	2,19	0,38	1,79	0,03	
Moselle	3	2,58	0,43	3,01	1,63	0,29	1,83	0,09	
truitée grise		1,67	1,20	2,87	0,74	0,17	1,75	0,18	As = 0,15
Eurville (au bois)	blanche	0,20	3,60	3,80	1,25	—	0,75	traces	
Longwy (moulage)	1	0,5	3,8	4,30	3,00	0,6	1,5	0,03	
2	2	0,3	3,5	3,80	2,50	0,4	1,3	0,03	Tenace
Trignac (Cleveland)	3	0,50	3,35	3,85	3,00	0,9	1,00	0,06	
Semi-phosphoreuses pour additions pour moulages mécaniques	1	0,30	3,25	3,55	2,50	1,20	0,30	0,03	Tenace Résistante
4	4	0,45	3,05	3,50	1,35	1,30	0,30	0,08	

Elle résulte de réputations anciennes concernant des produits impeccables étendus à toute une région, exemples : Fontes au bois de Suède, Fontes Cleveland, Fontes phosphoreuses de l'Est, etc.

D'après le grain. — Parmi ces fontes et pour une classe donnée, on peut encore avoir des variations qu'on a caractérisées par le grain de la fonte. Cet aspect porte un numéro d'autant plus petit que la quantité de graphite est plus grande.

Ce dernier moyen a même servi presque exclusivement aux premiers fondeurs qui y attachaient une importance primordiale que les progrès de la chimie ont permis de tempérer.

Les numéros sont ceux de 1 à 4 ou de 1 à 6 suivant les régions.

On peut dire que pour une fonte produite avec des minerais identiques, dans un même fourneau, en variant l'allure au fur et à mesure que le numéro augmente pour passer de 1 à 6 par exemple, le carbone graphitique passe d'un maximum pour le numéro 1 et décroît régulièrement jusqu'au numéro le plus élevé. Le carbone combiné augmente au contraire du numéro 1 au numéro 6.

Le silicium passe du maximum du numéro 1 pour arriver au minimum au numéro six et le manganèse diminue également. Enfin, le soufre augmente depuis le numéro 1 correspondant à la fonte la plus chaude jusqu'au numéro 6 qui est la fonte la plus froide ⁽¹⁾.

Nous disons qu'on attachait autrefois au grain une importance primordiale aujourd'hui atténuée à cause des progrès chimiques.

C'est en effet flagrant si on se souvient que le silicium a permis de passer d'une fonte grise à une fonte blanche.

On en conclut même que des mélanges de fontes d'analyses connues en proportion convenable peuvent permettre l'obtention d'une fonte déterminée impossible à obtenir directement et susceptible d'avoir des propriétés toutes spéciales.

Seconde fusion. — Ceci est à la base de la *seconde fusion* des

(1) Analyse de quelques fontes hématites classées par numéros.

N ^{os}	Cg	Cc	Ct	Si	Mn	P	S	Cassure
1	3,8	0,45	4,25	3,5	4,7	0,06	0,015	Cassure noire, gros grains chargés de graphite
2	3,75	0,50	4,25	3,00	4,7	0,06	0,018	Cassure plus claire, gros grains chargés de graphite.
3	3,7	0,50	4,20	2,5	4,7	0,06	0,025	Grains moyens, gris foncé allant jusqu'au noir.
4	3,6	0,55	4,15	2	4,6	0,05	0,028	Grains fins, gris et serrés.
5	3,4	0,60	4,00	1,70	4,5	0,05	0,032	Grains fins, gris clair très serrés.
6	3	0,70	3,70	1,5	4,3	0,05	0,045	Cassure grise mouchetée de blanc déjà truitée.

Voir également tableau (2) pages 88 et 89 chapitre précédent.

fontes, par opposition à la première fusion qui correspond à la production au haut fourneau.

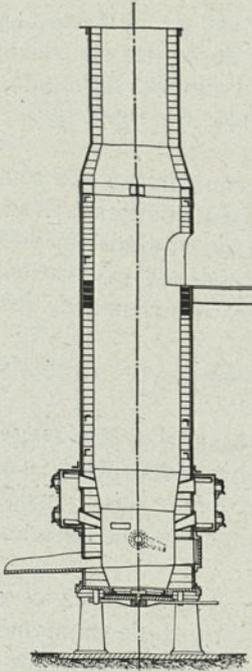


FIG. 111.

COUPE D'UN CUBILLOT NORMAL

On y voit le plancher de chargement et le gueulard, ou ouverture de chargement, surmontée d'une cheminée; la boîte à vent avec ses deux rangées de tuyères, le trou de coulée du laitier et sa goulotte, le fond du creuset mobile, pour permettre le vidage du cubilot à la fin de la journée de coulée.

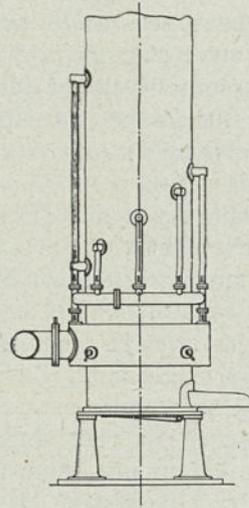


FIG. 112.

CUBILOT GREINER

Ce croquis montre la disposition en hélice de la série de tuyères de récupération.

Ces deux modes correspondent à deux principes tout différents pour l'utilisation des fontes par moulage, soit au sortir du haut-fourneau (première fusion), soit après une seconde fusion dans un petit four à cuve appelé « cubilot » où l'on peut procéder aux mélanges dont nous avons effleuré le sujet ⁽¹⁾.

Le moulage en première fusion est très délicat, d'une part à cause de la variation de composition de la fonte sortant du haut-fourneau pour des causes souvent très variables.

D'autre part, à cause de l'importance de la fonte à utiliser à chaque coulée du haut-fourneau et qui peut ne pas correspondre à

(1) La seconde fusion se fait aussi au four à sole ou four réverbère ou le métal soumis à l'oxydation de la flamme perd beaucoup de silicium et de manganèse et donne des moulages résistants. C'est la raison pour laquelle on prépare au four à réverbère les fusions destinées à couler des cylindres de laminoirs, et aussi des pièces lourdes en fontes résistantes.

la quantité de moules ou châssis préparés. D'où disproportion entre le nombre de mouleurs et la quantité de matériel nécessaire, avec la production de fonte.

Enfin, la possibilité d'avoir constamment de la fonte liquide à disposition, en quantité appropriée, permet de limiter strictement aux besoins effectifs le nombre des ouvriers et le matériel de moulage tout en utilisant pour chaque objet ou pièce coulée, la fonte qui convient le mieux à son usage.

On peut aussi couler une grosse pièce contenant à elle seule plus de fonte que n'en contiendrait le creuset du haut-fourneau. Ces raisons ont fortement développé les fonderies de seconde fusion. Celles de première fusion ne subsistent que pour quelques fabrications très limitées comme les tuyaux et certaines pièces de chemin de fer faites en grande série.

C'était cependant la seule méthode employée autrefois (voir figures 15, 16 et 17).

Le moulage en seconde fusion s'est répandu avec l'usage de la fonte en construction en des points où les hauts-fourneaux n'existent pas et aussi avec la connaissance plus approfondie des propriétés des fontes qui conduisait à l'adoption de mélanges mieux appropriés au but qu'on se propose.

Ainsi, si l'on veut obtenir une fonte résistant aux chocs et à la pression, il faut une fonte ayant peu de silicium, de manganèse, de phosphore et de soufre. On peut l'obtenir en mélangeant des fontes au bois contenant très peu de manganèse, de phosphore et de soufre, (I, page 133, ⁽¹⁾), avec des fontes hématites résistantes comme celle N° 6 du classement ci-contre, page 134, renvoi n° ⁽¹⁾.

L'empirisme a pu se donner libre cours dans cette question si complexe et chaque usine avait des mélanges à elle donnant les résultats les plus surprenants ⁽¹⁾.

(1) Mélanges de fonte :

Poélerie et Marmittaille	{ Longwy n° 4	40 %
	{ Longwy n° 3	40 %
	{ Bocages	20 %
Tuyaux d'assainissement	{ Longwy n° 4	80 %
	{ Bocages	20 %
Conduites	{ Cleveland ou fonte fluide	40 %
	{ Longwy n° 3	40 %
	{ Bocages	20 %
Pièces de machines moyennes	{ Hématite	30 %
	{ Fonte fluide	20 %
	{ Fonte Longwy n° 3	30 %
	{ Bocages	20 %
Pièces résistantes	{ Hématite	40 %
	{ Fonte fluide type Cleveland	40 %
	{ Fonte Longwy	10 %
	{ Bocages	10 %
Fontes réfractaires	{ Hématite anglaise	40 %
	{ Fonte grise type convertisseur	30 %
	{ Vieilles fontes réfractaires	20 %
	{ Bocages	10 %
Fonte lingotière	{ Hématite pure à base teneur en silicium et manganèse et débris de lingotières.	

Actuellement les principes ci-dessous peuvent servir de guide dans le choix des mélanges :

1° Il faut tenir compte de la perte à la fusion pour les différents éléments (0,3 % de silicium, 0,1 % de manganèse, augmentation de 0,035 % du soufre, etc.).

2° Prévoir l'utilisation de 20 à 30 % de jets de coulée et rebuts ;

3° Déterminer les teneurs en silicium, phosphore, etc., suivant l'épaisseur et les qualités physiques recherchées ⁽¹⁾.

4° Faire état du prix des différentes fontes et résidus (jets, bocages, etc.).

Tenant compte de ces principes et de l'analyse du mélange à obtenir, on arrive à déterminer les proportions cherchées ⁽²⁾.

Fusion de la fonte. — Un rapide aperçu sur la fusion et les procédés de moulage de la fonte nous paraît indispensable.

Le cubilot. — La fusion se fait au cubilot ⁽³⁾, appareil constitué comme un tout petit fourneau, c'est-à-dire comportant un creuset, un ouvrage, une cuve et un gueulard (fig. 111).

(1) Teneur en silicium des fontes suivant l'épaisseur de fonte des pièces à fabriquer :

Nature des pièces	Epaisseur des pièces									
	< 10m/m	10 m/m	20 m/m	40 m/m	60 m/m	80 m/m	100m/m	150m/m	200m/m	> 250
Tuyaux. Pièces de dureté moyenne	Si > 2.5	2 à 2.5	1.60 à 1.80	1.60 à 1.80	1.50 à 1.70	1.25 à 1.50	1.25 à 1.45	1 à 1.75	1 à 1.10	1 %
Pièces résistantes	2.50 à 3 % Si	Inf. ou = 2.25	1.70			Teneur en phosphore et en soufre réduites au minimum				
Pièces trempées	> 3 % Si									

(2) Analyses de fontes correspondant aux emplois auxquels on les destine :

	Si	Mn	Ph	S	C total
Poêles, fourneaux de cuisines et marmite en fonte	2,50 à 3 %	0,4 à 0,8%	1,50 à 2 %	< 0,12	3 à 3,5
Tuyaux d'assainissement	2,25 à 2,50	< 1%	1,25 à 1,85	< 0,12	3,15 à 3,60
Tuyaux de conduite	2 à 2,25	< 0,8	0,7 à 1,25	< 0,12	3,50 à 3,70
Pièces de machine de résistance moyenne	2	0,4 à 0,8	0,5 à 0,8	< 0,10	3,35 à 3,75
Pièces de machines résistantes	1 à 1,5	0,6 à 0,8	0,4 à 0,6	< 0,10	3,0 à 3,6
Cylindre de presses, de moteur à gaz, de moteurs à vapeur	0,2 à 1 %	0,3 à 0,6	0,2 à 0,4	< 0,08	2,9 à 3,2
Fonte réfractaire	< 0,8	0,4 à 0,5	< 0,15	< 0,08	3 % env.
Lingotières et pièces résistant au rouge	0,6 à 0,7%	0,2 à 0,3	< 0,08	< 0,03	3,5 max.

() Elle se fait aussi au four à réverbère, voir renvoi (1) page 135.

Par le gueulard on charge de la fonte, du coke et un fondant destiné à fondre les cendres du coke, on souffle du vent par les tuyères pour activer la combustion et on recueille la fonte par un trou de coulée situé à la partie inférieure. Parfois un chio séparé permet l'évacuation du laitier, les gaz de la combustion s'échappent à la partie supérieure de l'appareil prolongé au-dessus du gueulard en forme de cheminée d'appel.

La question des cubilots a suivi des étapes pénibles pour arriver à la forme rationnelle actuelle du type Greiner ou Hamelius (*fig. 112*).

Théorie du cubilot. — Les perfectionnements du début furent dûs à des tâtonnements et des essais pratiques. Les progrès ne commencèrent à s'amorcer que lorsqu'on se rendit compte de l'influence des phénomènes de combustion du charbon sur la dépense de coke nécessaire à la fusion.

Les chiffres exposés au premier chapitre vont nous permettre de rendre la question compréhensible.

Nous avons vu que la combustion complète du charbon forme du gaz carbonique et dégage de la chaleur, qu'au contraire, la combustion incomplète forme de l'oxyde de carbone produisant moins de chaleur que dans le premier cas.

Nous avons même signalé que lorsque le gaz carbonique formé se trouve en contact avec un excès de carbone, il peut régénérer l'oxyde de carbone.

Mais dans ce cas, il devient évident qu'il y a absorption d'une quantité de chaleur égale à la différence de celle produite dans les deux premiers cas ⁽¹⁾.

Or, dans le cubilot, tout le coke introduit doit servir uniquement à élever la température jusqu'au point de fusion de la fonte.

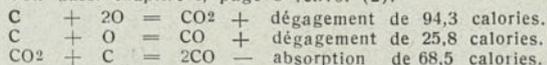
Cette élévation de la température est la plus grande possible lorsque l'air introduit par les tuyères transforme le charbon en gaz carbonique.

Si, au contraire, dès que le gaz carbonique est formé il rencontre du charbon au rouge, il se forme de l'oxyde de carbone et il y a perte d'une grosse quantité de chaleur puisque tout se passe comme si le charbon avait été directement transformé en oxyde de carbone au lieu de l'être en gaz carbonique.

On en déduit aussi que toute quantité d'oxyde de carbone qui s'échappe à la partie supérieure du cubilot correspond à une augmentation de la consommation de charbon pour la fusion.

En effet, si l'oxyde de carbone qui s'échappe avait été trans-

(1) Voir aussi chapitre I, page 3 renvoi (2).



formé par combustion complète en gaz carbonique, il aurait produit un complément de calories utilisables pour la fusion de la fonte.

Cette quantité de chaleur n'étant pas produite, doit être obtenue au moyen d'une nouvelle quantité de charbon.

Il s'ensuit que plus on trouve d'oxyde de carbone libre à la partie supérieure du cubilot, plus la consommation de charbon est élevée pour la même quantité de métal fondue.

La solution paraît donc évidente : trouver le moyen de transformer en gaz carbonique tout l'oxyde de carbone formé pour récupérer toute la *chaleur latente* qu'il emporte avec lui lorsqu'il n'est pas brûlé.

Cette transformation est facile, il suffit, en effet, de faire arriver une quantité d'oxygène ou d'air supplémentaire, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre ⁽¹⁾.

Pratiquement, les choses se passent comme suit : aux tuyères, l'air insufflé transforme tout le charbon en gaz carbonique. Ce dernier gaz rencontre un peu au-dessus une nouvelle couche de charbon au rouge et donne du gaz oxyde de carbone, en absorbant de la chaleur.

Il faut donc rechercher la zone où cet oxyde de carbone se forme et y introduire une nouvelle quantité d'oxygène ou d'air qui donnera du gaz carbonique par combustion complète.

Notons que cette introduction d'air doit se faire en un point tel que le gaz carbonique reformé ne donne plus d'oxyde de carbone avec une nouvelle couche de charbon.

Et pour cela il suffit qu'au dessus du point considéré la température ne soit plus assez élevée pour permettre cette réaction parasite.

Or, pour que le gaz carbonique donne de l'oxyde de carbone en passant sur le charbon, il faut que ce dernier soit au rouge. Donc la zone d'introduction d'air *secondaire* de combustion devra se trouver en un point au-dessus des tuyères (région la plus chaude ou point de fusion) à hauteur telle que le charbon n'y soit plus au rouge.

D'autre part, comme la combustion complète de l'oxyde de carbone par l'air secondaire dégage beaucoup de chaleur, il en pourrait résulter une élévation de température telle que le charbon soit au rouge, ce qui serait fâcheux.

On est donc conduit par cette théorie élémentaire, d'une part à avoir une introduction d'air à une certaine hauteur au-dessus de la zone de fusion (plan des tuyères) et d'autre part à faire cette amenée d'air sur plusieurs points formant une zone étendue pour éviter en un même point une élévation trop forte de la température qui produirait la réaction nuisible absorbant de la chaleur.

(1) $\text{CO} + \text{O} = \text{CO}_2$

Cubilots Greiner. — Ces diverses conditions ont été réalisées dans le cubilot Greiner où il y a deux séries de tuyères superposées, la seconde série étant à environ un mètre au-dessus de la principale ; les tuyères de la zone de fusion étant horizontales et celles de la zone de combustion complète, étant au contraire, répartie en hélice sur un hauteur de 30 à 40 cm. (fig. 112).

Le cadre de ce petit ouvrage ne nous permet pas de nous étendre sur les différentes formes de cubilots, leur briquetage, la forme et la section des tuyères, la quantité de vent, etc.

Chargement du cubilot. — Il nous suffit de signaler que le chargement s'effectue par couches alternées de coke, de fondant et de fonte. Le fondant est constitué par de la castine dont la quantité est calculée pour former avec les cendres du coke et le sable attaché aux gueuses un laitier fluide et légèrement désulfurant.

Coulée de la fonte et du laitier. — L'écoulement du laitier et la coulée de la fonte s'effectuent par des trous qu'on débouche au moment opportun.

Transport de la fonte liquide. — La fonte est versée dans des poches plus ou moins grandes transportées à main, par grue ou par pont roulant, suivant leur poids et l'importance de la fonderie.

Moulage. — Quant au moulage proprement dit, ses principes ont été perfectionnés empiriquement et ont atteint le maximum de précision il y a fort longtemps (fig. 108 et 17).

Les méthodes modernes ont eu pour seul but d'activer la production.

Pour mouler une pièce, on en reproduit la forme en creux dans une matière réfractaire infusible à la haute température de fusion de la fonte qu'on y coule.

L'art du mouleur consiste donc à reproduire la pièce dans tous ses détails, avec une matière suffisamment plastique et résistante au feu, sans cependant être trop coûteuse ⁽²⁾.

Les figures 113 et 114 montrent la suite des opérations nécessaires pour mouler en sable une marmite ayant trois pieds et deux anses.

Modèle. — Remarquons tout d'abord qu'il est nécessaire d'avoir un *modèle démontable* de la pièce à couler et que ce modèle doit avoir des dimensions telles qu'il reproduise l'objet à fabriquer, après le retrait ⁽¹⁾.

(1) *Retrait.* — Le retrait de la fonte grise par mètre sur les trois dimensions varie de 8 à 12 m/m suivant la composition. Ce retrait varie aussi avec les formes des pièces. Il est plus faible dans les pièces longues et massives et plus fort dans les pièces minces. Il peut augmenter jusqu'à 18 et 20 m/m par mètre dans les fontes blanches destinées à être transformées en fonte malléable et dans les aciers comme nous le verrons plus tard.

En général, on adopte 10 m/m par mètre pour la fonte et 18 m/m pour l'acier. Pour les modèles, on construit un mètre à retrait ayant 101 cm. et divisé en 1.000 parties. Pour fabriquer des modèles métalliques, on se sert pour l'établissement des modèles en bois d'un mètre à double retrait ayant 102 cm. de longueur pour 100.

(2) Depuis peu on a exécuté des moules en ciment sous-hydraté. On obtient ainsi des moules solides où les arêtes sont très nettes et vives. La perméabilité est suffisante et la surface des pièces coulées est très propre.

