



FABRICATION

DE LA FONTE

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

DES

AIDE - MÉMOIRE

PUBLIÉE

SOUS LA DIRECTION DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT

DE BILLY — Fabrication de la Fonte

1

*Ce volume est une publication de l'Encyclopédie
scientifique des Aide-Mémoire ; F. Lafargue, ancien
élève de l'École Polytechnique, Secrétaire général,
46, rue Jouffroy (boulevard Malesherbes), Paris.*

N° 100 A

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE DES AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT.

FABRICATION
DE LA FONTE

PAR

E. DE BILLY

Ingénieur au Corps des Mines

PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET FILS,

IMPRIMEURS-ÉDITEURS

Quai des Grands-Augustins, 55

G. MASSON, ÉDITEUR,

LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Boulevard Saint-Germain, 120

(Tous droits réservés)

PREMIÈRE PARTIE

PARTIE THÉORIQUE

CHAPITRE PREMIER

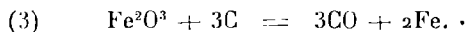
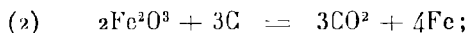
RÉACTIONS DU HAUT-FOURNEAU

On peut distinguer dans le haut-fourneau, au point de vue de l'étude des réactions chimiques, deux zones distinctes. La région inférieure est la zone de combustion : sous l'influence de la haute température qui s'y développe les laitiers fondent. Au-dessus, les étalages et la cuve sont le théâtre d'échanges de chaleur entre les gaz produits par la combustion et la charge solide qui descend du gueulard. C'est dans cette zone que s'accomplissent presque complètement : la réduction du minerai, la décomposition de la castine, enfin, dans la partie la plus chaude,

REACTIONS DU HAUT-FOURNEAU

l'élaboration des laitiers, la réduction de divers métalloïdes et leur incorporation dans la fonte.

La réduction du minéral s'effectue, partie aux dépens du combustible solide, partie aux dépens de l'oxyde de carbone formé dans la zone de combustion. Cette réaction peut se représenter par les trois formules suivantes :



La première de ces transformations s'effectue sensiblement sans absorption ni dégagement de chaleur ; la seconde absorbe environ 1500 calories par kilogramme d'oxygène enlevé au minéral ; et la troisième 2 700.

Mais ces trois formules sont loin de représenter toute la complexité des réactions. Et la transformation finale est le résultat d'un équilibre qui s'établit entre des réactions fort complexes, et dont l'importance relative change suivant les variations d'allure du fourneau et la composition de la charge.

L'action réductrice de l'oxyde de carbone sur l'oxyde de fer commence à des températures variables suivant la nature physique du minéral.

Faible à 141° C et déjà marqué à 149° C sur de l'oxyde précipité, elle ne commence guère qu'à 200° C sur les carbonates grillés. A mesure que la température s'élève et que la vitesse du courant gazeux augmente, l'intensité de cette réaction croît rapidement. A 400° C, la réduction est active pour tous les minerais.

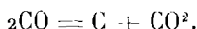
Elle est contrariée à l'intérieur du haut-fourneau par la réaction inverse de l'acide carbonique sur le fer réduit, qui régénère l'oxyde de carbone. Cette réaction, nulle à 300° C, est active vers 417° C et très intense au rouge. Ainsi, à 417° C, l'action oxydante de ce gaz sur le fer réduit cesse, si on substitue au courant de CO² un courant composé de volumes égaux de CO et CO². Si l'on élève progressivement la température, il faut, pour neutraliser cette action, une proportion d'oxyde de carbone de plus en plus forte. Au rouge clair, les expériences de sir Lowthian Bell, confirmant celles de H. Debray, ont montré qu'un courant composé de volumes égaux des deux gaz, correspondant à un rapport en poids $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}} = 1,581$, tend à ramener à l'état de FeO l'oxyde Fe²O³ aussi bien que le fer réduit. A cette température, un courant de CO pur oxyde partiellement le fer réduit. Grâce à ces

deux réactions qui tendent à se neutraliser, il faudra donc, pour réduire l'oxyde de fer, que l'atmosphère du haut-fourneau renferme un grand excès d'oxyde de carbone. Mais la réduction ne sera jamais complète : il ne paraît pas que l'oxyde de carbone seul puisse ramener le fer au-dessous du degré d'oxydation correspondant à la formule Fe^2O .