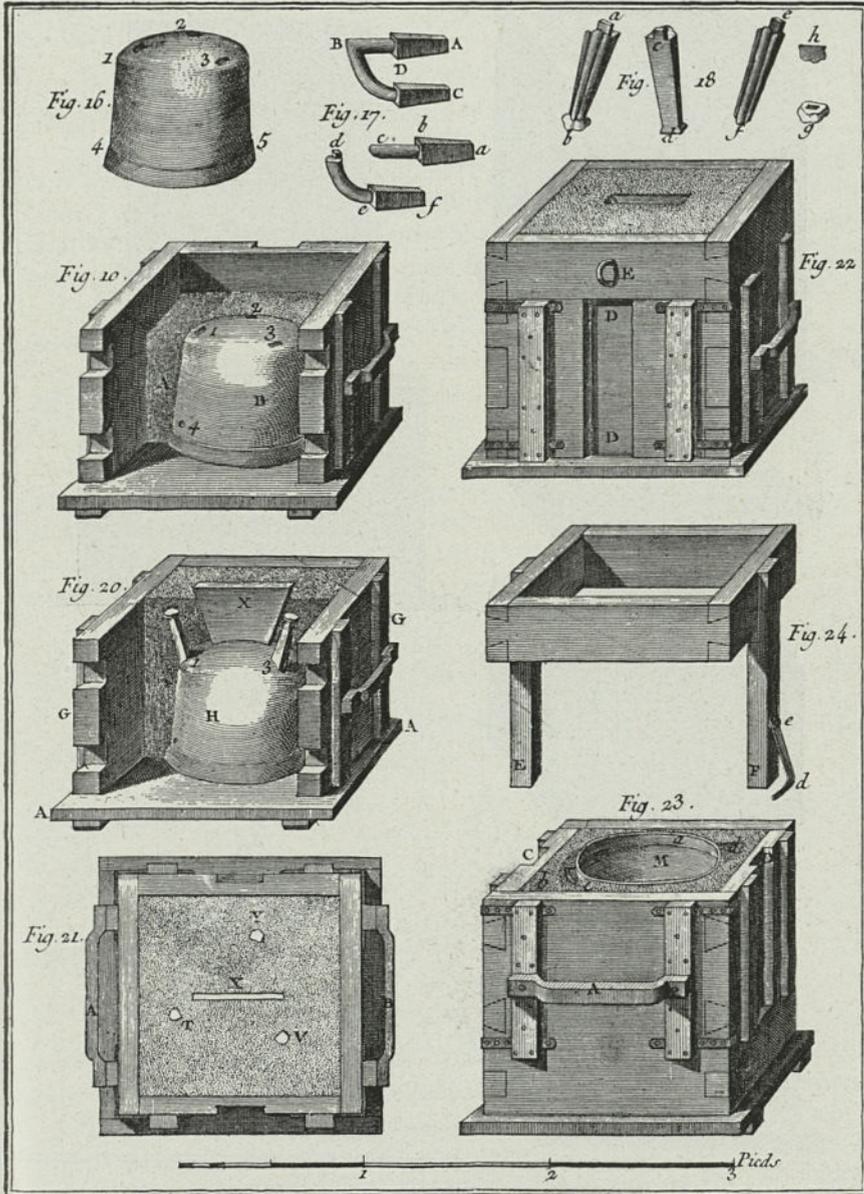


FIG. 113.

MOULAGE D'UNE MARMITE AVEC 3 PIEDS ET 2 ANSES

Fig. 16, 17, 18 : modèle démontable — Fig. 16: corps; fig. 17—ABCD anse démontable en 2 pièces, abc et def—fig.18, 3 pieds ab,cd,ef démontable en 2 pièces, le corps et la patte gh— Fig. 10, châssis ouvert montrant le moulage du corps H, les pieds S et la coulée X — Fig. 21 vue du châssis par dessus, le sable tassé — le moulage des pieds TYY et de la coulée X est terminé — Fig. 22, on a placé une rehausse E, (fig. 24) sur le châssis G, et on a rempli de sable pour couvrir les pieds TYY. La rehausse E est fixée sur le corps du châssis G par deux glissières EF et un verrou ed — Fig.23. Le châssis a été retourné en plaçant une plaque sur le dessus de la rehausse E. On voit sur la fig. 23 l'intérieur du modèle du corps M.

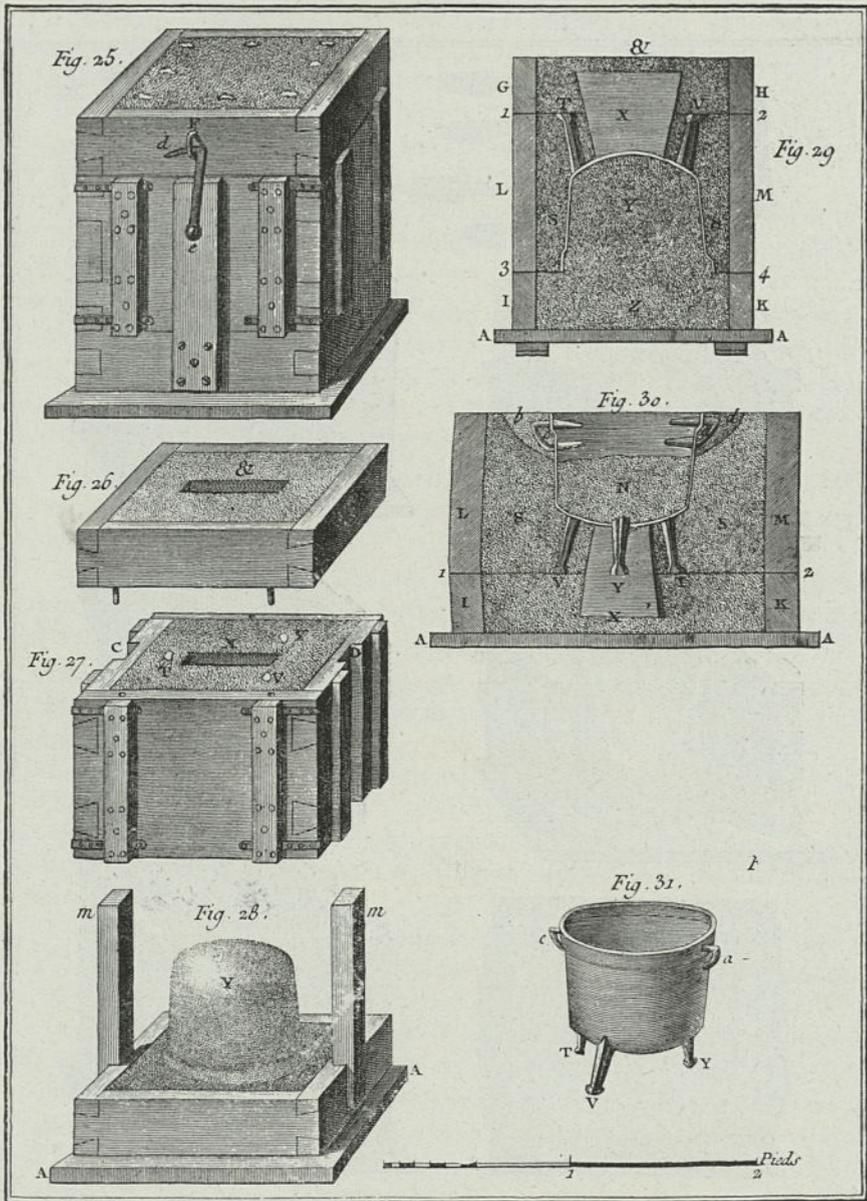


FIG. 114.

MOULAGE D'UNE MARMITE AVEC 3 PIEDS ET 2 ANSES

Fig. 30. — Creusement de deux cavités b, d pour permettre la mise en place des modèles des anses par l'intérieur du modèle. Le sable plus fin est tassé soigneusement autour des modèles des anses. Quand ce travail est terminé, on retire les modèles des anses par l'intérieur du modèle du corps. Puis on bouche les trous par des chiffons. On ajoute une nouvelle portion de châssis I K fig. 29 qu'on voit retournée avec ses deux glissières m, m dans la figure 28. On tasse le sable dans l'intérieur du corps du modèle et dans le châssis. A ce moment le noyau est fait (Y fig. 28). On retourne alors les trois châssis, et on les sépare pour retirer le modèle. On a, fig. 28 le noyau du corps, fig. 27 le moule extérieur avec les anses et les pieds et fig. 26, le joint entre les pieds et le dessus de la coulée. Ce joint est indispensable pour sortir les pièces g du modèle des pieds, les corps étant retirés du châssis fig. 27 après enlèvement du corps. On retouche les parties du moule qui ont pu s'abîmer pendant le démoulage, on remonte le tout suivant fig. 25 ou fig. 29 où l'on voit les deux joints 1, 2 — 3, 4 et la pièce est prête à couler. La fig. 31 représente la marmite finie.

Le modèle doit être démontable pour permettre de l'enlever après moulage. Il doit être parfaitement poli pour éviter les aspérités après coulée (*fig. 113*).

Châssis. — Le modèle est placé dans un cadre en bois ou en métal appelé châssis qui est souvent en plusieurs pièces.

Tassage au sable. — Puis on le saupoudre d'une matière empêchant l'adhérence du sable contre lui (talc, ardoise pulvérisée, fraïsil de charbon pulvérisé et tamisé, ou poussière ou cendres) A ce moment on remplit le châssis de sable et on le foule, on le comprime fortement par couches horizontales, au moyen d'outils dénommés battes, dames, fouloirs, crochets, spatules, etc. (*fig. 115*).

On met ensuite les pieds et achève de comprimer le sable autour en ayant ménagé un espace X par lequel se fera la coulée.

A ce moment, on retourne le modèle et son châssis avec précaution, on creuse deux enfoncements et on place les modèles des anses par l'intérieur de la marmite. On comprime du sable autour des anses et on supprime les enfoncements. On a obtenu alors le moule en creux de la pièce à couler, y compris les anses (*fig. 114*).

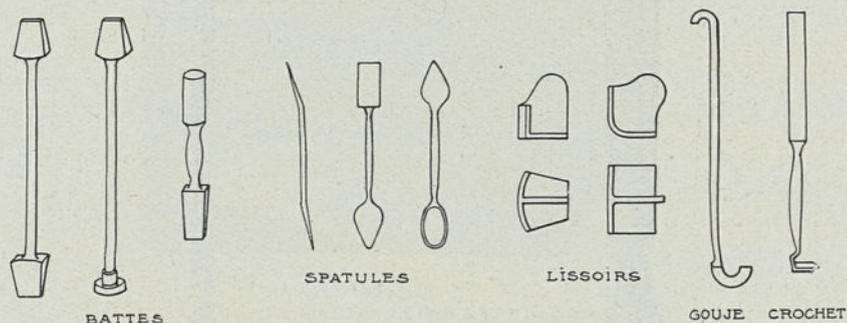


FIG. 115.
OUTILS DE MOULEURS.

Pour achever l'opération, on superpose un châssis s'adaptant par tenons au premier. On comprime alors du sable à l'intérieur de la marmite après avoir enlevé les modèles des anses et bouché les trous avec des tampons de laine pour empêcher que le sable, dont on va former le noyau ne s'introduise dans le vide où les anses doivent se former (*fig. 114*).

On prend la précaution de mettre du sable plus résistant au fond de la marmite puisque le jet de fonte arrive en ce pont.

Events. — Enfin on perce des trous d'évents dans la direction des pieds pour permettre le dégagement de l'air et des gaz de la

coulée au fur et à mesure de la montée du métal. Lorsque ceci est fait, on enlève le modèle en opérant de façon à ne pas abîmer le moule. On répare les dégâts s'il y en a, puis on remonte le tout et on a en creux le moule de la pièce à obtenir par coulée.

Jet de coulée. — Après coulée, il faut supprimer le jet de coulée et ébarber la pièce, c'est-à-dire supprimer les petites rugosités qui ont pu se produire par suite des joints des divers châssis ou des raccords des pièces du modèle.

La description de cette opération particulière nous a permis de nous familiariser avec les divers éléments entrant en jeu dans la

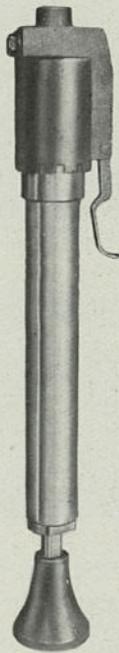


FIG. 116.
FOULOIR PNEUMATIQUE
POUR LE TASSAGE DU SABLE.



FIG. 117.
PILETTE PNEUMATIQUE
Cet appareil est représenté à une échelle plus petite que celui de la fig. 116.

fonderie : sables et matières servant à constituer les moules, châssis ou supports des moules, disposition des trous de coulée ou jets, des événements et masselottes pour assurer une coulée saine, accessoirement, manière de fabriquer le moule ; tassage du sable ⁽¹⁾ et procédé du

(1) Dans les fonderies modernes le tassage du sable à la main est l'exception et on se sert des pilettes et fouloirs pneumatiques, même dans ce qu'on est convenu d'appeler le moulage à la main, par opposition avec le moulage mécanique où le moulage se fait entièrement à la machine, fig. 115, 116, 117, 118, 119.

moulage, enfin nous avons vu la nécessité du modèle et sa constitution.

Nous allons approfondir un peu ces différents éléments et essayer de débrouiller leur complexité.

Sables. — La question des sables et terres employées en fonderie est une des plus importantes et il faudrait un volume pour différencier

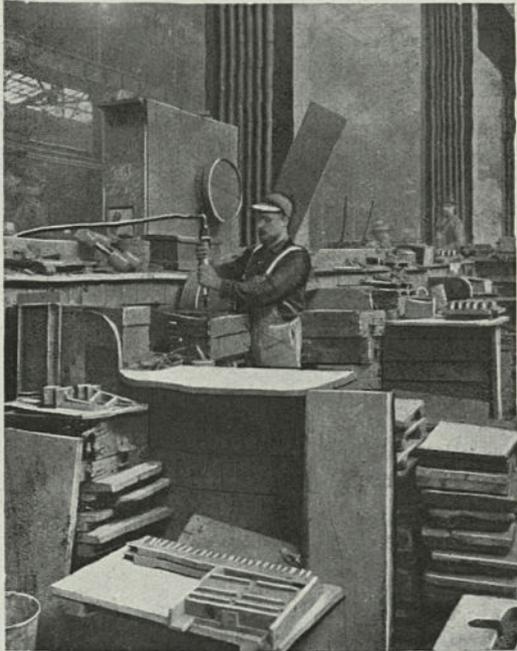


FIG. 118.

UTILISATION DU FOULOIR PNEUMATIQUE

La photographie montre l'intérieur d'une fonderie et un poste de moulage où l'ouvrier tasse le sable dans un châssis au moyen d'un fouloir du type de la fig. 116. Cela nécessite une station de compression, équipée avec compresseurs mus à vapeur ou électriquement et une série de conduites desservant les divers ateliers. Des prises doivent être prévues près des machines à mouler ou des postes de moulage.

les divers sables, les raisons de leur emploi dans l'un ou l'autre cas.

Nous ne pouvons qu'indiquer ses propriétés essentielles : infusibilité, perméabilité et cohésion et leurs évidentes raisons.

Infusibilité. — Il doit être infusible ou tout au moins suffisamment réfractaire pour pouvoir supporter sans commencement de vitrification la température de coulée du métal, 1.300° (1). La fusibilité rend le sable

(1) La silice est l'élément infusible des sables ; mais la chaux peut rendre le sable fusible surtout en présence du fer.

impermeable et le fait adhérer aux pièces qui ont mauvais aspect après coulée et usent fortement les outils lors de l'usinage.

Perméabilité du sable. — Il doit être perméable pour permettre à l'air contenu dans le moule, aux gaz et à la vapeur qui se forment pendant la coulée de se dégager rapidement à travers la masse de matières formant le moule.

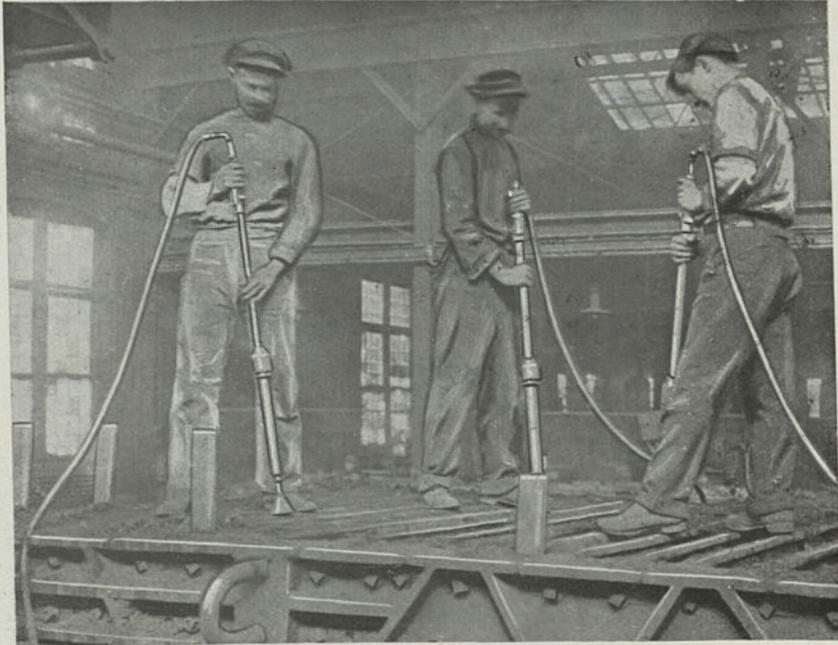


FIG. 119.

UTILISATION DE PILETTES A AIR COMPRI ME
pour le tassage du sable dans un très gros châssis.

Cette perméabilité dépend du grain pour deux sables différents, du serrage et de l'humidité pour un même sable ⁽¹⁾.

Cohésion du sable. — Enfin le sable doit avoir de la cohésion, c'est-à-dire jouir de la propriété de s'agglomérer par serrage en conservant la forme des parois entre lesquelles il est serré. Cette pro-

(1) Lorsqu'on moule en sable vert, c'est-à-dire avec un sable ne subissant aucun séchage avant la coulée et par suite humide donc peu perméable pour éviter des projections à la coulée et des pièces soufflées on augmente la perméabilité au moyen de trous d'aiguilles en grand nombre allant de l'extérieur jusqu'à la pièce. C'est ce que les mouleurs appellent *tirer de l'air*. On peut supprimer cela en préparant convenablement le sable (mélange de sable vieux au sable neuf et même adjonction de poussier de houille ou noir minéral.)

priété lui permet de reproduire la forme des modèles et en même temps de donner au moule une résistance suffisante aux manutentions ultérieures.

Pour deux sables différents, la cohésion est d'autant plus grande que la teneur en argile est plus grande et pour un même sable elle augmente avec le serrage.

Mais l'argile a pour inconvénient de prendre un grand retrait au séchage, de se fendiller et de diminuer la perméabilité.

Préparation du sable. — Il en résulte qu'il est nécessaire de composer le sable le mieux approprié au but qu'on se propose en faisant des mélanges variables ⁽¹⁾.

Dans la plupart des fonderies (fonte et acier) on mélange du sable neuf de carrière avec du sable provenant du déballage des pièces coulées, dit sable vieux ⁽²⁾. Ce dernier, qui a subi l'action du feu à la coulée, doit être aéré et humecté. Le mélange se fait dans des appareils variés : broyeurs, doseurs, etc. ⁽³⁾.

Châssis. — Les châssis servent uniquement de support au sable formant le moule. Ils peuvent être constitués d'une matière quelconque, bois, laiton, fonte, acier, aluminium. Ils doivent être indéformables pour que le moule obtenu ne se déforme pas après tassage du sable, lorsqu'on enlève le modèle.

Ils doivent donc être calculés pour résister d'une part à la pression du tassage et aux efforts de dilatation et de contraction, et d'autre part à la pression du métal pendant et après la coulée, enfin au poids du sable et du modèle, dans le cas où l'on doit déplacer le moule après sa fabrication. Si les moules doivent être desséchés avant coulée, le bois doit être proscrit. Le bois est également à rejeter à cause des dangers d'incendie par projection accidentelle de métal en feu, au moment de la coulée.

Les différents métaux sont utilisés en tenant compte de leur résistance, du poids du châssis à manutentionner ⁽⁴⁾, de la précision, etc.

(1) On emploie aussi souvent de la terre qui est un mélange de 1 d'argile, 1 de sable de carrière non séché, 1 de vieux sable, 1/2 de crottin et de 1/2 de noir minéral pour rendre le tout perméable.

(2) Toutefois le sable complètement calciné et noir, par suite du contact immédiat du métal en fusion, a perdu toutes ses propriétés et doit être rejeté au crassier. Le sable qui peut resservir est passé dans des appareils aérateurs, tamiseurs et humidificateurs, et il est débarrassé des pièces métalliques par des trieurs magnétiques.

(3) Dans les grandes fonderies on a poussé scientifiquement l'étude des sables depuis quelques années de façon à déterminer au moyen de chiffres les valeurs relatives des différents sables et de leurs propriétés fondamentales et leur influence sur la qualité des pièces moulées et leur prix de revient.

Il faut dire que certaines régions comportent des sables parfaits en quantité indéfinie, comme dans les Ardennes en France et que les Fonderies qui s'y sont localisées n'ont eu aucune étude à faire pour obtenir des résultats intéressants. Les sables de ces régions peuvent être considérés comme des sables types. Les études scientifiques tendent à reproduire artificiellement et au meilleur prix de revient des sables provenant de mélanges et donnant pratiquement les mêmes résultats favorables à l'emploi que ces sables types naturels.

(4) Le poids du châssis peut atteindre 2 à 5 ou 6 fois le poids de la pièce à fabriquer pour des pièces courantes. Avec des châssis en aluminium, on peut arriver à un poids inférieur à la moitié ou au quart de la pièce à couler.

C'est ainsi que certaines fonderies à grosse production ont été amenées à utiliser des châssis légers en aluminium, afin d'en faciliter la manutention rapide à main et sans fatigue excessive, même par de jeunes apprentis.