La réduction ne peut donc s'achever que par l'action du carbone solide. Mais il se produit au voisinage du gueulard une réaction qui joue un grand rôle dans les transformations du minerai : la décomposition de l'oxyde de carbone en acide carbonique et carbone, au contact des sous-oxydes ou du fer réduit. Cette réaction, découverte par sir L. Bell, a été étudiée principalement par ce savant, et par M. Grüner. Elle paraît commencer vers 200°C , mais n'est guère marquée avant 240° ; entre 400 et 450°C elle atteint son maximum d'intensité ; puis elle s'affaiblit ; au rouge, elle est peu active, sans pourtant cesser complètement. Sous l'influence de cette réaction, le minerai, pénétré par les gaz réducteurs, « se fissure dans tous les « sens, foisonne beaucoup, et se couvre de car- « bone pulvérulent, sorte de carbone ferrugi- « neux, véritable composé de carbone et de fer,

« tenant au maximum 5 à 7 % de fer métallique, « et renfermant toujours aussi une faible dose « de fer oxydé, en majeure partie magnétique, « dont le rôle semble essentiel à la réaction « qui provoque ce dépôt de carbone (1) ».

Cette réaction peut s'exprimer par la formule :



Mais elle ne se produit jamais directement. D'après M. Grüner, la présence du fer réduit serait nécessaire pour la provoquer. Le contraire paraît résulter des expériences de sir L. Bell. Mais il faut, en tous cas, qu'il existe du fer à l'état de sous-oxyde :

Ainsi un courant de CO^2 , passant sur de l'oxyde FeO , le transforme en Fe^2O^3 sans dépôt de carbone, tandis qu'un courant de CO y produit, en même temps qu'une réduction partielle, un dépôt abondant. D'autre part, on a constaté la présence du carbone réduit dans de l'oxyde où un courant de CO avait diminué de 7,4 % la teneur en oxygène, sans qu'aucun réactif ait pu y révéler la présence du fer métallique.

L'acide carbonique ne provoque aucun dépôt de ce genre sur le fer à l'état métallique. Au

(1) GRÜNER. — *Études sur les Hauts-Fourneaux.*

contraire, un courant de CO, passant à 410° C sur du fer parfaitement réduit, produit en 4 heures et demie un dépôt de carbone qui s'élève à 20,3 % du poids du fer. L'action de l'oxyde de fer est plus énergique encore que celle du fer métallique. Mais si on fait passer sur de l'oxyde Fe²O³ un courant renfermant des volumes égaux de CO et CO², le dépôt de carbone n'a pas lieu : on a vu, en effet, qu'il tend alors à se produire du protoxyde FeO. Le dépôt de carbone ne commence que sous l'influence d'un courant renfermant en volumes 2 de CO pour 1 de CO², correspondant à un rapport en poids :

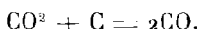
$$\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}} = 0,79.$$

Ce dépôt peut être extrêmement abondant. A 410° certains minerais, soumis pendant 6 heures à un courant d'oxyde de carbone, s'imprègnent d'un poids de carbone supérieur au poids de fer qu'ils contiennent tandis qu'ils ne perdent qu'un tiers de leur oxygène. Mais cette réaction dépend essentiellement de la nature et de l'état physique des minerais. Elle paraît d'ailleurs indépendante de l'action réductrice de CO. Le rapport du poids d'oxygène réduit au poids de carbone déposé ne paraît, en effet, dépendre d'aucune loi. Mais la

vitesse du courant gazeux a une influence que les expériences de sir L. Bell ont nettement mise en lumière. Elle rend les réactions plus actives et augmente le rapport du poids du carbone déposé au poids d'oxygène réduit : c'est ainsi qu'à 410° C, avec des courants de CO variant de vitesse dans le rapport de 1 à 4, passant sur des échantillons analogues, on obtenait dans un même laps de temps des dépôts de carbone dix fois plus forts, une élimination d'oxygène presque quadruple ; et le gaz, après son passage sur le minerai, avait une teneur en CO² notablement plus forte, parfois double. Le mécanisme de cette réaction est mal connu. Elle est sans doute due à la formation, puis à la décomposition en fer, oxyde de carbone et acide carbonique, de fer-carbonyles Fe(CO)⁵ ou Fe(CO)⁷.

On a vu que CO² réagit sur le fer réduit et les sous-oxydes pour régénérer CO. Il exerce la même action sur le coke et sur le carbone réduit.

Cette régénération de l'oxyde de carbone correspond à la formule :



De même que les réactions dont il vient d'être question, celle-ci dépend de la nature physique et chimique du solide sur lequel le gaz doit agir.