En fait, le châssis devrait être étudié pour chaque pièce à fondre, afin d'avoir une couche convenable et uniforme de sable autour de la pièce à mouler, c'est d'ailleurs ce qui se faisait autrefois. Mais cela conduirait à une quantité de châssis de formes, de dimensions et de poids variables, aussi variables que les pièces même à reproduire. Indépendamment de l'encombrement qui en résulterait, le prix des pièces serait grevé d'autant. On a donc cherché à utiliser des châssis communs à un grand nombre de pièces, même si la quantité de sable à tasser augmente par rapport à la quantité réelle utile. C'est aussi une des raisons pour lesquelles les fonderies se spécialisent pour fabriquer certaines pièces. Le tassage mécanique a réduit les inconvénients d'utilisation d'une quantité variable de sable (*fig. 118 et 119*). Il y a cependant certaines limites à observer pour la fabrication en série, où la répétition du tassage d'un excès de sable important con-

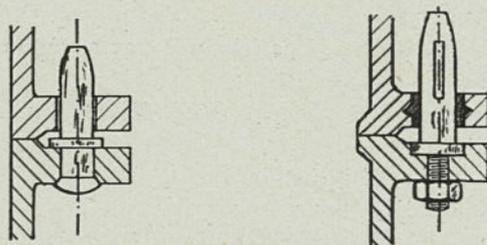


FIG. 120.

BROCHES DE REPERAGE POUR CHÂSSIS

La broche de gauche est destinée aux moulages courants de grosses pièces. La broche de droite comporte des trous avec fourrure précise en métal blanc. Ces fourrures sont refaites de temps à autre, pour avoir une précision au dixième de millimètre dans la correspondance des châssis.

duit à une augmentation de prix. Dans ce cas, le calcul montre s'il y a avantage à créer un châssis spécial. L'étude détaillée de cette question nous conduirait trop loin pour le cadre de cet ouvrage de vulgarisation.

Châssis démontables. — Disons cependant qu'on est arrivé à pallier les inconvénients dus aux types de châssis appropriés, pour les fonderies fabriquant de grosses pièces isolées, en étudiant des châssis constitués d'éléments assemblés, ce qui permet pour un petit nombre d'éléments de châssis d'avoir un nombre très grand de châssis de dimensions très variables.

Dans ce cas, la constitution des éléments de châssis doit permettre l'extension du châssis dans tous les sens en sauvegardant la résistance à la flexion, la résistance à l'extension, l'assemblage des parties de châssis entre elles, la disposition du fond pour supporter le sable et celle du dessus pour résister à la pression de la coulée et permettre l'adhérence du sable.

Joints. — Disons encore que les châssis doivent laisser la latitude de respecter les joints, c'est-à-dire les plans de changement de pente, de courbure ou de contour apparents, permettant le démontage du modèle ou des parties de modèle.

D'où la nécessité, pour les châssis à éléments assemblés, d'avoir différentes hauteurs pour arriver à constituer les joints dans des cas très variables.

Le joint correspondant à deux châssis différents pour le moulage d'une même pièce, il est obligatoire que les différentes parties du moule se raccordent bien. Pour y arriver, il faut fixer les positions relatives de ces portions de moule.

On emploie pour cela des procédés très variables depuis les plus simplistes, par exemple : marque à la craie ou à la peinture sur les châssis au moment du moulage ; aspérités mâles et femelles faites dans le joint des moules, et s'emboîtant l'une dans l'autre avec pente pour l'entrée (trièdres ou demi-sphères, etc.), ou bien des châssis repérés d'avance avec positions relatives obligatoires par un moyen mécanique précis : broches et oreilles correspondantes ⁽¹⁾ (fig. 120).

Châssis interchangeables. — Dans le moulage mécanique ou tous les moules ou parties de moules peuvent être fabriqués en grand nombre sur des machines différentes, on est arrivé à la conception de constitution de châssis interchangeables à trous ou broches calibrés suivant un châssis type ou des entraxes fixes. Cette interchangeabilité exige parfois des châssis à entraxes et broches calibrés au vingtième de millimètre. L'étude complète de cette question sortirait du cadre de cet ouvrage.

Moulage. Procédés de moulage. — Le moulage se fait suivant différents procédés dépendant de la forme des pièces, de leur volume, de leur poids, de leur encombrement.

Ainsi, s'il s'agit de couler des pièces plates de grande surface, comme des plaques de dallage, des pièces très longues, comme des tuyaux ou des pièces très importantes, comme des gros bâtis très lourds de machines, le procédé n'est pas le même.

(1) Voir aussi les croquis du moulage d'une marmite, pages 141, 142, fig. 113-114.

Pièces plates à découvert. — Les pièces plates sont extrêmement nombreuses, faciles à mouler, et ce sont celles qui ont été exécutées mécaniquement en premier. Elles peuvent être coulées à découvert à condition d'y amener doucement la fonte pour ne pas dépasser l'épaisseur nécessaire qui est déterminée par un trait de niveau dans le moule. On coule ainsi des plaques brutes (fig. 121).

Pièces plates en châssis. — Mais la surface libre de la pièce obtenue est rugueuse, et pour l'éviter on recouvre le moule d'une



FIG. 121.
COULEE D'UNE PLAQUE A DECOUVERT.

plaque lisse en sable formant fond au-dessus du moule (fig. 122). Ce procédé consiste à imprimer en creux dans le fond du moule, la partie à reproduire.

Moulage mécanique. — On comprend fort bien que si une machine peut imprimer en une fois dans le sable par une forte pression, la pièce à reproduire, le moule sera fait en une seule opération. Toutefois, l'expérience montre qu'il faut faciliter le travail de la

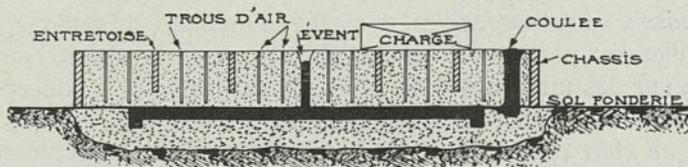


FIG. 122.
COULEE D'UNE PLAQUE AVEC CHASSIS.

machine en plaçant et serrant du sable à la main dans les points spécialement délicats du modèle.

Parmi les pièces couramment faites, on peut citer les pièces de poèlerie, les pièces d'ornementation de toutes natures (fonds de cheminées, pièces d'appui de fenêtres et balcons, etc.).

Toutes ces pièces sont en général coulées à plat même quand il existe des fonds, car la pression du métal se faisant sur une faible hauteur, n'est pas importante.

Si, au contraire, on voulait couler ces pièces debout, le poids du métal obligerait à renforcer la surface importante du sable formant moule, ou à avoir des châssis constitués en conséquence.

Coulée des tuyaux. — Les longs tuyaux peuvent être coulés à plat ou debout (fig. 123). Cette controverse a duré des années et n'est pas encore terminée, mais il est certain que logiquement la coulée debout favorise le remplissage méthodique du moule, la résistance



FIG. 123.
COULÉE DE TUYAUX EN FONTE

La coulée est faite verticalement. On voit le jet de fonte qui se déverse entre le noyau central et le moule constitué par une couche de sable comprimé dans une enveloppe en fonte.

du métal obtenu qui est comprimé à la coulée, le dégagement des gaz de la coulée, la localisation de la retassure en une portion de cylindre qui surmonte le tuyau alors que la coulée à plat laisse une trace sur le tuyau à l'endroit de la coulée.

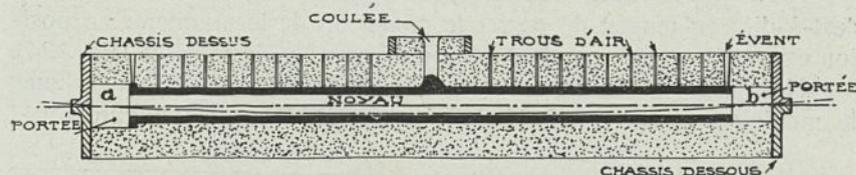


FIG. 124.
COULÉE DE TUYAUX A PLAT

Remarquer la possibilité d'obtention de tuyaux d'épaisseur inégale, si le noyau fléchit sur ses appuis.

Enfin, s'il s'agit d'un tuyau très long et de petit diamètre, le noyau très long a plus de chance d'être exactement au centre et de donner ainsi une pièce d'épaisseur uniforme. Alors que dans la coulée

à plat, le noyau très long a chance de fléchir entre ses appuis ⁽¹⁾ (fig. 124),

Mode de coulée. — Ces deux exemples montrent que la façon de couler les pièces est très importante et doit être prévue dès le début, et avant même de fabriquer le modèle.

D'autre part, le refroidissement du métal intervenant dès son entrée dans le moule, le procédé de coulée, la rapidité de coulée qui influe sur le temps qui s'écoule entre l'arrivée de la fonte et le remplissage complet du moule, ont une conséquence sur les contractions de la pièce en formation, et par suite aussi sur la fragilité de la pièce.

En réfléchissant aux conséquences de l'un ou l'autre mode de coulée (à plat ou debout pour le tuyau, par exemple) on en arrive à comprendre nettement les objections et avantages des deux procédés qui ont chacun leurs partisans convaincus et inébranlables.

Il y a lieu, en fait, d'utiliser les deux procédés suivant les cas.

Noyau. — Lorsqu'il s'agit de pièces creuses, le vide correspondant est occupé dans le moule par du sable dont l'ensemble de forme variable est appelé *noyau* (Voir fig. 124).

Les procédés mécaniques du moulage dans leurs développements successifs ont conduit d'abord les mouleurs professionnels à faire séparément les moules et les noyaux, puis séparément les moules constitués de plusieurs parties et les noyaux en plusieurs pièces.

Moulage par noyaux. — Enfin la spécialisation aidant, on est arrivé à faire par noyaux, même certaines parties de moules lorsque la mécanisation du moulage en résultait.

Portée du noyau. — La notion de noyau est liée à celle de portée, c'est-à-dire au moyen de *porter le noyau* ou de le maintenir en position exacte ⁽²⁾ avant, pendant et après la coulée de la pièce (fig. 124).

Nous citerons à la fabrication de l'acier certains exemples typiques de moulages et les conséquences économiques correspondantes.

(1) Depuis quelques années on a mis au point un procédé de coulée des tuyaux au moyen d'un moule tournant en acier au tungstène qui reçoit le métal liquide en fusion, sans qu'il y ait de noyau. L'épaisseur résulte de la vitesse plus ou moins grande de rotation. C'est ce qu'on nomme la coulée centrifuge. Mais ces tuyaux coulés en moule métallique sont trempés et fragiles. On est obligé de les recuire avant emploi.

(2) Indépendamment de la portée, on assure souvent la position exacte des noyaux dans les moules au moyen de procédés courants parmi lesquels le plus connu est le *support*. Le support est souvent constitué par une tige en acier munie de deux plaques, une à chaque extrémité : et au contact, l'une avec ce qui constitue l'intérieur du moule, l'autre avec l'extrémité du noyau. La longueur de la tige constitue l'épaisseur de la pièce, ou le vide du moule. Le support à la coulée se trouve englobé dans le métal de la pièce et fond, après avoir rempli son rôle. Aussi les supports sont-ils toujours étamés. Parfois au lieu de supports on dispose simplement quelques clous étamés, piqués dans le noyau et dépassant celui-ci de l'épaisseur de la pièce. La tête du clou vient affleurer l'intérieur du moule pour assurer l'épaisseur voulue et pour soutenir le noyau pendant la coulée.

Moulage au trousseau. — Il nous reste à dire quelques mots d'un procédé de moulage permettant de fabriquer des pièces importantes de révolution au moyen de modèles rudimentaires : le moulage au trousseau.

Il consiste à créer le modèle dans la terre ou le sable en déplaçant autour d'un axe une courbe pouvant reproduire le modèle par rotation. L'axe est matérialisé effectivement par une tige en fer ou par deux ou plusieurs points fixés en ligne.

Ce procédé permet aussi bien la fabrication du moule que du

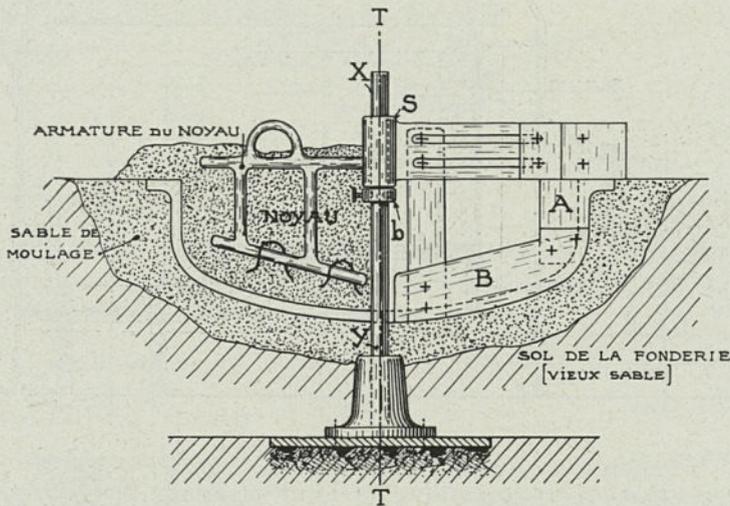


FIG. 125.

MOULAGE AU TROUSSEAU

TT axe de rotation. XY arbre du trousseau. b rondelle de fixation. S pièce tournante servant à fixer le gabarit de troussage. AB gabarit de troussage placé pour mouler la forme extérieure de la pièce à droite. Le noyau est moulé en déplaçant le gabarit pour avoir sa forme extérieure. L'armature du noyau est placée dans le moule au moment du tassage du sable.

noyau lui-même et il comporte quantités de variantes. La figure 125 permet d'en saisir le principe.

Moulage en terre. — Nous pouvons, à propos de ce procédé de moulage, en citer un autre qui supprime les châssis spéciaux dans certaines pièces compliquées ou très lourdes : le moulage en terre ou en maçonnerie.

Il consiste à se servir, pour remplacer le châssis, du sol lui-même, ou d'une maçonnerie rudimentaire, en briques assemblées avec un mortier de terre, à l'intérieur duquel on fait le moulage ordinaire en sable. On peut même, dans certains cas, couler directement dans le moule constitué de la maçonnerie rudimentaire, enduite de couches successives de terre réfractaire qui sèchent progressivement.

La seule précaution à prendre dans ce cas est de maintenir la maçonnerie ainsi faite par des cercles ou des armatures boulonnées pour éviter la dislocation sous l'influence de la pression du métal à la coulée.

De même pour le moulage en fosse dans le sol, il faut prendre la précaution d'ancrer le moule ou de le charger de poids de gueuses

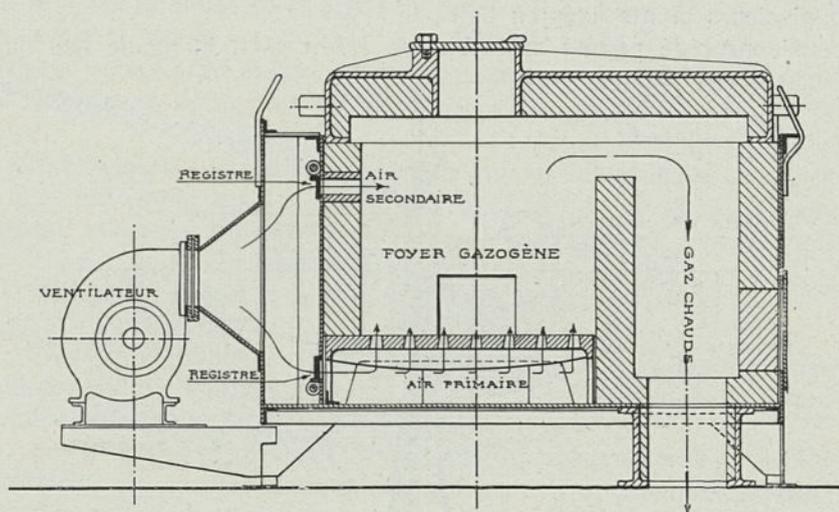


FIG. 126.
ETUVE PORTATIVE

Le fonctionnement de l'étuve nécessite une prise électrique pour la commande du ventilateur de soufflage d'air. Il existe aussi des étuves portatives fonctionnant par l'air comprimé.

de fonte ou de pièces lourdes quelconques pour en éviter le soulèvement sous la pression.

Séchage des moules. — Si les moules de ce type doivent être séchés, ce qui est le cas le plus fréquent, il est obligatoire de les sécher sur place, au moyen d'étuves portatives (fig. 26) ou de foyers temporaires établis auprès du moule et dont la circulation des fumées est dirigée pour correspondre au séchage méthodique de l'ensemble.

Coulée de grosses pièces. — Pour de grosses pièces moulées de cette façon, des précautions sont à prendre pour la coulée. Il faut par exemple, pouvoir couler du métal provenant de plusieurs cubilots, avec plusieurs poches.

On dispose, dans ce but, de sortes d'entonnoirs où les différentes

poches sont rassemblées au moment de la coulée, la répartition se faisant très méthodiquement et en retenant les parties impures (scories, laitier ou autres) qui surnageraient à la surface (fig. 127).

Coulée. — Nous avons vu dans l'exemple de moulage qu'après exécution du moule, on doit préparer la coulée(c'est-à-dire le pas-

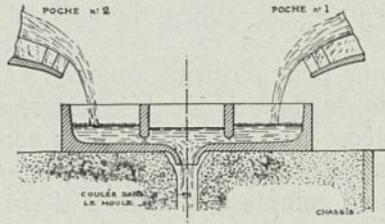


FIG. 127.
COULÉE DE PLUSIEURS POCHEES DANS UN MEME MOULE.

sage du métal dans le moule. Ceci nous conduit à examiner cette opération de plus près et à connaître les différents procédés de coulée qui jouent un rôle fort important ⁽¹⁾.

Procédés de coulée. — Il n'est pas indifférent, en effet, de remplir

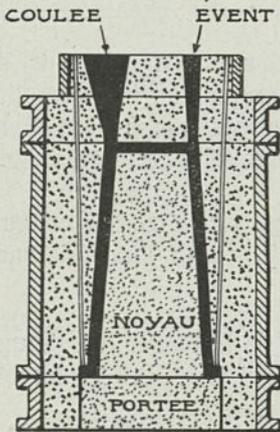


FIG. 128.
COULÉE PAR EN-DESSUS.

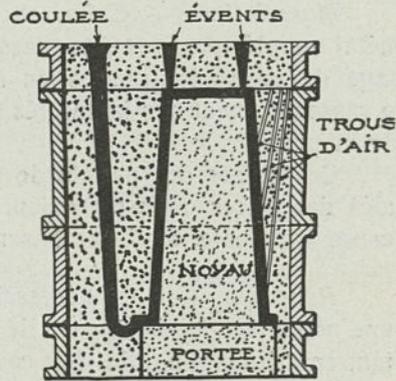


FIG. 129.
COULÉE EN SOURCE.

le moule par la partie supérieure (fig. 128) ou par la partie inférieure (dit procédé de coulée en source) (fig. 129). Il ne faut pas oublier qu'on opère sur un métal lourd, pesant environ sept fois plus que l'eau. L'ar-

(1) Une coulée trop chaude ou trop froide laisse subsister des vides, comme des bulles dans le métal, appelés soufflures.

rivée du jet de métal dans le moule peut détériorer celui-ci par l'effet mécanique dû au poids du métal et à sa vitesse (choc) et aussi par l'effet calorifique dû à l'arrivée d'un corps à très haute température, — 1.250 à 1.300° — et bon conducteur sur une matière à basse température et mauvaise conductrice de la chaleur.

Enfin, la fonte liquide a une certaine fluidité qui diminue très vite avec l'abaissement de la température. Il en résulte donc des phénomènes provoqués par les variations de vitesse de circulation du métal dans le moule pour plusieurs causes : variations de section d'une part, variations de fluidité due à la température d'autre part

La coulée de pièces très saines est donc conditionnée par une série de phénomènes qui conduisent à étudier l'arrivée du métal et sa répartition en tenant compte des sections d'arrivée dans le moule pour éviter les détériorations dues aux chocs et la sortie du métal en excès une fois le moule rempli.

Toutes ces questions autrefois traitées d'une manière empirique sont maintenant traitées scientifiquement.

On calcule, par exemple, la section nécessaire pour l'arrivée du métal dans un temps donné, sa répartition dans les différentes parties du moule avec une vitesse aussi égale que possible, dans l'ensemble.

On dispose les arrivées pour réduire les chocs et par voie de conséquence, les détériorations du moule, les entraînements de matière qui provoquent les défauts ou des manques.

Masselottes. — Enfin, on charge certains points de poids de métal supplémentaires dits masselottes, qui assurent un bon remplissage de toutes les parties du moule et en même temps permettent le rassemblement des impuretés qui remontent et s'évacuent en dehors de la pièce.

Ces études ont permis de réussir presque parfaitement et sans aléa des pièces qui paraissaient impossibles à obtenir autrefois sans cause apparente, sauf par hasard.

Retassure. — Il est nécessaire, à propos de la coulée, de donner une notion sur le phénomène de la retassure, qui joue un rôle important en métallurgie qui a fait couler des flots d'encre.

C'est la traduction matérielle d'un phénomène physique la dilatation ou la contraction, phénomène qui se complique par suite de la nature du métal auquel il s'applique.

La dilatation augmente le volume des corps. Le refroidissement le diminue. Tous les corps obéissent à cette loi ⁽¹⁾. Mais le phénomène n'est pas toujours apparent.

(1) Il y a des exceptions à la règle. Ainsi l'eau au lieu de diminuer constamment de volume avec le refroidissement, a un minimum de volume à 4°. De sorte que si on la refroidit au-dessous de 4°, elle augmente de volume. La conséquence universellement connue de cette anomalie est que si un récipient contenant de l'eau est refroidi au-dessous de 4°

L'étude classique du thermomètre en donne les caractères les plus frappants. Rappelons-les.

Prenons un tube en verre blanc rempli d'un liquide coloré, jusqu'à un trait de niveau à la température à laquelle on l'examine.

Si on chauffe ce tube, en le plongeant dans un liquide transparent, on constate d'abord que le niveau du liquide coloré s'abaisse au-dessous de la marque de départ, puis qu'il passe nettement au-dessus.

L'abaissement du liquide coloré correspond à la dilatation du tube qui s'échauffe le premier, puis ensuite le liquide qui se dilate

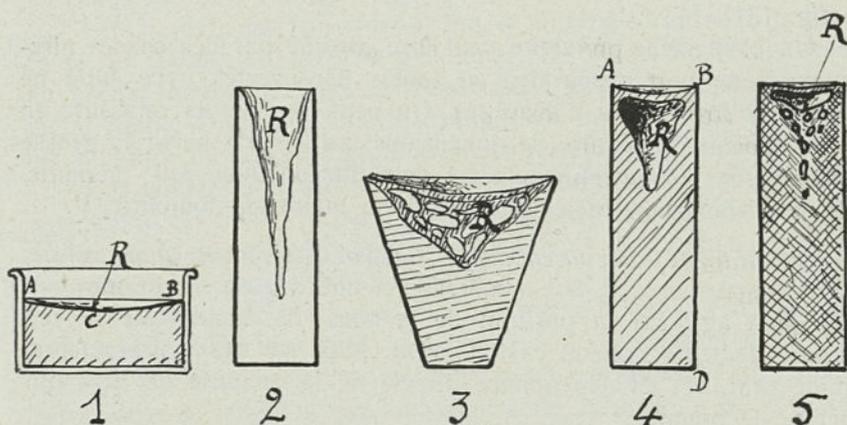


FIG. 130 131.

RETASSURE

1. ACB creux correspondant à la retassure pour un bloc de stéarine à grande surface et faible profondeur.
2. R retassure dans un bloc de stéarine cylindrique de grande hauteur, refroidi lentement.
3. R retassure dans un bloc de stéarine plus large au sommet qu'à la base et refroidi lentement.
4. R retassure dans un bloc de stéarine cylindrique, refroidi brusquement par l'extérieur.
5. R retassure dans un bloc de fonte.

davantage que le tube, prend un volume supérieur au volume primitif du tube, y compris sa dilatation, et c'est ce qui apparaît.

Si on laisse refroidir, le tout revient à l'état primitif.

Mais supposons pour un instant qu'au moment du refroidisse-

jusqu'à congélation de l'eau, le récipient éclate par suite de l'augmentation de volume, que ce soit une carafe, un moteur à circulation d'eau un radiateur, un réservoir, un tuyau, etc...

Température	Densité	Volume	de l'eau à différentes températures
0°	0,99987	1,00013	volume supérieur à l'unité
2°	0,99997	1,00003	
4°	1	1	volume égal à l'unité, maximum de densité
8°	0,99988	1,00012	
10°	0,99973	1,00027	
100°	0,9586	1,0432	
320°	0,66	1,51	

ment on opère tellement brusquement, que la masse du liquide soit gelée instantanément dans la position où il se trouvait étant dilaté.

Dans ce cas, le volume extérieur correspondrait à peu de chose près à la position du liquide au moment de sa dilatation. Mais la contraction étant inéluctable, se poursuivra à l'intérieur de la masse, et laissera un creux. C'est ce creux qui constitue la retassure.

Cette retassure existe sur tous les corps avec des modalités différentes dépendant de la nature du corps de son refroidissement plus ou moins brusque de sa conductibilité, de sa chaleur spécifique, de sa puissance calorifique, de la température à laquelle il a été porté.

En voici quelques exemples : stéarine (1, 2, 3, 4, *fig.* 130), fonte (5, *fig.* 131).

Un phénomène physique peut être modifié par des causes physiques. Il ne peut disparaître et toutes découvertes à ce sujet ne peuvent qu'être taxées d'absurdes. On peut localiser la retassure en certains points, la réduire de dimensions, arriver à répartir la grosse différence de volume en une série de petits volumes peu gênants, mais le phénomène existe toujours et se manifeste toujours ⁽¹⁾.

Fusion de la fonte au cubilot. — Dans un cubilot en bonne allure, la zone de fusion doit être maintenue à une hauteur constante

On peut agir sur la position de la zone de fusion au moyen des trois facteurs : coke, castine, vent. Mais sur ces trois facteurs, l'un, le vent, est en dépendance directe de la quantité de coke qui constitue le premier.

Élévation de la zone de fusion. — Si la zone de fusion est trop basse, on la remonte en augmentant le coke de la charge et aussi le débit ou la pression du vent (l'un dépendant de l'autre).

Abaissement de la zone de fusion. — Si la zone de fusion est trop haute, on réduit le coke de la charge, et la castine correspondante et on diminue la pression du vent.

Aussi bien dans le cas de zone de fusion trop haute que trop basse, le métal est froid, et l'oxydation ou la perte au feu est importante.

(1) Certaines fontes (les fontes très grises lorsqu'elles sont à haute température au moment de la coulée, par exemple), présentent des anomalies au refroidissement, en ce sens qu'au moment de la solidification il peut y avoir une certaine augmentation de volume correspondant à l'expulsion du graphite. Puis, ensuite le refroidissement et la contraction du volume se font régulièrement jusqu'à la température ordinaire.

En réalité, le dépôt du graphite étant un phénomène exothermique, la température de la fonte augmente à ce moment, ce qui correspond à une augmentation de volume et le refroidissement normal reprend ensuite.

Le phénomène n'est pas anormal au point de vue physique, mais correspond à la superposition d'un phénomène chimique dégageant de la chaleur, au phénomène normal de refroidissement.

Certains praticiens ont appelé ce phénomène « l'expansion » de la fonte et d'autres auteurs ont prétendu le généraliser et en conclure qu'à chaque chauffage suivi de refroidissement consécutif, la fonte augmentait de volume, par « expansion » et cela jusqu'à rupture, par répétition du phénomène. C'est là une erreur à notre avis et la démonstration scientifique de cette assertion est encore à faire.

Pour une zone de fusion normale, les tuyères normales sont claires, et la flamme qui sort du trou laitier est courte, opaque et blanchâtre.

Pour une zone de fusion trop haute, la flamme est très blanche et oxydante.

On doit aussi suivre le débit horaire de la fusion au cubilot. Si le débit diminue, les tuyères restent claires, ou il y a accrochage dans l'appareil, ce qu'on constate par le fait que le chargement ne peut plus se faire, ou la zone de fusion est trop élevée.

Deux chiffres essentiels caractérisent la marche du cubilot :

1° La consommation de coke spécialement donnée en pour cent du poids de fonte fondue ⁽¹⁾ ;

2° La perte au feu, c'est-à-dire la différence entre le poids de fonte ou métaux chargés au gueulard et le poids de métal recueilli au chenal de coulée ; elle est également donnée en pour cent du métal fondu. On peut, dans la conduite du cubilot, s'attacher à l'un ou à l'autre de ces chiffres, suivant le résultat cherché ⁽²⁾.

Ces chiffres sont en dépendance l'un de l'autre. Lorsque la consommation est faible, la perte au feu augmente. Pour réduire la perte au feu, si la quantité de vent est suffisante, il faut augmenter le coke pour arriver à fondre rapidement ⁽³⁾.

Les principes pratiques de conduite du cubilot se rapportent aux modifications des trois variables : coke, castine et vent.

De ces trois variables, les deux premières agissent sur la nature réfractaire du laitier et par conséquent sur la position de la zone de fusion. La troisième est en correspondance directe avec la première. Si le coke augmente, le vent doit augmenter proportionnellement et rapidement.

Prix de revient de fonderie. — L'étude d'une fonderie en marche, dégagée de tous les détails, se résume en définitive, à fabriquer des pièces à un prix de vente convenu d'avance. Le prix de revient consécutif à l'obtention de la commande doit être inférieur au prix de vente. La conséquence est la nécessité d'étudier méthodiquement le prix

(1) La consommation de coke oscille de 5 à 15 % dans les cas particulièrement défavorables.

(2) La perte au feu oscille au cubilot de 3 à 10 %. Elle est en moyenne de 5 à 6 % du poids de métal chargé.

Cette perte est beaucoup plus importante dans les fours de fusion, où il y a oxydation par excès d'air arrivant sur le métal fondu.

(3) Quelques chiffres comparatifs trouvés sur un même cubilot.

Pour 100 kg. de fonte fondue au gueulard :

Perte au feu	Consommation de coke
10 %	6 %
5 %	9,4 %
3 %	10,5 %

A remarquer qu'en réduisant la consommation de coke de 10,5 à 6 % on perd 7 % de fonte plus coûteux que 4,5 % de coke.

de revient probable en se basant sur l'expérience et les résultats enregistrés dans la fonderie pour des pièces analogues.

On a écrit des volumes innombrables sur la meilleure façon d'établir des prix de fonderie, en y classant les éléments en différentes catégories, toutes les plus rationnelles par rapport à ce qui existe par ailleurs.

Nous posons, en principe, que toute méthode d'établissement de prix de revient est bonne, si elle est basée sur une expérience dont les résultats ont été méthodiquement, nettement et logiquement enregistrés et si les résultats recherchés correspondent dans leur ensemble aux bases dont on est parti.

Par exemple, si les résultats enregistrés correspondent à une production moyenne de dix tonnes par jour de pièces d'un poids moyen connu, les prévisions faites seront réalisables dans des limites équivalentes, c'est-à-dire 10 à 12 tonnes par jour de pièces d'un poids moyen analogue au premier cas.

Elles seront complètement faussées si les commandes enregistrées descendent à deux à trois tonnes par jour par exemple et également si l'on exécute des commandes correspondant au double ou au triple de la base et pour un poids moyen très différent.

Mais si les résultats obtenus sont toujours enregistrés de la même façon, au fur et à mesure de la marche de la fonderie dans le temps, les coefficients de rectification existeront dans chaque cas.

Pour avoir un enregistrement méthodique des résultats, un bon procédé consiste à noter :

1° Les frais communs en général : éclairage électrique, comptabilité, chauffage des ateliers et bureaux, pointage des ouvriers, etc. ;

2° Les frais communs spécialisés à la fonderie : manutention des châssis, des modèles, du sable neuf et vieux, préparation du sable, production de l'air comprimé s'il y a lieu, de l'étuvage, pesage, nettoyage, etc. ;

3° Les frais afférents à chaque pièce ou série de pièces. Marchandises et fournitures d'une part, c'est-à-dire quantité de sable (poids ou cube), fonte liquide, déduction faite des rentrées provenant des jets ou rebuts, matières annexes : clous, tubes, anneaux, talc, etc. ; main-d'œuvre d'autre part, de modelage, de tassage, de moulage, noyautage, de renmoulage, de déballage, de désablage, d'ébarbage, etc.

4° Les frais de fusion du métal liquide, devant comprendre le mélange de fontes, le coke d'allumage et de fusion, la castine et les frais annexes correspondants de main-d'œuvre, de surveillance, de force motrice, d'éclairage, de réparation et fourniture correspondants, etc., compte tenu de la perte au feu.

Ces frais sont notés en même temps que les poids moyens des pièces et la production.

On en déduit pour une production déterminée, des coefficients unitaires pour chacun des éléments du prix de revient, c'est-à-dire :

1° Coefficient de frais communs en général à appliquer à tout ce qui sort de l'usine, d'après le poids, le volume ou le prix de la pièce fabriqué ;

2° Coefficient de frais communs spécialisés par atelier et qui doit affecter toute pièce sortant d'un atelier déterminé toujours d'après la même base, poids, volume ou prix ;

3° Prix à appliquer pour matières et main-d'œuvre à chaque pièce, d'après bons de magasin ou fiches horaires de travail, le coefficient, dans ce cas, peut tenir compte des frais de déchargement ou de magasinage ou de préparation pour les matières et des frais d'assurances, par exemple, pour la main-d'œuvre ;

4° Le prix du métal liquide, qui se trouve majoré par un coefficient qui résulte de la proportion des jets et des rebuts moyens pour les pièces de même type déjà fabriquées.

Certaines fonderies consignent leurs résultats et établissent leurs coefficients suivant le cube de sable à tasser au moulage de la pièce.

L'enregistrement des éléments toujours d'après le même cadre permet d'obtenir des coefficients de plus en plus justes sous réserve d'exécution normale du travail technique.

Ayant vu le principe du moulage, connaissant les divers éléments de ce procédé de fabrication, nous pouvons maintenant nous faire une idée de la constitution d'ensemble des grandes fonderies lesquelles sont différentes, suivant leur spécialisation.

Fusion du métal. — Qu'il s'agisse de grosses pièces de poids unitaire important ou de petites pièces fabriquées en grand nombre, l'organisation de la préparation du métal fondu est la même.

Il faut une ou plusieurs séries de cubilots disposés de façon à assurer une alimentation automatique et sûre des matières premières : fontes, coke, castine avec le minimum de main-d'œuvre. Donc, parcs de dépôts, pour les fontes, le coke, la castine, disposés pour la réception, le classement et la reprise facile des matières, et leur acheminement rapide avec pesage précis aux appareils de fusion. Départ aisé des laitiers et facilité de réparation des cubilots (approvisionnement de briques, de terre réfractaire, sable de moulage, etc.).

A la sortie des cubilots, l'organisation sera différente, suivant qu'il s'agit de couler des petites ou des grosses pièces.

Fonderie de petites pièces. — S'il s'agit de petites pièces, il est nécessaire d'avoir des appareils se déplaçant rapidement avec de

petites quantités de fonte. Une série de monorails transportant de petites poches convient pour ce cas. Ces monorails vont successivement au chantier de coulée fixe, qui fonctionne toute la journée et y remplissent tout à tour tous les moules. Ces derniers après remplissage sont évacués au chantier de déballage et dessablage. Le

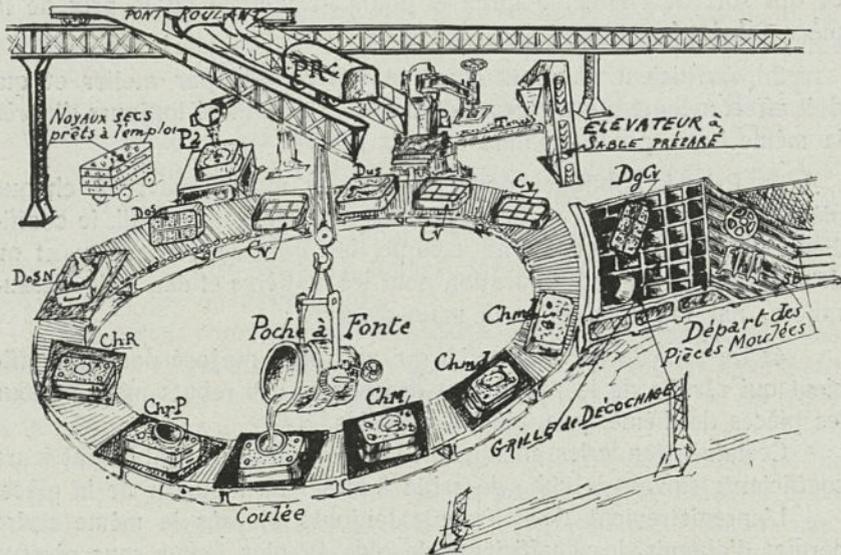


FIG. 132.

ENSEMBLE SCHEMATIQUE D'UNE FONDERIE MODERNE
POUR LE MOULAGE DES PIÈCES EN SERIE
(Cylindres d'automobiles par exemple).

P 1 poste de moulage n° 1 avec machine à air comprimé;
P 2 poste de moulage n° 2 avec machine à mouler à projection de sable; T transporteur à sable préparé desservant les différents postes de moulage; Cv châssis vides; Dus dessus de moules prêts provenant du poste P; Dos dessous de moule prêt provenant de la machine P 2; Dosn dessous de moule avec ses noyaux mis en place; Ch R châssis remoulé (au moins un châssis Du S et un Do S, superposés et clavetés); Chr P châssis remoulé prêt à la coulée, c'est-à-dire entonnoir en place; Ch M moule après coulée, en refroidissement; Ch d moules refroidis et dé-clavetés pour le décochage; Dg Cv décochage en cours, les pièces moulées sont envoyées à l'ébarbage, le sable passe au travers de la grille et rejoint l'atelier de préparation des sables, les châssis vides restent sur la grille puis retournent aux postes de moulage P 1, P 2.

sable évacué est renvoyé à la sablerie pour être utilisé en mélange avec le sable neuf et les matières annexes.

Les pièces déballées sont transportées à l'ébarbage et les châssis libérés retournent au chantier de moulage (fig. 132).

Le chantier de moulage lui-même est formé de puissantes machines automatiques alimentées en sable et châssis (fig. 133).

Sitôt les parties de moules fabriquées automatiquement et à vert, elles sont automatiquement dirigées sur un chantier de remmoulage qui reçoit directement les noyaux secs et prêts à l'emploi, prove-

nant d'étuves placées à la suite des ateliers perfectionnés de moulage rapides des noyaux.

Les moules complètement achevés et vérifiés comprenant leurs noyaux mis en place, les châssis clavetés sont envoyés au chantier fixe de coulée des pièces (*fig. 132*).

Moulage en coquille sans moule. — Ce procédé, très moderne, consiste à couler les pièces dans des moules en fonte revêtus d'un enduit réfractaire qui dure au moins une journée. Celui-ci est lui-même protégé par une mince pellicule de noir de fumée avant chaque coulée. Seuls les noyaux sont à préparer pour chaque pièce à couler. La *fig. 133 bis* représente le procédé en action pour la fabrication de carburateurs en fonte. ⁽¹⁾

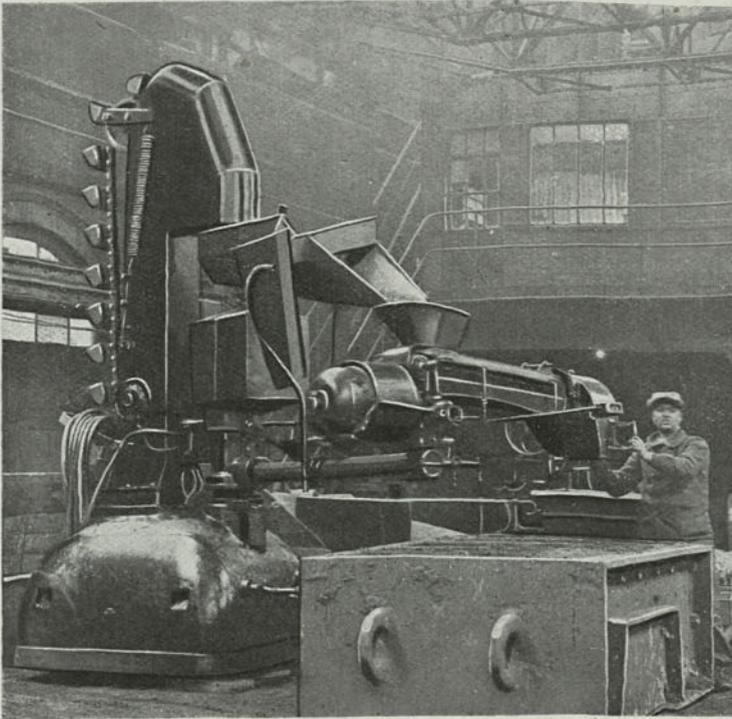


FIG. 133.

MACHINE A PROJECTION DE SABLE

Cette puissante machine mue électriquement projette le sable et le tasse d'une façon rapide et parfaite dans les châssis et moules. Une seule machine peut remplacer une dizaine d'ouvriers.

(1) Ce procédé utilise une fonte ayant à peu près la composition ci-après : Carbone total 3,50 %, Silicium 2,50 %, Manganèse 0,55 %, Soufre 0,08 %, Phosphore 0,30 %. Il donne des pièces de fonte à grains très serrés, sans soufflures, ni piqûres, absolument saines d'aspect, étanches, pouvant être polies ou nickelées. On peut produire par ce procédé de 10 à 15 pièces à l'heure ayant un poids unitaire de 22 à 3 kg. 50.

La figure 133 bis représente une série de ces machines en fonctionnement pouvant produire simultanément 10 ou 12 fois les nombres de pièces ci-dessus, soit 100 à 600 pièces à l'heure, avec un ou deux hommes.

Fonderie de grosses pièces. — S'il s'agit, au contraire, de la coulée de très grosses pièces, les cubilots à grosse production déversent leur fonte dans de grosses poches transportées au moyen de ponts roulants.

Ces poches de gros tonnage vont couler leur fonte aux divers chantiers de moulage qui sont disposés en général dans une grande halle desservie par un ou plusieurs ponts roulants puissants.