L'intensité de cette réaction dépend de la nature du coke, et la température où elle commence à être active varie suivant les qualités de 427 à 600° C. A ce point de vue, les cokes les plus résistants sont ceux qui présentent la plus grande dureté, la plus grande résistance à l'écrasement et l'éclat métallique le plus brillant ; tandis que les cokes tendres et ternes d'éclat sont attaqués à plus basse température. Le même phénomène a été constaté avec le charbon de bois. A 800°C cette réaction est active avec tous les combustibles. Mais l'action de l'acide carbonique est beaucoup moins forte lorsque ces combustibles ont été préalablement exposés pendant un temps suffisamment long à une température modérée. Ce phénomène est particulièrement sensible pour le charbon de bois, que l'acide carbonique attaque plus énergiquement que le coke.

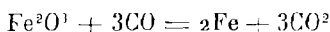
Considérons donc une charge de minerai au moment où elle est versée dans le haut-fourneau et voyons quelles transformations elle subit.

Au gueulard il faut, pour que les gaz donnent au point de vue chimique leur maximum d'effet utile, que la température soit inférieure à 200° C. De même, la réduction n'a pas lieu si, dans le courant gazeux, le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ (en poids) est su-

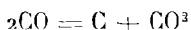
périeur à 2 ; mais ceci ne se rencontre jamais dans la pratique.

A mesure que la charge descend, elle s'échauffe graduellement. La réduction, commencée entre 200 et 250° C, devient plus rapide à mesure que la température s'élève et que la teneur en CO² diminue. Dans les expériences entreprises par Tunner, à Eisenerz, le fer métallique n'apparaissait que lorsque le rapport caractéristique était descendu au-dessous de 0,70.

Presqu'en même temps que la réduction, commence le dépôt de carbone. C'est cette réaction qui paraît dominer au début de la descente de la charge. Or, on sait que la réaction :



s'effectue sans dégagement ni absorption notables de chaleur. Au contraire, la réaction :



dégage 3134 calories par kilogramme de carbone déposé. Le gueulard est donc une zone de *dégagement de chaleur*. Mais cette chaleur est entièrement absorbée, dans la plupart des cas, par l'élévation de température de la charge, par la vaporisation de l'humidité qu'elle renferme, et parfois par la décomposition des carbonates.

A mesure que les charges descendent, leur température s'élève. Le carbone déposé disparaît peu à peu, brûlé par l'acide carbonique. La réduction avance, d'abord sous l'influence de l'oxyde de carbone, puis sous celle du carbone solide, coke ou carbone d'imprégnation. Bientôt la charge arrive dans une zone où la haute température et la présence du coke incandescent ne permettent pas à l'acide carbonique de subsister en proportion notable. Et la réduction s'achève sous l'influence du carbone solide, avec production de CO.

L'influence du dédoublement de CO au gueulard est donc grande au point de vue de la rapidité de la réduction : car l'action du carbone sur le minerai dépend de l'état physique du réducteur et de la manière dont il est mélangé au minerai. La réaction paraît commencer dès 400° avec du carbone réduit, tandis qu'au contact du coke en morceaux certains minerais résistent jusqu'au-delà de 600° C.

En même temps se passe, dans la région supérieure du haut-fourneau, une autre réaction importante : la décomposition de la castine. Le carbonate de chaux ne se décompose d'une façon complète qu'à haute température, et vers 500° C sa tension de dissociation est extrême-

ment faible. Mais dans le haut-fourneau, où l'oxyde de carbone domine, sa décomposition s'effectue plus rapidement que dans une atmosphère de CO^2 ; et c'est à ce phénomène qu'il faut en partie attribuer la haute teneur en CO^2 des gaz de certains hauts-fourneaux, ceux de Meurthe-et-Moselle notamment. Néanmoins, la décomposition de la castine ne s'achève probablement que dans la zone où s'achève aussi la réduction du minerai, c'est-à-dire au rouge vif, et une grande partie de l'acide carbonique dégagé est aussitôt décomposé par le carbone pour se transformer en CO .

Cette dernière réaction absorbe 3 050 calories par kilogramme de carbone consommé. Lorsqu'elle s'effectue aux dépens d'acide carbonique produit par la réduction du minerai, le résultat est le même que si le minerai avait été réduit directement par le carbone solide, avec production de CO .

Il importe donc, au point de vue de la consommation de combustible, de réduire au minimum dans le fourneau l'importance de la réduction directe par le carbone et de l'action du combustible sur CO^2 . Pour cela, il faudra que, dans le voisinage du gueulard, la zone des températures modérées soit aussi étendue que pos-

sible ; d'autre part, la rapidité du courant gazeux peut, dans une certaine mesure, réduire les pertes de carbone causées par l'action de C sur CO^2 .

On sait que la quantité de chaleur nécessaire à la décomposition d'un poids donné de Fe^2O^3 est sensiblement égale à celle que dégage la combustion du poids de CO nécessaire à cette réduction : elle est, au contraire, très supérieure aux quantités de chaleur dégagées par les poids de carbone solide nécessaires pour effectuer cette réduction avec production de CO^2 ou de CO. La première de ces réactions, qui est la plus économique, correspond à l'allure *idéale* du haut-fourneau, dont il convient de se rapprocher le plus possible. Elle est caractérisée par la teneur maxima en CO^2 des gaz du gueulard. Tout abaissement de teneur en CO^2 correspond à une quantité de carbone brûlée à l'état de CO, avec une diminution d'effet utile de 5 600 calories par kilogramme : d'où la nécessité, pour obtenir la même quantité de chaleur totale, de consommer un poids supplémentaire de combustible.

L'allure idéale est pratiquement irréalisable. Mais le dédoublement de l'oxyde de carbone en rapproche l'allure ordinaire du fourneau, ainsi que l'a démontré M. Grüner. Car le carbone

pulvérulent, produit par la réaction : $2\text{CO} = \text{CO}^2 + \text{C}$, descend avec la charge et il est en partie utilisé à réduire le minerai avec lequel il est intimement mélangé. Le gaz ainsi produit est de nouveau dédoublé en $\left(\frac{1}{2} \text{C} + \frac{1}{2} \text{CO}^2\right)$; et ainsi de suite; de sorte qu'en fin de compte tout se passe comme si le gaz primitif 2CO avait été transformé en 2CO^2 par l'oxygène du minerai. Il y a pourtant une différence : c'est que la chaleur due au dédoublement de CO est dégagée trop près du gueulard pour être aussi bien utilisée que si elle se dégageait dans les zones inférieures comme dans l'allure idéale.

L'analyse qui vient d'être faite des réactions de la zone supérieure du haut-fourneau est forcément incomplète et peu précise. Les réactions, dans un système de corps aussi complexe : oxydes de fer, fer, carbone, CO , CO^2 , CaCO^3 , ont des vitesses relatives variables, suivant la rapidité de circulation des gaz, leur composition, leur température, et la rapidité de descente des charges. Il est donc impossible de déterminer exactement les transformations qui s'effectuent aux diverses zones. A défaut d'expériences nombreuses, conduites sur le modèle de celles de

sir L. Bell ou de Tunner, on doit se borner à des indications un peu vagues. Mais ce qui est nettement établi, c'est qu'à toutes températures il existe un équilibre du système Fe, CO, CO² et que même au rouge vif — température où les charges sont exposées pendant près du tiers de leur séjour dans le fourneau — un courant de CO sur du fer réduit produirait un faible dépôt de carbone et une légère oxydation. Et plus la température est élevée, plus la proportion de l'oxygène retenu par le fer est considérable par rapport au carbone déposé. D'ailleurs, les analyses ont partout révélé la présence de CO² dans l'atmosphère du haut-fourneau, sauf à la limite de la zone de fusion, à peu de distance au-dessus des tuyères. Dans un cas particulier, pour un fourneau de 24 mètres de hauteur, la teneur en CO² était à la température de 1000° (vers la moitié de la hauteur) le quart, et à 4 mètres plus bas, au rouge très vif, le douzième de la teneur au gueulard. La réduction ne sera donc pas complète avant la zone de fusion ; le carbone qui imprègne le minerai ne brûlera pas complètement. Bien plus, en présence du coke incandescent, le fer réduit se cimentera partiellement. Au rouge très vif (1 000 à 1 050° C), lorsque la castine est entièrement décomposée, le minerai est, en général,

complètement détruit, ayant éclaté sous l'action du carbone qui s'y est déposé. Le fer réduit se présente sous la forme d'une masse spongieuse, fortement carburée, tenant encore une proportion de 4 à 6 % de sa teneur primitive en oxygène, qui ne se dégage que dans la zone de fusion. Cette réaction finale explique certaines anomalies apparentes des analyses de gaz recueillis dans la région des tuyères : Dans une série d'expériences, où les analyses de gaz pris à diverses hauteurs étaient rapportées à un poids fixe d'azote, correspondant à un poids de fonte aisé à calculer, sir L. Bell a, en effet, trouvé dans les gaz de la zone de combustion des poids de carbone et d'oxygène notablement supérieurs à ceux qui correspondaient au combustible brûlé et au vent soufflé pour cette production de fonte : l'excès provenait sans doute de cette décomposition tardive.