Si la pièce à couler est très importante, gros bâti de moteur à gaz de 35 à 40 tonnes, par exemple, gros volant de 50 tonnes, etc., il peut être nécessaire de déverser plusieurs poches en provenance de différents cubilots dans une sorte d'entonnoir commun qui sert à remplir le moule.

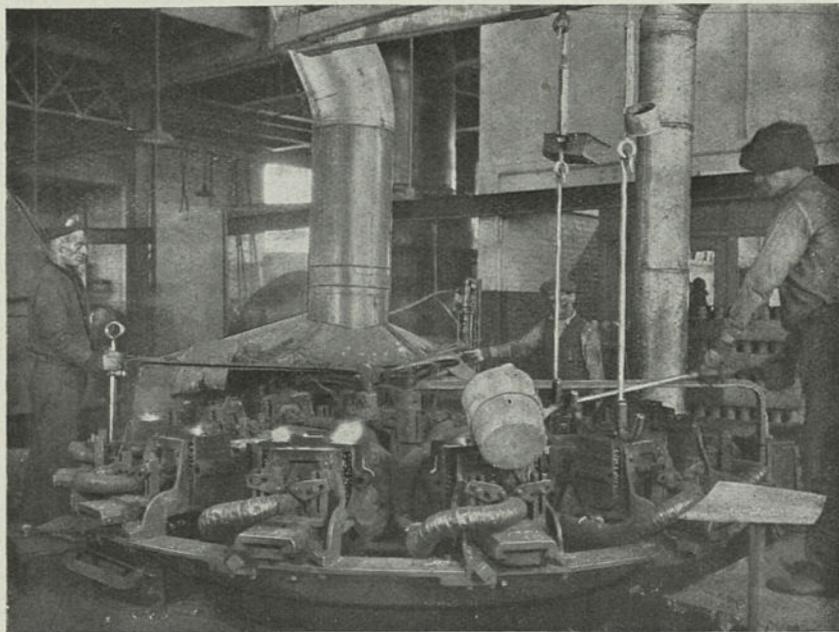


FIG. 133 BIS.

COULEE EN COUILLE AVEC MOULES PERMANENTS

La coulée en coquille se fait avec des machines spéciales dont la photographie représente un groupe. Ce groupe peut couler 200 à 300 pièces de 5 kg. unitaire, à l'heure avec 2/3 hommes. Le fonctionnement est continu et comporte par tour : 1, le passage du moule au noir de fumée; 2, la mise en place des noyaux; 3, la fermeture du moule; 4, la coulée du métal; 5, le desserrage du moule; 6, le démoulage de la pièce; 7, le nettoyage et le refroidissement du moule par l'air comprimé. Puis le cycle recommence et cela successivement pour chacune des machines du groupe.

Dans ce cas, la marche des cubilots doit être réglée pour que la coulée se fasse en temps utile par les différents appareils de fusion.

Il faut éviter un manque de fonte qui ferait perdre irrémédiablement une pièce importante et d'autant plus coûteuse.

Le moulage, le séchage et le remoulage d'une grosse pièce peut

durer des semaines et parfois des mois. Les coulées sont par suite assez espacées et dépendent de la surface disponible dans la fonderie pour le moulage.

Il faut un emplacement énorme pour arriver à couler journellement des pièces de 10 à 30 tonnes de poids unitaire ⁽¹⁾.

Après coulée, le démoulage d'une telle pièce ne peut se faire immédiatement, car le métal reste rouge parfois pendant plus de 24 heures. On desserre les clavetages des châssis et prend des précautions pour que le retrait des différentes parties de la pièce moulée puisse se faire librement afin d'éviter la casse au retrait des parties minces.

Puis, lorsqu'il en est temps, on procède au dessablage, puis à l'ébarbage ⁽²⁾.

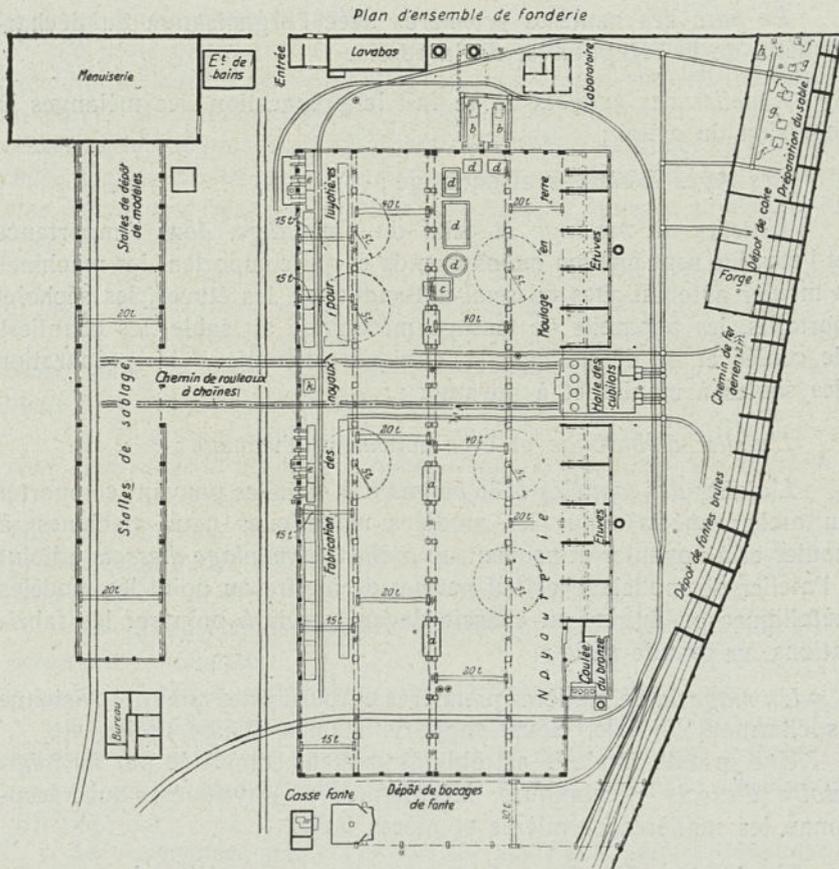


FIG. 134. — PLAN D'ENSEMBLE D'UNE GRANDE FONDERIE.

(1) Surface de l'atelier de moulage 40 à 80 mètres par tonne et par jour, 50 en moyenne pour une fonderie de grosses pièces.

Ce chiffre peut être réduit à 20, à 30 mètres carrés pour une fonderie de petites pièces outillée avec travail à la chaîne.

(2) La surface nécessaire pour l'atelier d'ébarbage peut être de la moitié de celui du moulage et la même pour les tonneries largement installées soit 40 à 80 mètres carrés par tonne et par jour de production pour les grosses pièces.

Ces opérations nécessitent, elles aussi, des appareils de manutention puissants, tant pour la pièce elle-même, que pour les châssis. Ces appareils ont d'ailleurs servi pendant le moulage à la manutention des châssis, du modèle, des noyaux, etc.

Le renmoulage des pièces importantes est délicat, car elles comportent souvent des noyaux lourds qu'il faut manutentionner avec beaucoup de précaution, ce qui se fait soit avec des ponts roulants spécialement étudiés, à cet effet ou avec des palans pneumatiques rotatifs puissants et précis (*Voir fig. 134*).

Organisation d'ensemble. — Cet aperçu montre la disposition des grandes fonderies pour petites ou grosses pièces. Elles comprennent donc toutes en général :

Le parc des matières premières avec l'organisation du déchargement, de la réception et de la reprise ;

L'atelier des cubilots où se fait la préparation des mélanges et la fusion du métal ;

Les parcs à châssis et outillage ;

L'atelier de moulage et celui du *noyautage*, dont l'importance et l'étendue sont plus ou moins grands et qui comportent les machines à mouler automatiques ou semi-automatiques, les étuves, les séchoirs portatifs, les appareils de tassage mécanique du sable, les chantiers de coulée et de dessablage, la *sablerie* permettant la préparation des sables à mouler et à noyauter ;

L'atelier d'ébarbage et éventuellement d'usinage ;

L'atelier des modèles et le *magasin à modèles* pouvant comporter un atelier spécial pour les modèles métalliques pour machines à mouler et à noyauter et souvent un *atelier de moulage d'essais* adjoint à l'atelier de modelage et qui permet de mettre au point les modèles métalliques ou autres, ou châssis devant servir à préparer les fabrications en grande série ;

Un magasin de matières premières et fournitures qui approvisionne les chantiers de talc, clous, supports étamés, filasse, huile, etc.

Une grande fonderie est obligatoirement complétée par un *laboratoire d'essais* : chimiques, mécaniques et physiques, qui réceptionne les matières premières et pièces finies.

Un bureau d'études qui peut étudier les modèles, les noyaux, les coulées et éventuellement les installations nouvelles.

Un atelier d'entretien et de construction.

Une station centrale, qui distribue la force motrice sous toutes ses formes, gaz, vapeur, électricité, air comprimé, etc.

RESUME DU CHAPITRE VI

Les fontes sont très différentes suivant qu'il s'agit de la fonte grise ou de la fonte blanche.

La fonte grise est dure, résistante et se laisse facilement limer ou travailler à l'outil. Elle s'emploie pour les pièces devant être terminées au moyen de machines-outils : raboteuses, fraiseuses, tours, perceuses. Elle est plus carburée (contient plus de carbone) et plus siliceuse (contient plus de silicium) que la fonte blanche. Elle contient plus de carbone libre (ou graphite) que la fonte blanche, sa cassure est grise ou noire.

La fonte blanche est cassante, ne se laisse pas entamer à l'outil ni limer. Son carbone est à l'état combiné sa cassure est blanche.

Elle est utilisée surtout pour l'affinage, c'est-à-dire pour être transformée en acier, sauf cas exceptionnel (fabrication des pièces moulées à transformer en fonte malléable.)

Le fer dissout le carbone et se combine avec lui. Le silicium dissout également le carbone à haute température, mais non à froid.

Si on incorpore à haute température du silicium dans une fonte blanche contenant beaucoup de carbone, le silicium s'empare d'une grande quantité de carbone même au dépend du fer et par refroidissement laisse précipiter le carbone sous forme de graphite.

Par incorporation de silicium dans une fonte blanche on la transforme en fonte grise.

Le silicium a une influence sur la résistance des fontes.

Le phosphore rend les fontes fluides à chaud et par conséquent favorise les moulages délicats, mais il la rend cassante à froid.

Le soufre rend la fonte souffleuse et caverneuse, et son moulage difficile.

Le manganèse pallie l'action du soufre et sert à l'éliminer en partie.

Les éléments entrant dans la fonte lui donnant des propriétés variables, une classification des fontes est nécessaire pour permettre leur utilisation rationnelle.

Les fontes se classent : 1° d'après la composition chimique : en fontes très pures en phosphore et soufre, dites fontes hématites; fon-

tes à teneur moyenne en phosphore dites fontes fluides; fontes phosphoreuses à teneur supérieure à 1 0/0 et fontes spéciales (au silicium, au manganèse, au chrome, etc.).

2° D'après l'emploi.

en fontes de moulage et fontes d'affinage.

3° D'après le lieu d'origine.

en fontes au bois de Suède; fontes hématites de Middlesbro; fontes Cleveland (moyennement phosphoreuses); fontes phosphoreuses de l'Est (à 2 0/0 de phosphore).

4° *Enfin dans chaque type de fonte on peut classer les variations d'après le grain, par numéros croissants :*

Fonte N° 1 (graphiteuse à gros grains) noire;

Fonte N° 2, etc... Jusqu'à arriver à la fonte blanche.

Les différentes fontes et leurs propriétés variables, eu égard à leur composition, conduisent à réaliser des mélanges de fonte par fusion.

C'est la base de la seconde fusion, par rapport à la fusion directe au Haut-Fourneau, dénommée première fusion.

La seconde fusion se fait au cubilot, petit four à cuve où l'on charge à la partie supérieure les mélanges de fonte, le coke, et le fondant destiné à fondre les cendres de coke. On souffle de l'air par des tuyères, au moyen d'un ventilateur et l'on récolte la fonte liquide à la partie inférieure, et le laitier par un trou spécial dit « chio » situé entre les tuyères et le bain de fonte.

Le cubilot consomme plus ou moins de coke suivant que le coke est plus ou moins complètement brûlé en gaz carbonique ou oxyde de carbone.

On peut favoriser la combustion complète en gaz carbonique en disposant une seconde rangée de tuyères au-dessus de la première.

L'allure du cubilot provoque une plus ou moins grande oxydation du métal fondu.

L'allure doit être choisie suivant le résultat qu'on recherche, c'est-à-dire uniquement fusion, comme par exemple lorsqu'il s'agit de refondre des fontes pour les transformer en acier ou suivant qu'on recherche un métal très fluide et non oxydé pour le moulage de pièces de fonderie saines.

La fonte liquide sortant du haut fourneau en première fusion ou du cubilot en seconde fusion peut être transformée immédiatement en objets ou pièces dites moulées.

Le moulage d'une pièce se fait en reproduisant sa forme en creux dans une matière infusible à la température de la fonte liquide qu'on y coule.

Le moule est généralement constitué de sable comprimé à vert s'il n'est pas étuvé, à sec, s'il est séché préalablement à la coulée dans une étuve.

Le sable est comprimé dans un support appelé châssis en bois ou métal.

Il faut en général un modèle en une ou plusieurs parties démontables de la pièce à mouler, pour en faire le moule.

Il faut préparer dans le moule l'arrivée du métal ou coulée, prévoir les sorties de gaz ou de l'air dénommés événements et des suppléments de matières appelés masselottes pour localiser le vide provenant du retrait ou retassure.

Après moulage, le moule en sable est désagrégé et la pièce est enlevée et dégagée du sable qui reste ou dessablée.

Elle est ensuite ébarbée, c'est-à-dire qu'on enlève les bavures de métal ou parties parasites, nécessitées pour le moulage, la coulée ou les masselottes prévues pour avoir une pièce saine.

La pièce est ensuite recuite dans certains cas, puis terminée à l'outil s'il y a lieu.

Le sable doit avoir de la cohésion, il doit être infusible, à petits grains, perméable aux gaz.

On prépare le sable en rectifiant la composition naturelle par adjonction de sable vieux, de poussier de houille, etc... et en faisant un mélange ayant une humidité déterminée.

On peut aussi faire du moulage en terre.

Les procédés de moulage sont extrêmement variés. Moulage à la main avec tassage à la main. Tassage mécanique par marteaux et pillettes à air comprimé. Tassage au moyen de secousses provoquées par des appareils mécaniques, électriques, à air comprimé, hydrauliques. Compression au moyen de presses mécaniques à vis, à excentriques, hydrauliques, électrohydrauliques ou à air comprimé. Compression par projection au moyen d'appareils à air comprimé ou électriques, etc.

Ces procédés peuvent être combinés avec des machines absolument automatiques où il suffit de passer des châssis vides, et de verser du sable à la main ou à la pelle, le modèle étant placé sur la machine, et imprimant automatiquement le moule dans le châssis-rempli de sable.

On peut même avoir des machines où tout est automatique, amenée des châssis, amenée du sable, moulage des pièces, etc...

Le seul rôle des ouvriers consistant dans ce cas à réunir les différentes parties du moule, à y placer les noyaux et à envoyer le tout à la coulée.

Ces procédés sont employés pour des pièces identiques à fabriquer en très grand nombre, l'organisation d'une fabrication de ce

genre étant complexe et nécessitant des essais préalables précis et des études pour le modèle, les noyaux, le procédé de moulage, le châssis, la disposition des coulées, des masselottes, etc...

Les grandes fonderies peuvent être constituées soit pour le moulage de très grosses pièces mécaniques et dans ce cas leur disposition doit comporter de gros appareils de manutention pour les châssis et les pièces ainsi que pour les poches de coulée, des installations importantes pour la préparation du sable, et l'amenée de celui-ci aux différents postes de moulage, enfin de grands espaces destinés au moulage.

D'autres grandes fonderies constituées pour le moulage d'une grande quantité de petites pièces comportent au contraire des appareils de manutention légers par monorail par exemple, mais par contre, des installations de moulage automatiques qui sont desservies par différentes organisations amenant les châssis d'une part, le sable d'autre part, et laissant uniquement au mouleur à effectuer l'assemblage des différentes parties des moules, c'est-à-dire le remoulage pour la coulée.

Beaucoup de ces fonderies modernes sont outillées avec des chemins de rouleaux complètement automatiques, ou partiellement, avec roulements à bille, sur lesquels les différentes pièces nécessaires, (châssis, moules, etc...) circulent comme sur un ruban sans fin.

Ces procédés de fabrication ont été développés beaucoup pour les usines d'automobiles, en ce qui concerne la fabrication des cylindres des moteurs en fonte qui sont ainsi produits à raison de cent à l'heure, pour certaines usines. Ils sont aussi employés fréquemment pour la fabrication des radiateurs, chaudières et appareils pour le chauffage domestique et le chauffage central des habitations.

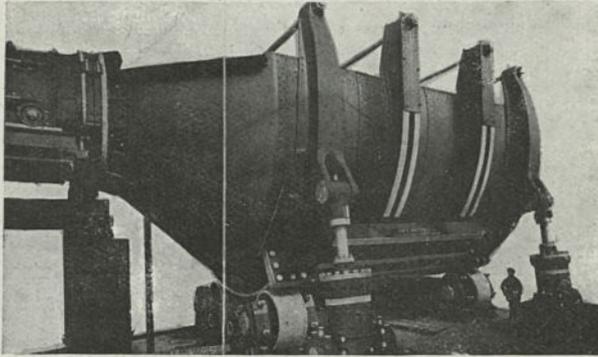


FIG. 135.

CARCASSE METALLIQUE D'UN GROS MÉLANGEUR

On voit sur la photographie, les cylindres hydrauliques servant à la manœuvre de l'appareil, et les gros galets de support sur lesquels portent les armatures formant chemins de roulement.

CHAPITRE VII

LE MÉLANGEUR DE FONTES.

Définition. — Cet appareil, comme son nom l'indique, était destiné, à l'origine, à produire une fonte de composition moyenne, avec les coulées provenant de différents hauts-fourneaux en marche dans la même usine.

Son but était, non seulement d'atténuer les variations inhérentes à la marche d'appareils différents, mais encore de constituer un régulateur ou un volant dans l'alimentation en fonte des appareils utilisateurs, à la suite des hauts-fourneaux dans les grosses usines sidérurgiques.

Il devait aussi former réservoir ou accumulateur destiné à parer aux irrégularités ou aux arrêts imprévus des hauts fourneaux et à l'emmagasinement de la fonte, lors des arrêts obligatoires des appareils d'utilisation le dimanche ou les jours de fête.

Constitution et fonctionnement du mélangeur. — Le principe et le but de cet appareil expliquent l'importance de son volume et de sa contenance. Les premiers appareils contenaient 50 à 100 tonnes de fonte et ils passèrent rapidement à 200, 250 tonnes et jusqu'à 1.000 tonnes de capacité et au delà.

Devant contenir une charge énorme de fonte, il doit être con-

superposent par couches sans se mélanger effectivement, de sorte que l'irrégularité de composition chimique subsiste.

Pour parer à cet inconvénient très net des appareils du type (fig. 136 et 137) on a eu l'idée de disposer une paroi de séparation entre l'ouverture d'arrivée de la fonte et l'ouverture de sortie ; comme pour l'appareil (fig. 138) par exemple.

Bien que dans ces appareils plus perfectionnés, il y ait un brassage des fontes et qu'un certain mélange en résulte forcément, on n'obtient pas pour cela une composition moyenne. Des couches se reforment et l'irrégularité, même moindre, subsiste cependant.

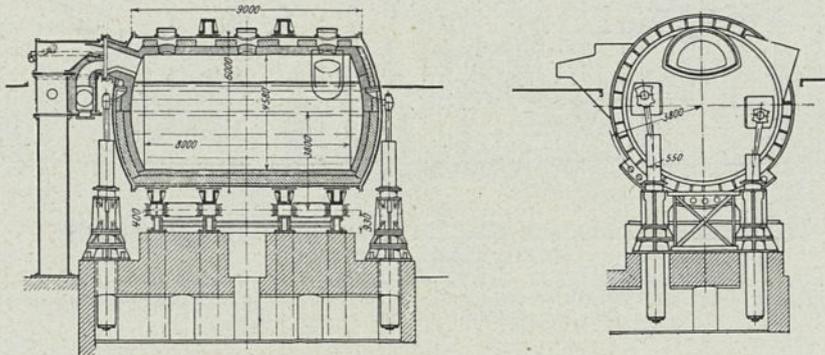


FIG. 137.

MELANGEUR CYLINDRIQUE CHAUFFE A COMMANDE HYDRAULIQUE

Dans cet appareil la versée de la fonte se fait d'un côté et la sortie du côté opposé. La manœuvre se fait au moyen de quatre cylindres hydrauliques placés de part et d'autre de l'axe du mélangeur.