C'est d'un équilibre qui s'établit entre des réactions opposées que dépend, dans les diverses zones du haut-fourneau, la composition du gaz, en particulier la teneur en CO et en CO² au guculard, qui caractérise l'effet utile du combustible. A ce point de vue, il existe une différence considérable entre le charbon de bois et le coke. Aux températures élevées de l'ouvrage des hauts-fourneaux modernes au coke, l'acide carbonique

ne peut subsister qu'en proportion très faible en présence du combustible incandescent ; au gueulard le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ (en poids) ne dépasse guère un maximum de 0,70 à 0,80, sauf dans des circonstances particulières, caractérisées, par exemple, par une forte consommation de castine. Au contraire, le charbon de bois a, par une exposition prolongée aux températures modérées du gueulard, perdu une partie de sa tendance à être attaqué par l'acide carbonique. Il en résulte qu'au voisinage même des tuyères — où d'ailleurs la température dépasse rarement 1450° C — l'acide carbonique peut exister, en proportion notable, dans le courant gazeux. Les analyses de Tunner ont révélé pour le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ (en volumes) des valeurs de 42 % à 1^m,50 des tuyères, dans un fourneau styrien de 12^m,15 de hauteur. Cette forte proportion persiste dans les zones supérieures et le rapport en poids des deux gaz est en moyenne de 0,85 au gueulard contre 0,70 dans le cas du combustible minéral.

Il en résulte que le charbon de bois a, au haut-fourneau, au point de vue calorifique, un effet utile supérieur à celui du coke. Il s'en dégage aussi une autre conclusion :

Dans les fourneaux au coke, la zone supé-

rière est la seule où l'acide carbonique puisse se dégager et subsister en proportion notable. C'est dans cette région que s'effectuera par conséquent la plus grande partie de la réduction. C'est ce que diverses expériences ont nettement mis en lumière. S'il est vrai que l'oxygène du minerai n'est totalement expulsé que dans la zone des températures les plus hautes, il ne s'agit là que d'une proportion minime : le reste a disparu rapidement : la zone active, au point de vue de la réduction, n'occupe guère plus du tiers, rarement la moitié de la hauteur de l'appareil.

Dans les fourneaux au bois, au contraire, il subsiste, dans les zones chaudes, une proportion d'acide carbonique qui ne peut augmenter notablement au voisinage du gueulard ; la réduction ne commencera donc d'une manière active que dans la partie inférieure de l'appareil : c'est ce que les expériences de Tunner ont vérifié.

Il importe que la réduction soit aussi avancée que possible au moment où la gangue du minerai et la castine commencent à réagir pour former le laitier. Car le silicate de fer, une fois formé, ne se réduit que fort difficilement, aux plus hautes températures et aux

dépens du carbone solide. Par conséquent, pour éviter les pertes de fer ou les dépenses exagérées de combustible, il faudra faire en sorte que les laitiers, lors de leur formation, ne se trouvent pas en contact avec des masses non réduites de minerai, qu'ils dissoudraient pour constituer des laitiers ferrugineux très fusibles.

La température de formation des laitiers est généralement supérieure à la température de fusion des mêmes laitiers, une fois formés : elle dépend, non-seulement de la composition chimique des charges, mais encore de leur constitution physique. D'ailleurs, la composition des laitiers à l'intérieur du fourneau diffère notablement de leur teneur à la coulée. La fusion commence à se produire dès que la silice et l'alumine se trouvent en contact avec une proportion de chaux suffisante pour former un composé fusible. Dans les régions inférieures, à mesure que la température s'élève, le silicate dissout progressivement le résidu calcaire qui descend avec la charge des zones supérieures, et sa composition se modifie jusqu'au moment où toutes les terres renfermées dans la charge sont entrées en combinaison. Ainsi, la présence dans la charge de silicates déjà formés ou de silice finement disséminée dans sa masse, favorisera la fusion

prématurée des laitiers et exposera par conséquent à des pertes de fer sous forme de silicate, qui rend les laitiers noirs. Au contraire, si la gangue ne contient pas de calcaire et si l'on doit ajouter sous forme de castine toute la chaux nécessaire à la fusion, on conçoit que la combinaison ne s'effectue que tardivement entre des éléments où les contacts sont peu intimes, et que par conséquent la formation du laitier s'effectue à une température très supérieure à celle où aurait lieu la fusion, si les éléments se trouvaient intimement mélangés. C'est ainsi que certains minerais, dits réfractaires, se prêtent plus facilement à une réduction complète du fer et à une élaboration tardive des laitiers qui coulent blancs, avec des teneurs en fer insignifiantes. En tous cas, la formation du laitier ne paraît pas pouvoir commencer avant le rouge cerise, température à laquelle les silicates métalliques commencent à se ramollir.

Les laitiers ne sont d'ailleurs pas des combinaisons définies, car ils n'ont pas de points de fusion déterminés. Ce sont des mélanges de silicates et de sulfures de chaux, d'alumine, de magnésie, de manganèse, de fer, etc., dont la composition se modifie, suivant la température du fourneau et la nature des corps en présence.

Tandis que les laitiers s'élaborent, le carbone absorbé par le fer réduit a notablement diminué son point de fusion. La fonte se forme dès 1 100 ou 1 200° C. et fond en gouttelettes fortement carburées qui s'écoulent au milieu de substances pâteuses : laitier en voie de formation, résidu de chaux inattaqué, fraïsil, coke incandescent ; de sorte que le métal s'écoule lentement. C'est à la faveur de la haute température de cette partie du fourneau, qui varie du rouge très vif au blanc incandescent, que s'accomplissent les dernières réactions dont le résultat est d'incorporer dans la fonte diverses impuretés et de la débarrasser finalement des dernières traces d'oxygène et d'une partie du soufre qu'elle retenait.

Le manganèse existe dans les minerais à l'état oxydé. L'effet de la chaleur, au niveau du gueulard, est de ramener les divers oxydes de manganèse à l'état de Mn^3O^4 (oxyde rouge). Plus bas, sous l'action de l'oxyde de carbone, cet oxyde est réduit à l'état de protoxyde MnO . Mais le départ du dernier atome d'oxygène ne s'effectue qu'à très haute température par l'effet du carbone solide ou des cyanures. La fabrication des fontes manganésées exigera donc une forte dépense de combustible. D'autre part, le

protoxyde de manganèse, très basique, passe aisément dans le laitier. Et cette réaction est fort nuisible, car elle produit un silicate irréductible. Mais la présence d'un autre métal, et tout particulièrement du fer carburé, facilite la réduction de l'oxyde de manganèse. D'autre part, des dosages convenables diminuent sa scorification. C'est ainsi qu'on est parvenu, depuis 1875, à fabriquer au haut-fourneau des ferromanganèses à 82 % avec une utilisation supérieure à 70 %, en réduisant au minimum la proportion de laitier produite, en constituant un dosage basique tout en rendant le laitier fluide par l'adjonction de bases alcalino-terreuses multiples, en forçant le combustible, en ralentissant la marche du fourneau, et en empêchant par un garnissage neutre à l'ouvrage et dans le creuset les réactions secondaires qui résulteraient de l'attaque du garnissage silico-alumineux.

Le manganèse a pour le carbone une affinité énergétique. Il agit donc sur la fonte comme carburant. De fait, tandis que les fontes les plus graphitiques tiennent 4 % de carbone total, les spiegels tiennent en moyenne 5 % et les ferromanganèses 6 %.

L'incorporation du silicium dans la fonte résulte de l'attaque de la silice par les carbures

de fer ou de manganèse. Cette réaction a lieu dans la zone où la fonte est déjà liquide et le laitier encore en voie de formation. Les dosages fusibles sont donc prohibés dans la fabrication des fontes siliceuses, de même que les dosages extra-basiques : au contraire on recherche, soit des dosages réfractaires par excès de silice, ce qui n'est possible que dans les fourneaux au bois, soit, dans les fourneaux au coke, des dosages réfractaires, sans excès de bases. A ce point de vue, la présence de l'alumine est très favorable. Les minerais où la silice existe à l'état finement disséminé sont particulièrement recherchés pour cette fabrication. Quant aux scories de forges, on peut avantageusement les repasser au haut-fourneau, sans risquer d'augmenter la teneur de la fonte en silicium. Car elles fondent rapidement et passent dans le laitier, à moins que, sous l'influence d'une haute température, la chaux ne se substitue à l'oxyde de fer : le fer se réduit alors, et les laitiers coulent blancs. Mais il faut que l'allure soit très chaude. Le moindre refroidissement fait tourner les laitiers au noir.