Désulfuration. — L'usage des mélangeurs s'est répandu malgré cet échec apparent, par suite d'une amélioration due à d'autres causes que le phénomène mécanique de brassage sur lequel on comptait à l'origine. Cette amélioration fort importante est la désulfuration qui s'y produit. Ce départ du soufre est dû à l'action prolongée du manganèse sur le sulfure de fer, et à l'influence de l'oxygène de l'air sur le sulfure de manganèse qui en résulte durant le séjour de la fonte liquide dans le mélangeur.

On conçoit que le manganèse de la fonte remplace le fer du sulfure de fer qui s'y trouve en solution.

Le sulfure de manganèse, plus léger, surnage à la surface du bain de fonte liquide et s'oxyde au contact de l'air en donnant de l'anhydride sulfureux qui produit des flammes bleues par sa combustion et une odeur caractéristique. Après oxydation du sulfure de manganèse, l'oxyde de manganèse produit est réduit par le carbone de la fonte et libère le manganèse qui peut recommencer le cycle (1).



Ceci explique que plus la fonte séjourne dans le mélangeur, plus le soufre diminue comme teneur ⁽¹⁾.

Or le soufre est extrêmement nuisible et ne peut s'éliminer que dans des conditions difficiles pour ne pas dire impossibles à réaliser dans les procédés classiques de fabrication de l'acier (convertisseur et four Martin). Il est donc fort heureux d'avoir un moyen d'élimination puissant dans le séjour prolongé au mélangeur ⁽²⁾.

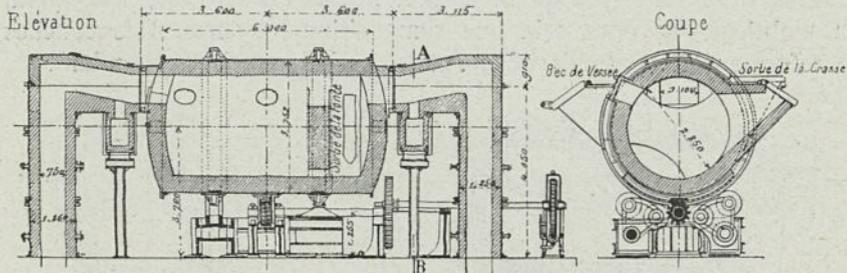


FIG. 138.

MELAGEUR CYLINDRIQUE CHAUFFE AVEC SEPARATION INTERIEURE
ET COMMANDE ELECTRIQUE

Dans cet appareil la sortie de la fonte se fait par un bec situé dans le petit compartiment pour assurer un brassage complet des fontes chargées. La commande de versée se fait par moteur électrique et engrenages.

Refroidissement, lous, chauffage. — Les premiers mélangeurs non chauffés ont causé des déboires en cas de refroidissement exagéré. Il en est résulté parfois une solidification de tout ou partie de la fonte du mélangeur. Cet accident donne un « loup », c'est-à-dire une grosse masse de fonte impossible à enlever autrement que par fusion ou à la dynamite. On a pallié un peu ces dangers en ajoutant du ferrocilicium au moment où on craint une solidification du métal liquide ⁽³⁾.

Mais on en est arrivé, par la suite, à chauffer la fonte contenue dans le mélangeur, d'abord au moyen d'appareils mobiles et intermittents (brûleurs à gaz de haut-fourneau, de four à coke, ou de gazogène, ou à huile lourde)⁽⁴⁾. Puis on a constitué les appareils de façon à pouvoir les chauffer comme des fours Martin. Ces différents stades sont nettement visibles sur les figures 136, 137, 138, 139, 140.

Analyse à l'entrée						et à la sortie du mélangeur					
C	Si	Mn	Ph	S		C	Si	Mn	Ph	S	
3,50	0,45	1,45	2,05	0,08		3,40	0,40	1,20	1,98	0,05	
3,50	1,50	1,30	1,50	0,12		3,50	0,90	1,05	1,50	0,10	

(2) Par séjour plus ou moins prolongé le soufre est réduit de 15 à 20 % à 40, 50 et même 60 % de sa teneur initiale à l'entrée au mélangeur.

(3) Le silicium par oxydation à l'air dégage de la chaleur et empêche la solidification trop rapide.

(4) Consommation d'huile lourde 5 à 6 kg. par tonne passée. Température sur le bain 1.200 à 1.250°, à l'entonnoir de sortie 1.150° centigrade.

permet de préparer la fabrication de l'acier, en la rendant plus rapide et plus sûre dans les appareils définitifs classiques.

C'est la raison pour laquelle le mélangeur ainsi utilisé s'appelle actif ou mélangeur préparateur, par opposition à celui dont l'action passive est uniquement une action de désulfuration.

Dans le cas du mélangeur actif, les réactions d'oxydation provenant du minerai ou des autres matières ajoutées⁽¹⁾, ont pour résultat de provoquer un brassage intime de toute la masse et de donner une matière dont l'analyse moyenne peut être régulière et faciliter beaucoup les transformations ultérieures de la fonte.

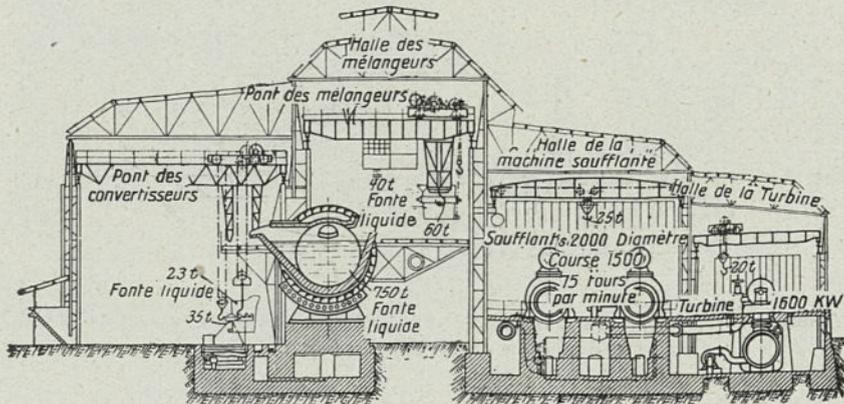


FIG. 140.

COUPE PAR LES MELANGEURS DE L'USINE REPRESENTEE EN PLAN SUR LA FIGURE 139.

Le service des mélangeurs, versée de la fonte venant des Hauts Fourneaux et reprise de la fonte allant aux convertisseurs à acier se fait au moyen de ponts roulants.

Usages actuels du mélangeur. — Dans son stade d'évolution actuel, le mélangeur moyennement chauffé d'une façon plus ou moins intermittente sert de réservoir de fonte, recevant irrégulièrement la fonte et permettant une alimentation régulière des appareils d'utilisation à la sortie.

Il produit, d'autre part, un départ de la plus grande partie du soufre entre la coulée à la sortie du haut-fourneau et l'évacuation du mélangeur.

Le mélangeur chauffé d'une façon continue avec le mode le plus perfectionné (récupérateurs et régénérateurs de chaleur) et utilisé comme appareil de préparation, permet outre son rôle de réservoir

(1) Les matières oxydantes utilisées au mélangeur sont des battitures de fer ou le minerai de fer riche et pur à plus de 50 % de Fer. Comme matière basique de la chaux et comme fondant le spath fluor.

et de désulfurant, d'avoir un rôle de transformation de la fonte, soit pour obtenir des produits spéciaux à bas silicium et bas phosphore, impossibles à obtenir directement au haut-fourneau, soit pour obtenir un produit d'analyse constante et prévue, intermédiaire entre la fonte et l'acier et permettant de régulariser la fabrication de l'acier.

On a enfin utilisé le mélangeur chauffé pour incorporer des ferrailles et chutes dans la fonte, en modifiant ainsi sa composition physique ou chimique, soit encore pour refondre une certaine proportion de fonte froide afin de la faire rentrer dans le cycle de fabrication sans avoir l'obligation d'employer le cubilot spécialement affecté à ce travail.

RESUME DU CHAPITRE VII

Le Mélangeur de Fontes

Le mélangeur a été conçu à l'origine pour produire une fonte moyenne résultant du mélange à l'état liquide des fontes provenant de différents hauts fourneaux dans la même usine.

Sitôt les premiers appareils construits on s'est aperçu qu'il n'y avait pas mélange parfait et que les différentes fontes se disposent par couches horizontales et par ordre de densité aussi bien à l'entrée qu'à la sortie du mélangeur.

Par contre, on a reconnu qu'il y avait désulfuration, c'est-à-dire qu'une grosse partie du soufre existant dans la fonte à l'entrée du mélangeur en est éliminée à la sortie par suite d'une action combinée de l'oxygène de l'air et du manganèse.

On a donc continué à utiliser les mélangeurs pour les avantages suivants : système de régularisation ou de volant pour la distribution de la fonte aux appareils producteurs d'acier avec désulfuration simultanée.

On a également perfectionné l'appareil au moyen de chicanes disposées à l'intérieur et influant sur le brassage physique, et on l'a chauffé pour éviter une solidification prématurée qui donne de grosses masses de fonte appelées « loups ».

Le mélangeur chauffé a été perfectionné ensuite en vue de faciliter ou de préparer la transformation de la fonte en acier, par une oxydation du silicium et du phosphore au moyen d'addition de minerai de fer, de battitures de fer et de chaux.

L'appareil ainsi perfectionné a été appelé mélangeur actif ou mélangeur préparateur.

Le mélangeur primitif ou ordinaire ou passif, sert de réservoir de fonte et d'appareil désulfurant. Le mélangeur actif peut au moyen des additions citées de matières oxydantes et de chaux modifier pro-

fondément les teneurs en silicium et phosphore et faciliter beaucoup la transformation ultérieure de la fonte en acier.

Les matières oxydées : silicium, manganèse, phosphore, etc..., forment avec la gangue du minerai ajouté et la chaux une scorie qu'on enlève de la surface du bain.

On peut aussi dans les mélangeurs chauffés ajouter des chutes ou ferrailles qui influent sur la composition chimique ou physique de la fonte qui s'y trouve.

On peut également y fondre de la fonte froide au lieu d'utiliser le cubilot.

Le mélangeur est actuellement l'accessoire obligé de toute grosse usine métallurgique, pour permettre l'indépendance de marche des Hauts Fourneaux et des appareils producteurs d'acier, (convertisseurs, fours Martin ou même fours électriques).

Il peut enfin servir à produire des fontes spéciales impossibles à obtenir directement au Haut Fourneau.

RÉPERTOIRE ALPHABÉTIQUE

A

- Absorption des gaz par le charbon de bois, 39 (3).
Accidents de marche du H. F. 120.
Accrochage au H. F. 120, au cubilot 159.
Acier 29-30.
Acétone 37 (2).
Acide acétique 37 (2).
Addition (minerai d') 58 (3).
Affinage 16
— de fonte de fer 16-17-23-27 fig. 28.
Affinité 14-15.
Age de fer, de bronze, 9.
Agglomération de menu de coke 49 (4).
Air (composition en poids et en volume) 1 (1).
Air, (teneur en oxyde de carbone et gaz carbonique) 2 (2).
Air (spécial de combustion) secondaire 6 - 6 (2) - 139 - 154 fig. 126.
Air primaire 154 fig. 126.
Air de combustion (quantité pratique) pour le carbone 4 (1).
Alcool méthylique 37 (2).
Alumine 11-58 (température de fusion) 57 (1).
Allures du Haut Fourneau - allures froide, chaude 118-119.
— Cubilot 158.
Amas de minerais 9 fig. 7-53 fig. 40.
Ammoniac 37 (2)-44 (1)-46 (1)-48 (1).
Analyses de briques pour H. F. 79 (1).
— élémentaire des différents combustibles 37 (1).
— du charbon de bois 39 (1).
— des minerais 61 (1).
— des fontes 88 (2) - 133 (1) - 134 (1).
Aniline 48 (1).
Anhydride carbonique dans l'air 1 (1).
— sulfureux 9.
Anthracène 48 (1).
Anthracite 40 (1).
Argile 7 - 11.
Argon 1 (1)
Arsenic 62 (1) - 114 (2).
Arrosage du coke 47 - 49 (3).
Asphyxie par les gaz du carbone 2 - 2 (2).
Azote 1 (1) - 37 -

B

- Balancier 1, fig. 1.
 Bande de fer 25, fig. 26.
 Barillet 44 (1) - 45 fig. 39 - 47.
 Batterie de fours, de chaudières 46 (2).
 Battitures de fer 31 - 176 (1).
 Benne trémie 83 - 84 fig. 65, 66 - 105 fig. 92.
 Benzène, benzine 44 (1) benzols 48 (1).
 Berthier 57.
 Berthollet 29.
 Berzélius 53 (1).
 Bessemer (fonte) 117 (1) - 119 (2).
 Bessemer Thomas 56 (1) - 117 (1) - 119 (2).
 Bocardage 62 fig. 42.
 Bois (carbonisation du) - 37 (2).
 — (cendres du) - 39 (4).
 — (charbon de) 36 (densité du) 39 (2) (analyse moyenne du) 39 (1).
 — (composition élémentaire du) 37 (1).
 — (puissance calorifique du) 36 (1).
 Bon coke 41, fig. 35.
 Bouillie de glaise 47.
 Bouchage du H. F. 88 (1).
 Bouclier extincteur 49 (3).
 Boulanger (four de) 41, fig. 36.
 Brai 48 (1).
 Brasque 17, fig. 11.
 Briques (composition) 79 (1).
 Briquetage du H. F. 77 - 77 (1).
 Broches 148 fig. 120.
 Broyage du charbon 47.
 Broyeur à sable 147.
 Broyeurs à boulets (meules, boules, plaques d'usure) 122 (1) - 130 (1).
 Buse de tuyère 93 (1) - 100 fig. 82.

C

- Calcaire 59 (1).
 Calcination des minerais (voir grillage).
 Calcul du lit de fusion du H. F. 115-116-116 (1).
 — des appareils Cowper 97 (1).
 — de la force motrice disponible dans les gaz de H. F. 101 (1) -
 107 (2) - 118 (1).
 Calorie (grande et petite) 3 (2) - 4.
 Captage des gaz 101.
 Caractéristiques de machines soufflantes de H. F. 91 (3).
 — d'appareils à chauffer le vent 17 (1).
 — des différents laitiers 117 (1).
 Carbonate de fer 9 (1) de zinc 9.

- Carbone libre ou graphite 130.
— combiné 88 (2) - 130.
— graphitique 88 (2) - 130.
- Carbonisation des combustibles 37 (2).
— du bois 38 fig. 34.
— de la houille - durée - 47 (4).
- Carbonique (gaz) 2.
- Carbures, 44 (1).
- Carcasse en acier pour H. F. 78 fig. 59.
- Cardiff (houille de) 40 (2).
- Carneaux 45.
- Cassin 31.
- Castiné 59.
- Catalan (four), 17.
- Cendre 91 (1) de bois 39 (4) - de coke, composition 42 (2).
- Cendres de pyrite 60 (1).
- Chaleur latente 139.
- Chambre de fours à coke 45 (1).
- Charbon - classification 45 (1) - pur 36 - de bois 38-39 (1) - à coke de la Ruhr, du Durham, de Cardiff 40 (2).
- Charges pour H. F. 85 (1).
- Chargement du H. F. 1 fig. 1 - 81 - fig. 61, 62, 63, 64, 65, 66.
— du Cubilot 138.
- Châssis 143 - démontable 148.
- Chauffage du vent (économie en) 94 - 94 (1) - 95 (1).
- Chaux (température de fusion) 57 (1).
- Cheminée avec grille 5 fig. 3.
- Chrome 62 (1) - 114 (2).
- Chrysène 48 (1).
- Ciment de laitier et portland de laitier 89 - 122 (1). Composition 123.
- Ciment (moules en) 140 (2).
- Classification des houilles 40 (1).
— des minerais 60 - 61 (1).
— des Hauts Fourneaux 74 (2).
— des fontes 133 (1).
- Clouet 29.
- Cohésion du sable 146.
- Coke - analyses 42 (2).
— bon ou mauvais 41 fig. 35.
— résistance à l'écrasement 42 (3).
— densité du) 42 (4).
— inflammation du) 42 (4).
— de H. F. et fonderie, composition 42 (2).
— car 49 (3).
- Combustion du carbone 1 - 1 (1) - complète, incomplète - 3.
- Composition de l'air 1 (1).
— chimique des combustibles 37 (1).
— des fontes suivant emploi 137 (3).
- Comparaison des procédés direct et indirect 22-23.
- Compression du charbon 47 (3).

- Cône 103-104 fig. 89.
 Connelsville (coke de) 42 (2).
 Consommation de coke au cubilot 159 (1) (3).
 — — — H. F. 116 (2).
 — — — d'eau pour épuration des gaz 104 (1) - 107 (1) - 109 (1).
 Contrevent 17 fig. 11.
 Corps composés 36.
 Couche de minerai 8 fig. 5.
 Coulée, trou de coulée de la fonte, du laitier 21 fig. 14 - 87 fig. 69 - 88.
 Coulée debout, à plat 151 fig. 123, 124, en source 155 fig. 129.
 — par-dessus fig. 128, à vert 162, en coquille 163, 164 fig. 133 bis.
 — à la cuiller 23 fig. 17.
 Coupe, coupe et cône 103, 104 fig. 88-89 - 105 fig. 91.
 Cowper 102 fig. 84 et 85, poids de briques, surface d'empilages, caractéristiques 97 (1), manœuvre des appareils 98 (1).
 Crassier (terril) 90 fig. 71 - 91 fig. 72.
 Créosote 37 (2).
 Creuset 77 fig. 58-78 fig. 59-111 fig. 101, de graphite 79 (2), de cubilot 135.
 Crypton 1 (1).
 Cubilot 135 fig. 111 et 112.
 Cuivre 62 (1).
 Cuve du H. F. 78.
 Cylindre de laminoir 29 fig. 30.
 Cylindre soufflant 96, fig. 77.

D

- Dame 20 fig. 13 - 21 fig. 14 ,15 - 22 fig. 16, outil de mouleur 143 fig. 115.
 Danemora 133 (1) I.
 Darby (Abraham) 39.
 Décarburation de la fonte 31.
 Définition du fer et de l'acier 30-31 (1).
 Défourneuse 35 fig. 33 - 45 fig. 39 - 47.
 Densité du bois 39 (2).
 Dérangement d'allure, descente irrégulière des charges 118-119-120 (1).
 Désoxydation du minerai de fer 17.
 Désulfuration ou désoxydation du calcium 115 (1).
 Désulfuration au mélangeur 173 (1).
 Dimensions et caractéristiques d'appareils Cowper 97-98.
 — — — des fours à coke à chambre 45 (1).
 — — — des H. F. 74 (1) (2).
 Distillation des combustibles 37 (2) - 44 (1) - 46 (1) (lente et rapide).
 Dodécaèdre rhomboïdal 55 (2).
 Dolomie 58. Analyses 59 (1).
 Double coupe et cône 101 (2) - 105 fig. 91, 92 - 111 fig. 101.
 Dud Dudley 39.
 Dufour Fabre 94.
 Durée de la carbonisation des houilles 47 (4).
 Durham (charbons du) 40 (2).

E

- Eau 10 (5).
Eau ammoniacale 44 (1) - 48 (1).
Eau de refroidissement des tuyères 93 (1).
Eau d'extinction du coke 47 (5).
Ebarbage 23 fig. 17 - 129 fig. 108 - 144 - 166.
Ebauché 31.
Echelle de prix 55 (1) - 63 (1).
Economie de coke pour chauffage du vent 94 (1) - 112 (1).
Egrappoir 63 fig. 43.
Elévateur de wagons 67 fig. 47.
Elliptique (section de H. F.) 20 fig. 13.
Embrasure de la tuyère, de la coulée, 21 fig. 14.
Empilage de briques 48 (3) - poids 97 (1).
Encrenée 25 fig. 23 - 28.
Enfournement de houille 47 (2).
Ensemble, usine à fonte 122-123-124 fig. 106-107.
— de fonderie 161-162 fig. 132, 134.
Epaisseurs des maçonneries des H. F. 77 (1).
Eprouvettes (traction, flexion, compression) 131 (1) fig. 110.
Epuración des gaz 104 - 105 - 106 - 107 - 108.
— (comparaison des procédés d') 109 (1).
— électrique 107 (1) humide 104 (1) -105-106-107.
— à sec 106 - 110 fig. 100.
Erbue 59.
Essais de moulage 166.
— flexion des fontes 131 fig. 109.
Estacades 46 - 66 - 67 fig. 47 - 122 fig. 103,104.
Etats 13 fig. 8.
Etalages 73 fig. 54, 55, 56 - 111 fig. 101.
Etat naturel des minerais 62 (2).
Events 143-144.
Expansion de la fonte 158 (1).
Extinction du coke (eau) 47 (5) automatique 49 (3).

F

- Fagersta 133 (1) I.
Fer (composés oxygénés ou oxydes) 7-7 (2).
— carbonate, magnétique, oligiste 54 (1) natif 53 (1).
Fenderie 27 fig. 28 - 28 fig. 29.
Feu de finerie ou feu comtois 17.
Ferromanganèse 119 (2).
Filon 8 fig. 6.
Filtre 109 fig. 99.
Finspong 133 (1) I.
Flexion (essai de) 131 (1) - fig. 109.

- Fluidité 30 (1).
 Fondant 15 - 58 (3).
 Fonderie ancienne 26 - 23 fig. 17 - 129 fig. 108.
 Fonderies de fonte, petites pièces 161 - 162 fig. 132.
 — — grosses pièces 164 - 165 fig. 134.
 Fonte de fer découverte 16 - 29, classification, composition 88 (2).
 133 (1) - 134 (1).
 — d'affinage 119 (2) - blanche 117-118-130, grise 117-118.
 — cleveland 89 (1) - 117 (1) - 133 (1) III -- couverture Bessemer 119 (2).
 — Thomas 119 (2) - malléable 130 (1) - spiegel 117 (1) - 119 (2).
 — truitée 88 (2) - hématite 134 (1).
 Force motrice obtenue avec les gaz de H. F. 101 (1) - 107 (2) 118 (1).
 — — — fours à coke 44 (1) - 48 (2) (3) 118 (1).
 Fouloir pneumatique 144 fig. 116 - 145 fig. 118.
 Four à puddler 30 fig. 31 - hors texte fig. 32 - 31 (1).
 Four à reverbère 135 (1).
 Fourneaux de cuisine en fonte 136 (1) - 137 (2).
 Foyer catalan 16 fig. 10 - 17 fig. 11.
 Fumeron ou incuit 38.
 Fusibilité des terres 56 - 57 - 58 (2).

G

- Galerie 13 fig. 8.
 Galvanisation 9.
 Gange, définition 7 - 11 - 15.
 Garnissage du H. F. 80 (1).
 Garnissage réfractaire du mélangeur 172 (1).
 Gartsherrie 133 (1) III.
 Gaz d'éclairage, production par la houille 44 (1).
 Gaz de four à coke 44 (1) - 48 (3) - 118 (1).
 — H. F. 101 (1) - 107 (2) - 118 (1).
 Gazéification du charbon 3 (1).
 Gazogène (principe) 3 (1) - 3 (2) I - 6.
 Gazogène au coke pour chauffage de fours 49 (1).
 Gisements de minerais 8 fig. 5 couches 8 fig. 6, filon 9 fig. 7, amas 53 fig. 40, de profondeur 13 fig. 8.
 Glengarnock 133 (1) III.
 Goudron 37 (2) - 48 (1).
 Granulation du laitier 87 fig. 70, à sec 89 (2).
 Graphite de cornue 44 (1).
 Greiner 135 fig. 112 - 138.
 Grillage 59-60 (1) - 64 fig. 44 - 65 fig. 45.
 Grue 66 fig. 46.
 Grüner 74 (2).
 Gueulard de H. F. 20 fig. 13, de cubilot 135 fig. 111.
 Gueuse 21 fig. 15 - 22 fig. 16 - 23 - 27.

H

- Halle de coulée 122-123 fig. 106 - 124 fig. 107.
Hamélius 138.
Harrington 133 (1) II.
Hauts Fourneaux 71 fig. 48 - 111 fig. 101.
— (profils de) 74 (1) (2) - 75 fig. 57 - 76 fig. 57 bis.
Haüy 53 (1) - 54.
Hélium 1 (1).
Hématite minéral 60 - fonte 88 (1) - 133 (1) I-II - 134 (1).
Historique 14-15-16-16 (1).
Hornblende 58 (3).
Houilles (classification des) 40 (1).
— à coke 40 (1), III, IV.
Huiles, légères, moyennes et lourdes 48 (1).
Humidité des minerais 62 (2).
Hydrocarbonate de cuivre, de zinc, 9.
Hydrocarbures (série grasse et aromatique) 37 (2).
Hydrogène sulfuré 37 (2).

I

- Incuît 38.
Indice de marche du Haut Fourneau 113 (1).
Influence du silicium, du soufre, du phosphore, du manganèse sur les fontes 106-114 (2) - 131-132.
Infusibilité du sable 145.
Intensité de réduction ou allure du H. F. 106-114-118-119.

J

- Jaspe 53 (1).
Jet de coulée 137-144.
Joint 149

K

- Knab (Louis) 46.

L

- Laitier 22 fig. 16 - 89, par tonne de fonte 89 (3).
— (trou de coulée du) 89 (1) - 87 fig. 69 (granulation du) 89 (2).
87 fig. 70.
— caractéristique des différents 117 (1).
Laminaires cannelés 29 fig. 30.
Lignite 35 (1) - 36 (1) - 37 (1).

- Lingotière 88 - 137 (3).
 Lit de fusion 116 (1).
 Longwy 133 (1) III.
 Loupe 15.
 Loups au H. F. 79 fig. 60 - 127.
 — au mélangeur 174.

M

- Magnésie (fusion) 57 (1).
 Magnétite 7 (1) - 8 (1) - 54 (1).
 Manganèse 55 (5) - 119 (2) - 132.
 Manutention matières 56 (3) - 67 (1).
 Maquette 25 fig. 24-25.
 Marcassite (pyrite) 55 (2).
 Marmittaille 132 (3) - 136 (1) - 137 (3).
 Marnaval 133 (1) III.
 Marne 58.
 Martin (fonte) 175 (2) - fours 49 (1) - 174.
 Masselotte 156.
 Massiau 31.
 Matières volatiles hydrocarbonées 41 (2).
 Mélangeur de fonte 171.
 — actif ou préparateur 174 - 174 (1).
 Mélanges de houille pour coke 46 (4).
 Mélanges de fontes 136 (1).
 Menu de coke 49 (4).
 Méthane 44 (1).
 Meule (carbonisation des bois) 38 fig. 34.
 — de broyeur 130 (1).
 Middlesbrough ou Middlesbro 133 (1) II - 168.
 Minerai de fer 53-54 définition 54 - classification 60 - analyses 61 (1).
 Minette 54 (2).
 Mise en route (fours à coke) 45.
 Mise à feu du Haut Fourneau 86 (2).
 Mise au mille 116 (2).
 Modèle 140 - démontable 143 fig. 113.
 Monge 29.
 Monte-charges 81.
 Moteur à gaz de four à coke 48 - de H. F. 95 fig. 76 - 96 fig. 78.
 Moulage, principe 140 - procédé 149, à plat 150, mécanique 150.
 — en fosse et en terre 153-154, au trousseau 153 fig. 125.
 — en coquille 163-163 (1) fig. 133 bis.
 — centrifuge 152 (1).
 — des tuyaux 151 fig. 123, 124.
 — d'une marmite 140 fig. 113, 114.
 — ancien 23 fig. 17 - 129 fig. 108.

N

- Naphte (essence de) 48 (1).
Naphtaline 48 (1).
Néon 1 (1).
Nomenclature chimique 2 (1).
Noyau 151-152 (portée du) et (support de) 152 (2).

O

- Oligiste ou fer oligiste 8-8 (1) - 54 (1).
Opération chimique 1.
Oreille 149 (1) fig. 120.
Outils de mouleur 143 fig. 115.
Ouvrage 72-73.
Oxygène 1 (1) - 36.
Oxyde de carbone (toxicité) 2 (2).
Oxyde de fer 7 et 7 (1) (2).
Oxyde magnétique 7 (2).
Oxydation des éléments de la fonte 175 (1).
Oxydation au mélangeur 176 (1).
Oxydes métalliques terreux 58 (1).
Oxydure de fer 30.

P

- Passage de la fonte blanche à la grise 130.
Patouillet 63 fig. 43.
Percée du H. F. 121.
Perméabilité du sable 145-146 (1).
Peroxyde de fer ou rouille 7 (2).
Perte au feu au cubilot 159-159 (1).
Phénol 37 (2) - 48 (1).
Phénanthrène 48 (1).
Phoenix 133 (1) III.
Phosphore 42 (1) - 56 (1) - 60 - 175 (1).
Pièce 24 fig. 21.
Pièces trempées (en fonte) 137 (1).
— résistantes (en fonte) 137 (2).
Pilettes 144 (1) fig. 117.
Pilon 31.
Pilonneuse, pilonnage 47 (3).
Plaque d'usure 130 (1).
Plasticité du sable 140.
Plateforme de chargement 81 fig. 62.
Plomb 55 (5) - 62 (1) - 114 (2).
Poêle courant 5 fig. 2, à combustion lente 6 fig. 4.
Poélerie 137 (3) - 136 (1).

- Poids de briques d'empilage 97 (1).
 Poitrine 19 fig. 12.
 Porosité du charbon de bois 39 (3).
 Porphyre 53 (1).
 Poudre d'ardoise 143.
 Pression atmosphérique 18 (1).
 Principe de la métallurgie du fer 13.
 Prise de gaz, centrale, latérale 101 (2).
 Prix des minerais 55 (1) - 62 (2) - 63 (1).
 Prix de revient de fonderie 159-160-161.
 Procédés direct et indirect (consommation de charbon) 16-18-19-20.
 Production du H. F. 74 (1) (2).
 Procédé primitif 14 fig. 9.
 Profil 72-73-74 (1) (2) - 75-76.
 Profondeur (gisement de) 13 fig. 8.
 Protoxyde de fer 54 (1).
 Puddlage 30 fig. 31 - 31 - hors texte fig. 32.
 Puissance calorifique des combustibles 36 (1) - 37 (1).
 — — gaz de fours à coke 48 (3).
 — — hauts fourneaux 107 (2).
 Puits de mine 13 fig. 8 - 57 fig. 41.
 Purification des gaz 104.
 Pyrène 48 (1).
 Pyrite (de fer, de cuivre) 10-11-55 (2) marcassite 55 (2) cendres 60 (1).
 Pyroligneux 37 (2).

Q

- Quantité de laitier par T. de fonte 89 (3).
 — gaz produite au H. F. 101 (1).
 — d'eau nécessaire pour l'épuration des gaz 104 (1).
 Quencher 49 (3).

R

- Réactions chimiques, équation de combustion du carbone 3 (2).
 — désulfuration 115 (1) - 173 (1).
 — déphosphoration 175 (1) - 176 (1).
 Récupérateur ou régénérateur de chaleur 48 (3).
 Récupération des sous-produits 46 (1) - 48 (1).
 Réduction, réductibilité des minerais 17-18.
 Réfractaire (briques) 79 (1) (fontes) 137 (2).
 Refroidissement de tuyères 93 (1) de creusets et cuve 77 fig. 58.
 Réglage de l'intensité de réduction au H. F. 115.
 Renardière 23, renard 24 fig. 19.
 Rendement en charbon de bois 38 (1) en coke 46 (4).
 Réservoir de machine soufflante, 93 fig. 74.
 Résistance des fontes 131 fig. 109-110.
 — cokes 47 (3).

Retassure 156-157 fig. 130, 131.
Retrait 140 (1).
Reverbère (four) 135 (1) - 159 (2).
Rhonboèdre 55 (2).
Richesse en fer d'un minerai 54 (1).
Ringard 43 (1).
Risdale 133 (1) I.
Roue hydraulique 1 fig. 1 - 20 fig. 13.
Rouille 6-7.
Rouverin 56.
Ruhr (charbon de la) 40 (2).
Rustine 20 fig. 13.

S

S (conduite en) 107 fig. 95.
Sable (silice) 7 - 145 (1).
Sable de moulage 145-145 (1).
Sable vert 145 (1).
Saumon de coke 47.
Schiste bitumineux 37 (2).
Scorie de forge 15-15 (1) - 55 (4).
Sec (épuration à) 108 fig. 100.
Séchage des moules 154 fig. 126.
Seconde fusion de la fonte 134 (1).
Secours (tuyères de) 120-121.
Section de passage du vent aux tuyères 93 (1).
Séparateur d'eau 108 fig. 98.
Serpentine 53 (1).
Sesquioxyde de fer ou rouille 7 (2) - 54 (2).
Sidérurgie (définition) 1.
Sidérose 9 (1) - 54 (1).
Siegen 19.
Silice (fusion) 57 (1) - 145 (1).
Silicium (dans les fontes) 130-137 (1).
Skip 83 - 82 fig. 63.
Sole du foyer catalan 17 fig. 11 des fours à coke 43 fig. 37, du H. F.
77 (1) - 111 fig. 101.
Soufflante ancienne 92 fig. 73, à vapeur 93 fig. 74 - 94 fig. 75 - à gaz
95 fig. 76 - centrifuge 97-98 fig. 79-80.
Soufflerie 17-19 fig. 12.
Soufflets 1 fig. 1 - 20 fig. 13.
Soufflures 155 (1).
Soufre 42 (1) - 55 (2) (5).
Sous-oxyde de fer 7 (2).
Spatard 27 fig. 28.
Spatule 143 fig. 115.
Stéarine 157 fig. 130, 131.
Sucre (composition) 36.

- Suède (fonte de) 133 (1) I - 168.
 Sulfure d'argent, de cuivre, de fer, de manganèse 9 - 173.
 Sulfure d'hydrogène 44 (1).
 Sulfurique (acide) 10.
 Surface de chauffe 48 (2).
 Surface nécessaire au moulage, à l'ébarbage 165 (1) (2).
 Symbole chimique 7 (2).

T

- Talc 143
 Tassage 143 - 144 (1).
 Télésie 53 (1) - 54.
 Température du vent 95 (1).
 Teneurs limites en gaz carbonique et oxyde de carbone dans l'air 2 (2).
 Teneur en fer des minerais 54 (1) - 56 (2) - 58 (3).
 Terre 147 (1).
 Terril 90 fig. 71.
 Théorie élémentaire de la fabrication du fer 15.
 Théorie du cubilot 138.
 — H. F. 109.
 Thermomètre 157.
 Thomas (fonte) 74 - 117 (1) - 119 (2).
 Tirer de l'air 146 (1).
 Titane 62 (1).
 Tocquerie 27, fig. 28.
 Torricelli 18 - 18 (1).
 Tourbe 36 (1).
 Tour de fer 31.
 Tours (de machine soufflante) 91 (1).
 Toxicité des gaz du carbone 2 (2).
 Transfert du carbone 114.
 Transporteur aérien 81, fig. 62.
 Transport de la fonte liquide 140.
 Trémie 46 - 122 fig. 105.
 Triage électromagnétique 65 - 147 (2).
 Trignac 133 (1), II, III.
 Trompe hydraulique 16, fig. 10 - 92, fig. 73.
 Trou de coulée du Fourneau 21, fig. 14 - 111, fig. 101.
 — — cubilot 135, fig. 111.
 Trousseau 153, fig. 125.
 Truitée 88.
 Turbine 93.
 Tuyère du four catalan 17, fig. 11 - 18 - du H. F. 21 fig. 14 - 100
 fig. 82 - du cubilot 139.
 Tuyaux de fonte pour chauffage du vent 94.
 — — assainissement 137 (2).
 — conduites (fonte) 137 (2).
 Tympe 20, fig 13 - 100, fig. 82.

U

- Usine à fonte 121 - 122 fig. 106, 107.
Usure du briquetage du H. F. 79 fig. 60.
Utilisation des gaz de fours à coke 48 (3).
— — Haut-Fourneau 107 (2) - 118 (1).

V

- Valeur marchande d'un minerai 54 (1) - 56 (2) - 58 (3).
Van der monde 29.
Vapeur récupérée dans la carbonisation de la houille 48 (2).
Varme 26 fig. 27.
Vent (insufflation) 93 fig. 74 - 75 - 76.
Ventre 20 fig. 13 - 72.
Verge 27 fig. 28.
Vitriol 10 - 10 (5).
Voûte d'assèchement 20 fig. 13.

W

- Wagonnet de chargement pour fours à coke 47 (1).
Wagon à coke (coke-car) 49 (3).
Watt (machine de) 90.
Whitwell (poids de brique), 97 (1) - 101 fig. 83.

X

- Xénon 1 (1).

Z

- Zinc 9 - 55 (5) - 62 (1) - 114 (2).
Zones de dessiccation, calcination, réduction, fusion, carburates de
H. F. 111 fig. 101.
Zones de fusion du cubilot 158 - 159.
-

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace.

Préface.

CHAPITRE PREMIER

Définition de la sidérurgie, opérations chimiques	1
Combustion du carbone. - Combustion complète, incomplète, air nécessaire	3
Combustion vive (cheminée, poêle courant)	
Combustion lente (poêle à combustion lente)	5
Origine du fer. - Oxydes de fer. - Minerais de fer. - Gisements (couches, filons, amas)	7
Attaque des métaux par l'oxygène de l'air	9
Action du soufre	10
Résumé du chapitre premier	11

CHAPITRE II

Principe de la sidérurgie, réduction du minerai de fer	13
Procédé primitif de fabrication du fer	14
Théorie élémentaire de la fabrication du fer	15
Méthodes directe et indirecte de production du fer. - Foyer catalan. - Origine du haut-fourneau	16
Le haut-fourneau ancien, disposition, construction	20
Comparaison des procédés direct et indirect, affinage de la fonte de fer. - Affinerie ou renardière	22
Fonderie de fer. - Fenderie - Laminoir ancien	26
Différences entre le fer, la fonte et l'acier	29
Production du fer par le puddlage	30
Résumé du chapitre II	33

CHAPITRE III

Nature des combustibles employés en sidérurgie	35
Notions sur les corps composés, composition élémentaire ou analyse des différents combustibles	36
Distillation des combustibles (bois, lignites, houilles)	37

Carbonisation du bois en meules, charbon de bois	38
Origine de l'utilisation de la houille en sidérurgie, classification des houilles, caractéristiques des houilles à coke	39
Caractéristiques d'un bon coke métallurgique	40
Fabrication du coke. - Four de boulanger	41
Four à coke à chambre	43
Fabrication moderne du coke, disposition d'ensemble d'une usine de carbonisation, récupération des sous-produits ..	45
Résumé du chapitre III	51

CHAPITRE IV

Définition du minerai de fer, teneur en fer d'un minerai. Carac- téristiques des minerais	53
Notions sur la fusibilité des terres, silicates. - Lois de Berthier. - Théorie sur la recherche du fondant le plus favorable pour un minerai déterminé	56
Fondant calcaire, fondant silicieux. Classification des minerais, Eléments étrangers, Soufre, Arsenic, Plomb, etc.	59
Enrichissement, traitement mécanique, bocardage, lavage des minerais. - Valeur des minerais, grillage	62
Manutention et mise en stock des minerais	66
Résumé du chapitre IV	69

CHAPITRE V

Le Haut-Fourneau, disposition d'ensemble	71
Le Profil, ses transformations successives, son influence sur la marche du Haut-Fourneau. - Classification des Hauts- Fourneaux d'après Grüner, exemples, chiffres et documents pratiques	72
Construction et briquetage du Haut-Fourneau, refroidissement du creuset et des étalages. - Creuset en acier avec revête- ment en graphite. Durée et transformation du profil en marche, par usure de la partie réfractaire	77
Chargement du Haut-Fourneau et ses modifications successives. Chargement automatique par skip et benne-trémie —....	81
Coulée de la fonte, coulée du laitier, insufflation du vent, machi- nes soufflantes modernes. - Caractéristiques des fontes grise, truitée et blanche	90
Chauffage du vent, appareils Whitwell et Cowper, séchage de l'air insufflé. - Air suroxygéné. - Conduite circulaire. - Tuyère à vent	94
Captage et purification des gaz de Haut Fourneau. - Appareils de fermeture et de prise de gaz. - Systèmes d'épuration : humide, à sec, électrique	101

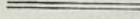
Utilisation des gaz de Haut Fourneau pour la force motrice et le chauffage	107
Théorie complète de la réduction au Haut-Fourneau	109
Réduction du silicium. - Réglage de l'intensité de réduction au Haut-Fourneau	114
Calcul du lit de fusion, types de fontes et laitiers correspondants Calcul de la force motrice disponible dans les gaz des Hauts-Fourneaux	115
Conduite du Haut-Fourneau, les différentes allures, les accidents de marche	118
Disposition d'ensemble des usines à fonte	121
Résumé du chapitre V	125

CHAPITRE VI

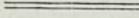
Les diverses fontes, leur composition, leurs propriétés. - Influence du silicium, passage de la fonte blanche à la fonte grise	129
Influence du phosphore, du soufre, du manganèse sur les propriétés des fontes. - Classification des fontes d'après la composition chimique, l'emploi, le grain	132
La seconde fusion de la fonte. - Choix des mélanges, perte à la fusion. - Le cubilot et sa théorie. Cubilot Greiner - Coulée de la fonte et du laitier. Transport de la fonte liquide	134
Principe du moulage. - Modèle. - Chassis. Tassage du sable. - Event. - Jet de coulée	140
Les sables pour fonderie, leurs propriétés. La préparation du sable	145
Les chassis, leur constitution. - Chassis démontables, interchangeables	147
Les procédés de moulage, à découvert, en chassis. - Moulage mécanique. Le noyau. - Moulage au trousseau. - Moulage en terre. - Coulée des tuyaux. Séchage des moules	149
Procédés de coulée (par dessus, en source). - Masselottes, retassure, soufflures	155
Conduite du cubilot, les allures, la consommation de coke, la perte au feu	158
Prix de revient de fonderie	159
Disposition d'ensemble de fonderies pour petites pièces. Moulage en coquille. - Machine à projection de sable. - Disposition d'une fonderie de grosses pièces	161
Organisation d'ensemble des fonderies de fonte	166
Résumé du chapitre VI	167

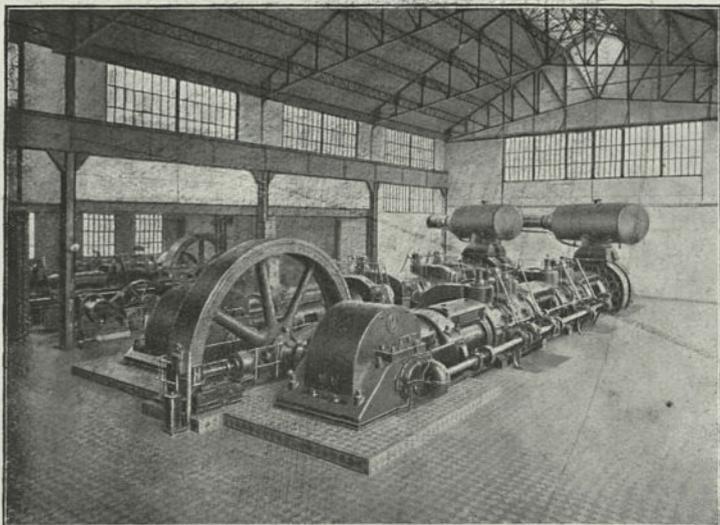
CHAPITRE VII

Définition du mélangeur, son but initial. Constitution et fonctionnement du mélangeur	171
Résultats obtenus avec les mélangeurs des différents types. - Désulfuration au mélangeur	172
Refroidissement, loup, chauffage du mélangeur. Mélangeur actif.	173
Action de déphosphoration et oxydation des éléments constitutifs de la fonte au mélangeur. - Usages actuels du mélangeur dans le cycle des usines sidérurgiques	175
Résumé du chapitre VII	178



Tous droits réservés.
Copyright by S. Brull 1933.