Avec une allure chaude, et un dosage réfractaire, on parvient aisément à faire passer dans la fonte 1 à 2 $\frac{0}{100}$ de silicium. La fabrication des

alliages riches est plus délicate et exige une allure très chaude et des minerais spéciaux ou des dosages alumineux. La présence du manganèse qui tend à s'emparer de la silice libre, et augmente par cela même la fusibilité des laitiers, est une réelle difficulté pour cette fabrication. Mais on est parvenu à la surmonter et à produire au haut-fourneau, dans des creusets en graphite, des silico-spiegels à 10 % de Si, 2,5 % de C et 20 % de Mn, grâce à l'emploi de minerais spéciaux et à de fortes consommations de combustible.

Le soufre est un élément nuisible dont la présence, fréquente dans les minerais et la cistine, est toujours abondante dans les cendres du coke ; mais il est facile d'empêcher l'incorporation de ce métalloïde dans la fonte au haut-fourneau : il suffit pour cela de rendre les dosages basiques. Dans une atmosphère réductrice et en allure chaude, on peut faire passer dans le laitier plus de 90 % du soufre de la charge, à l'état de sulfures terreux et parfois à l'état de sulfure de potassium, qui brûle à l'air, avec un dépôt de SO^2K^2 . La chaux est d'un emploi précieux comme désulfurant. A ce point de vue également le manganèse rend des services considérables. Ce n'est d'ailleurs qu'à l'état de

sulfure que le soufre est nuisible dans un minéral. A l'état de sulfate, il ne paraît pas présenter d'inconvénient ; les sulfates terreux se décomposent aux hautes températures, en présence du carbone ; une partie du soufre s'échappe à l'état de SO^2 ; le reste, si l'allure est assez chaude, passe entièrement dans le laitier à l'état de sulfure de calcium ou de manganèse. Le sulfure de barium se rencontre rarement dans les laitiers, même avec des dosages riches en SO^2Ba : c'est à l'état de silicate qu'on y retrouve le barium. Si l'allure est trop froide ou le dosage trop acide, le soufre passe en partie dans la fonte et il se forme alors, si la teneur en Si est trop forte, du sulfure silicique, corps volatil, facilement entraînable, qui brûle à l'air au moment de la coulée, avec un dépôt de silice pulvérulente qui se trouve souvent mélangé avec un silicate basique.

A l'encontre du soufre, le phosphore, dont la présence dans le métal n'est pas moins nuisible, se concentre presque complètement dans la fonte. Ce corps existe dans les minerais à l'état de phosphates de fer, de chaux, de manganèse et d'alumine. Comme la silice, l'acide phosphorique est réduit par le carbure de fer, et cela d'autant plus aisément que la température est

plus élevée ; car le phosphore, plus oxydable que le fer au-dessous de la température de fusion de l'acier, devient moins oxydable, partant plus réductible, au-dessus de cette température. Au haut-fourneau, l'allure froide, la présence d'une forte proportion de FeO dans le laitier, favorisent l'élimination du phosphore qui pourtant ne dépasse guère 15 $\%$. Au contraire, avec une allure chaude, et particulièrement avec des dosages siliceux, on peut compter que tout le phosphore du lit de fusion se retrouvera dans la fonte.

L'arsenic existe parfois dans les minerais, à l'état de pyrite arsenicale. Le grillage la décompose, et les fumées entraînent l'arsenic à l'état de As_2O_3 volatil. Ce corps est décomposé au gueulard sous l'influence de la vapeur d'eau, avec production d'oxyde et d' AsH_3 . Ce qui n'est pas entraîné par les fumées du haut-fourneau s'allie au fer, et forme un composé irréductible.

Le plomb et le zinc ne s'allient pas à la fonte. Mais leur présence occasionne des troubles dans la fabrication. Dans le creuset, ces métaux s'infiltrèrent à travers les joints des briques et peuvent causer des désordres graves. Au gueulard, le zinc réduit se volatilise et décompose la vapeur d'eau. Il en résulte, dans la partie supérieure du fourneau, et dans les conduites suffisamment

chaudes, des dépôts adhérents nommés *cadmies*, tenant jusqu'à 95 % de ZnO, dont l'accumulation occasionne des inconvénients sérieux.

Lorsque le cuivre se rencontre dans les minerais il se réduit et passe dans la fonte, surtout lorsqu'il s'y trouve du manganèse, qui forme avec le cuivre des alliages définis. La présence du cuivre dans la fonte, à des teneurs avoisinant 1 %, rend le puddlage impossible.