Soufflante d'aciérie à gaz de 5100 ch.

MOTEURS A GAZ

Groupes Electrogènes

Soufflantes à Gaz de Hauts-Fourneaux

Installations complètes
de Centrales à Gaz

SOCIÉTÉ ALSACIENNE DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

Société Anonyme au Capital de 114.750.000

Usines à :

MULHOUSE (Haut-Rhin)

GRAFFENSTADEN (Bas-Rhin)

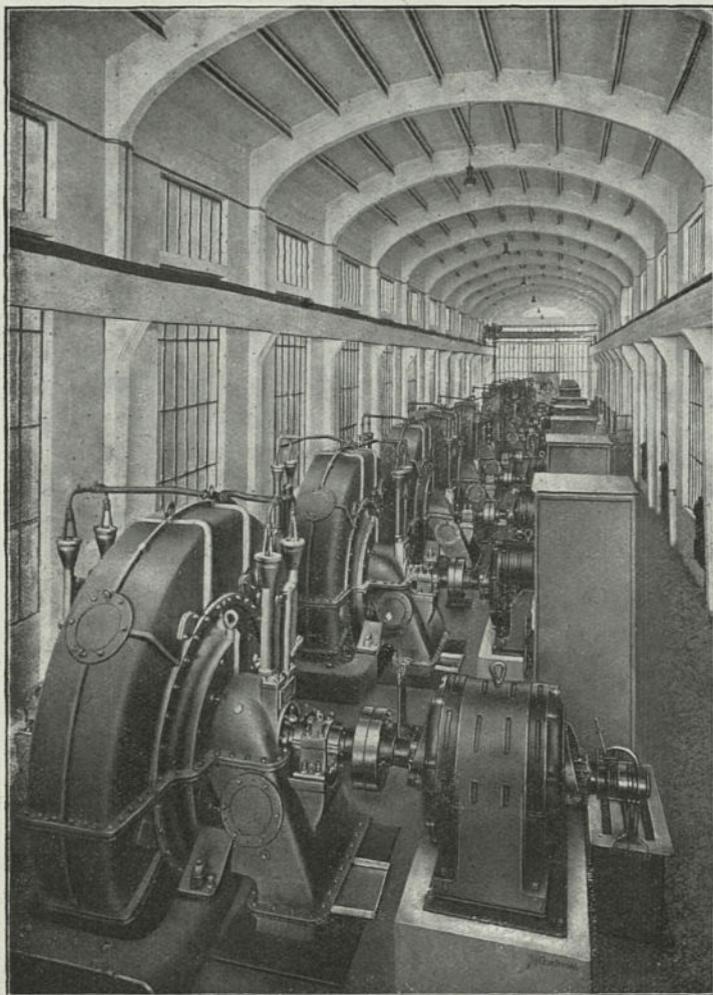


CABLERIE A CLICHY (Seine)

Maison à **PARIS** :

52, Rue de Lisbonne (8^e)

ÉPURATION DES GAZ DE HAUTS-FOURNEAUX



Centrale d'épuration de gaz

Installations complètes d'épuration des gaz par désintégrateurs
Système Theisen
Bassins de décantation.

SOCIÉTÉ ALSACIENNE DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

Société Anonyme au Capital de 114.750.000 Francs

Usines à :

MULHOUSE (Haut-Rhin)

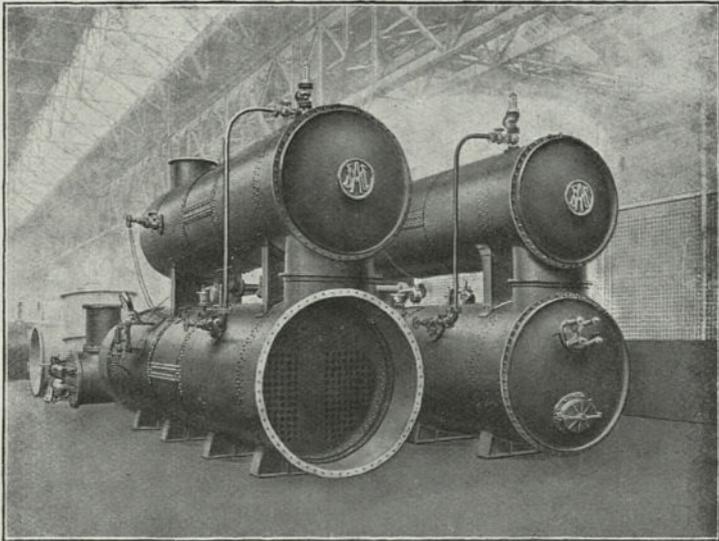
GRAFFENSTADEN (Bas-Rhin)



CABLERIE A CLICHY (Seine)

Maison à **PARIS** :

52, Rue de Lisbonne (8^e)



*Chaudières de récupération de 130 m², 12 hp 7
au hall de montage.*

CHAUDIÈRES

pour toutes applications et tous systèmes de chauffage

Chaudières "ATMOS" à haute pression

Chaudières de récupération

MACHINES A VAPEUR

de tous genres

SOCIÉTÉ ALSACIENNE DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES

Société Anonyme au Capital de 114.750.000 Francs

Usines à :

MULHOUSE (Haut-Rhin)

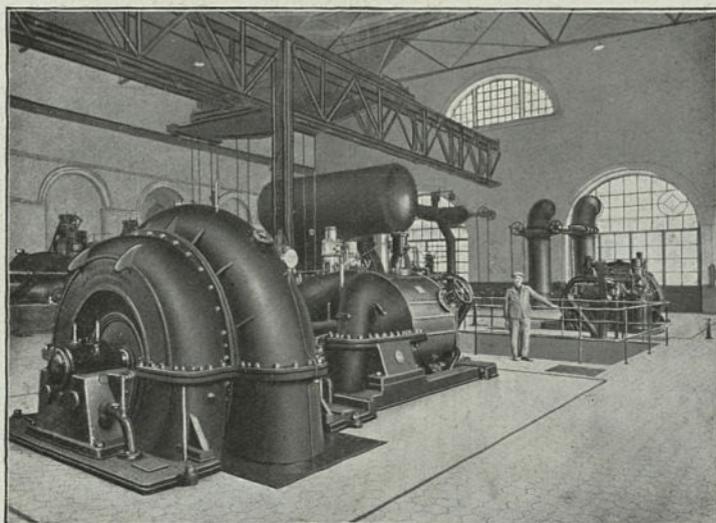
GRAFFENSTADEN (Bas-Rhin)



CABLERIE A CLICHY (Seine)

Maison à **PARIS** :

52, Rue de Lisbonne (8^e)



*Deux groupes de turbo-souffiantes de hauts-fourneaux
de 72.000 m³/h.*

TURBO-MACHINES
TURBO-COMPRESSEURS
TURBO-SOUFFLANTES

**SOCIÉTÉ ALSACIENNE
DE CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES**

Société Anonyme au Capital de 114.750.000 Francs

Usines à :

MULHOUSE (Haut-Rhin)

GRAFFENSTADEN (Bas-Rhin)



CABLERIE A CLICHY (Seine)

Maison à **PARIS** :

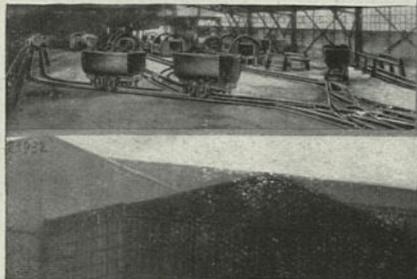
52, Rue de Lisbonne (8^e)

DEMAG

Installations Complètes pour Usines, Carrières et Percements de Tunnels

Extraction :

Aménagements de trappes de puits, y compris les revêtements hermétiques.
Appareils de suspension, attelages et pince-câbles, amortisseurs.
Bandes transporteuses pour galeries et voies de tailles.
Bennes raclieuses.
Cages d'extraction avec parachutes de sûreté.
Chevalements de puits et bâtiments.
Encageurs mécaniques, électriques ou pneumatiques, y compris tous les appareils de sûreté et blocages de voies.
Fermetures pour portes de puits, à fonctionnement automatique ou commandé.
Installations de déchargement de stérile.
Installations de distillation sèche et de gazéification.



Installations de dépoussiérage.
Installations d'extraction par skips ou à cuffats se vidant par le fond, y compris tous les appareils d'amenée, de mesure et de transport au fond et au jour.
Installation de condensation et réfrigération.
Installations de séchage pour cokeries, houillères, mines de lignite et de potasse et carrières.
Installations de circulation de berlines, y compris tous les aménagements pour service automatique.
Installations d'épuisement d'eau.
Machines à vapeur.
Machines d'extraction.
Machines pour fours à coke.
Molettes.
Moteurs à gaz système Thyssen.
Pelleteuses Butler, chariots chargeurs et chaînes à raclettes.
Pelles mécaniques.
Pièces de forge.
Planchers mobiles aux recettes, combinés ou non avec encageurs.

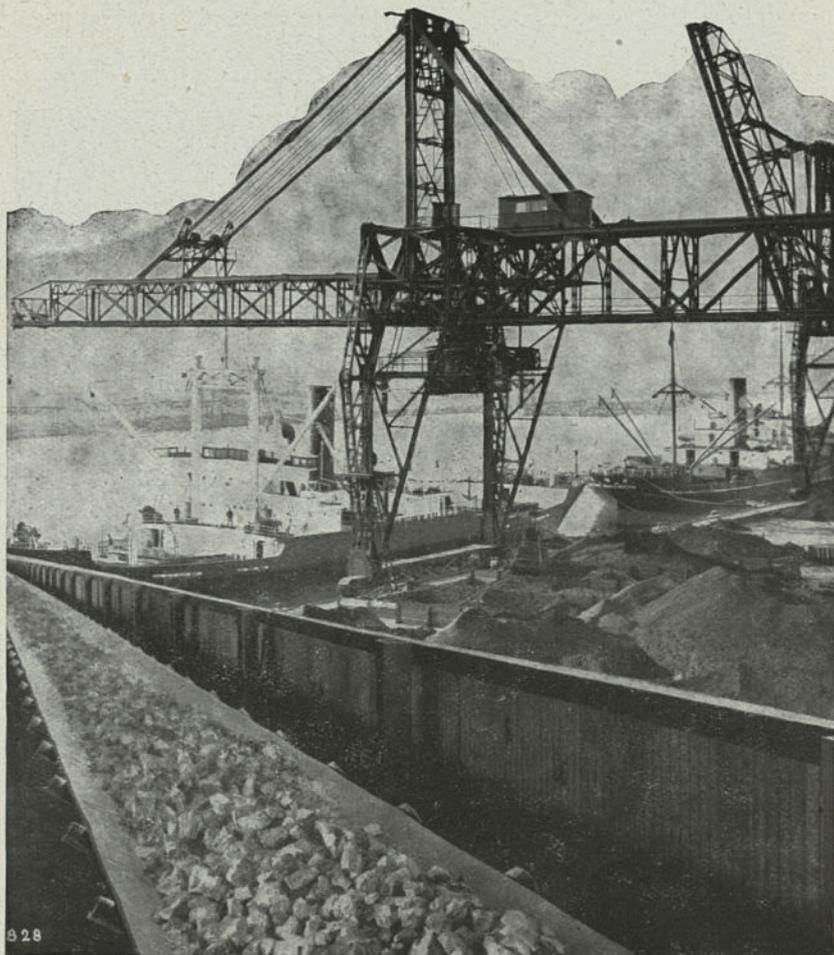
Presses à briquettes.
Sas automatiques d'aérage au fond et au jour.
Trainages à chaîne.
Transmission pour commande de ventilateurs.
Treuil de balances et de plans inclinés.

Outillage pneumatique.

Aspirateurs de gaz.
Bêches à air comprimé.
Compresseurs à haute pression.
Compresseurs de tous genres, fixes et mobiles à piston et rotatifs.
Compteurs d'air.
Haveuses.
Locomotives à air comprimé.
Machines à forger et à affûter les fleurets.
Marteaux piqueurs.
Perforateurs et fêleurs.
Moteurs pour couloirs à secousses.
Perforatrices rotatives et à percussion.
Pompes à vide.
Turbo-soufflantes, turbo-compresseurs.

DEMAG

Ponts transbordeurs pour Minerai, Charbon, etc...



828

Appareils pour l'approvisionnement en charbon.

Arrache-pieux.

Bacs suspendus.

Bennes preneuses à minerai et à charbon.

Cabestans.

Chariots transbordeurs.

Compresseurs.

Culbuteurs de wagons.

Grappins à bois et toutes matières en vrac.

Grues à vapeur et à moteur à combustion interne.

Grues pour la construction de môles.

Grues flottantes.

Grues à volée variable.

Grues de port de tous genres.

Hangars.

Installations de séchage pour denrées coloniales et matières en vrac de tous genres.

Plaques tournantes.

Ponts.

Portiques transbordeurs.

Pelles mécaniques.

Sonnettes.

Soufflantes et aspirateurs d'air pour installations de transport.

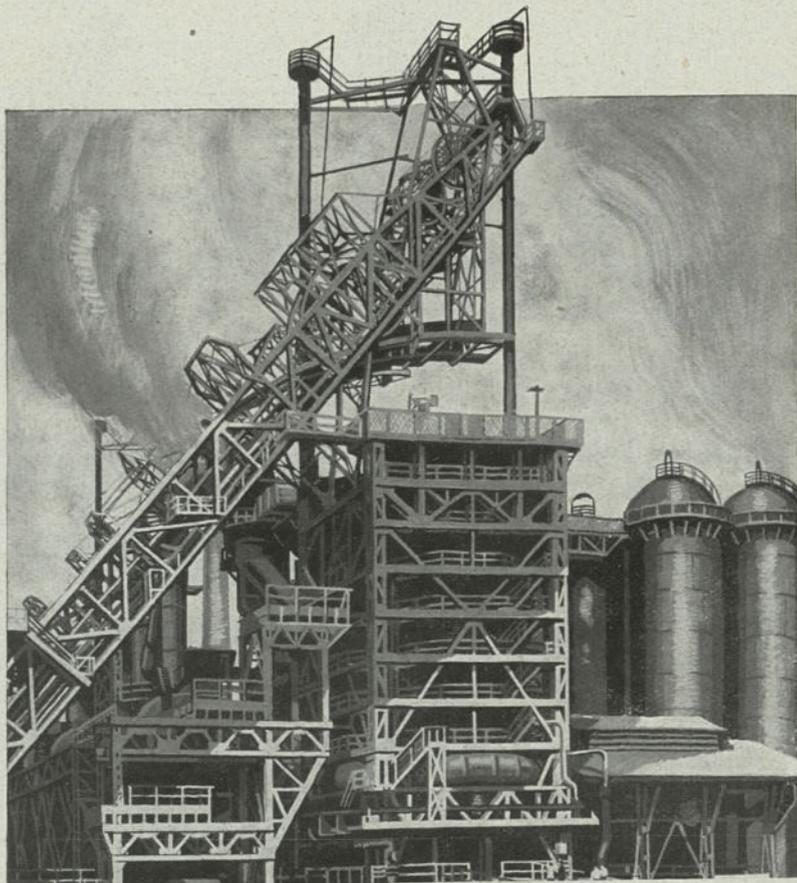
Treuil de manœuvre.

Treuil breveté de chargement de navires.

Treuil breveté d'emmagasinage.

DEMAG

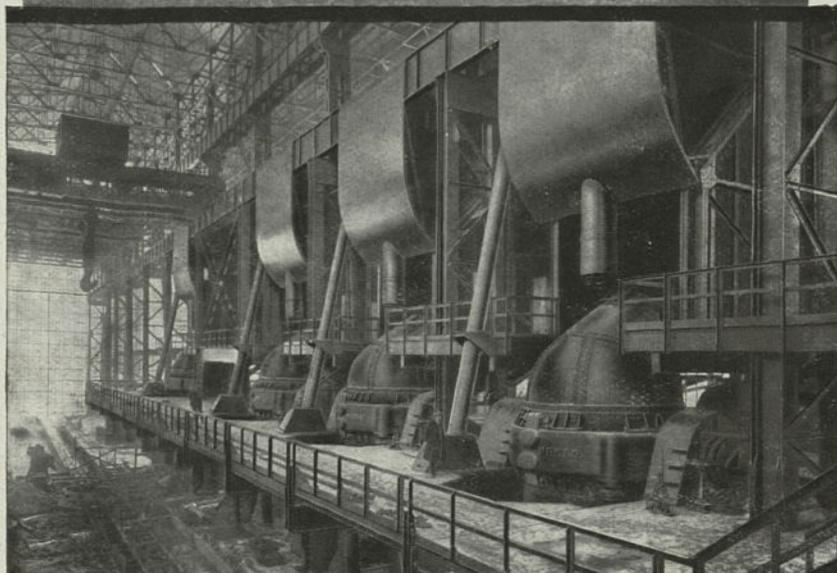
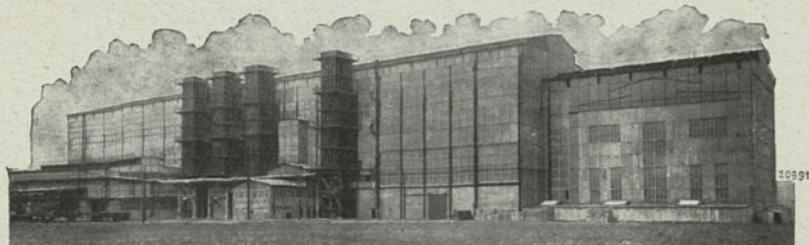
Installations de Hauts-Fourneaux



Accumulateurs pour coke et minerai.
Appareils de chargement.
Appareils pour granuler le laitier, brevet
Buderus.
Appareils à air chaud.
Carcasses, armatures et blindages de hauts-
fourneaux.
Casse-gueuses.
Chariots à fonte et à laitier.
Chariots d'amenée.
Compresseurs rotatifs pour gaz.
Constructions métalliques
Machines à déboucher les trous de coulée.
Electro-aimants de levage.
Epurateurs des gaz du gueulard.
Fermetures d'accumulateurs.

Fermetures de gueulard.
Installations de séchage pour laitiers et
minerais de fer de tous genres.
Installations de transport pour minerai, coke
et gueuses.
Machines à vapeur.
Machines à mouler les gueuses.
Machines à couler.
Moteurs à gaz système Thyssen.
Ponts roulants pour chantiers de coulée.
Ponts roulants concasseurs et transporteurs
de gueuses à électro-aimant.
Soufflantes.
Treuils de gueulard.
Turbo-soufflantes.

DEMAG



Aciéries et Laminoirs

et toutes les Machines Accessoires et de Services annexes

Grues et Appareils de Manutention

Installation de Chantiers Navals et Outillage de Ports et de Parcs
Installations pour Centrales, Usines, Chemins de Fer, Travaux Publics,
Construction de Routes, Industries Chimiques, Alimentaires et Textiles,
Verreries, Fabriques de Ciment, Papeteries, etc.,

Trommels sécheurs et à cuire.

Pelles mécaniques et Grues locomobiles.

Palans Electriques.

Engrenages de précision pour Turbines, navires, etc.

Représentant pour la France et les Colonies :

A. LEGENDRE, 33, Rue d'Amsterdam, PARIS (8^e)

Achévé d'imprimer

par

ANDRÉ WELLHOFF

28, Boul. Haussmann, Paris

en Janvier 1933.

=====
ANDRÉ WELLHOFF
— IMP. —
28. BOUL. HAUSSMANN
— PARIS —
=====