Le chrome et le tungstène passent aisément dans la fonte. On obtient au haut-fourneau des produits tenant jusqu'à 24 % de tungstène, ou 35 % de chrome. Les alliages plus riches, actuellement employés dans la métallurgie de l'acier, (ferro-tungstène à 67 %, ferro-chrome à 65 %), se fabriquent au cubilot ou au creuset.

Le nickel se réduit avec une grande facilité et s'allie au fer. C'est ainsi qu'on produisait au haut-fourneau vers 1877, à la Nouvelle-Calédonie, des fontes tenant 65 à 68 % de Ni et 28 à 29, 5 % de Fe, mais retenant toujours, à cause de la grande affinité du nickel pour le soufre, 1,5 à 2,5 % de ce métalloïde.

Au contraire, le titane et l'aluminium sont rares dans les fontes. Le titane, fréquent dans les minerais de fer, passe presque totalement dans le laitier. Il faut traiter spécialement des

minerais riches en ilménite, pour obtenir des teneurs voisines de 1 % de titane. Quant à l'aluminium, il s'est rencontré avec des teneurs voisines de 0,5 à 0,6 %, rarement seul, parfois accompagné de calcium et de magnésium, ce qui avait fait supposer que ces trois corps se trouvaient retenus mécaniquement, à l'état de laitier. Mais la découverte d'aluminium sans trace de magnésium ni de calcium dans certaines fontes, a montré que ces trois métaux peuvent, dans certaines circonstances, s'allier au fer.

Ces diverses réactions ne s'achèvent que dans la partie inférieure du haut-fourneau qui est la zone de combustion.

Dans cette zone même on peut distinguer plusieurs régions :

En avant du bec de chaque tuyère est une première zone, où l'oxygène du vent soufflé se combine au carbone : c'est là que règne la température la plus élevée du haut-fourneau, qui ne dépasse guère 1700 ou 1800° C, par suite de la dissociation de CO^2 . La température se maintient d'ailleurs sensiblement constante tant qu'il reste de l'oxygène dans les gaz : ainsi se forme, en avant de chaque tuyère, une zone de dimensions restreintes, où l'atmosphère est oxydante

et la température intense. Pour que la marche soit régulière, il faut que les diverses zones s'étendent jusqu'au centre du fourneau et s'y rejoignent. Elles sont d'ailleurs limitées en hauteur : à 50 ou 60 centimètres au-dessus des tuyères on constate un abaissement brusque de température, correspondant au passage à une seconde zone que M. de Vathaire désigne sous le nom de *zone intermédiaire*.

En ce point, le courant gazeux se compose de CO et de CO². Au contact du coke incandescent, CO² achève de se transformer en CO et cette réaction se poursuit sur une hauteur d'environ 2 mètres, jusqu'au moment où le courant se trouve exclusivement composé de ce dernier gaz. C'est dans cette zone intermédiaire que s'achève l'élaboration des laitiers ; c'est là qu'en filtrant au milieu d'une masse pâteuse, encore peu fluide, la fonte achève de se charger de Si, de C et de Mn. Dans la zone inférieure, les laitiers, comme la fonte, sont en pleine fusion. Le coke seul reste solide, incandescent. Les matières en fusion tombent en gouttelettes devant les tuyères pour se rendre dans le creuset, où elles se séparent par densités. Malgré la rapidité de ce passage, la fonte y subit un commencement de mazéage et y perd une partie du

silicium qu'elle avait absorbé. Le caractère oxydant de cette région a été nettement mis en évidence par M. de Valhaire, qui en a augmenté l'effet en introduisant, dans le vent soufflé, de la vapeur d'eau : la teneur en Si s'abaissait alors brusquement de 2,5 à 1,8 %.

Le laitier lui-même ne reste pas invariable de composition dans cette zone. En filtrant sur des morceaux de chaux et de coke, il se transforme parfois d'une manière assez sensible. Il arrive fréquemment que du laitier, formé prématurément dans la cuve, coule blanc : le fer ayant été réduit par le carbone incandescent. Le laitier peut aussi perdre du silicium et du manganèse. Mais de ces trois corps, le fer est le plus réductible. Donc, tant que le laitier sera ferrugineux, la fonte ne tiendra en fortes proportions ni silicium ni manganèse. Les réactions se poursuivent d'ailleurs dans le creuset, et il n'est pas rare que l'action du carbure de fer sur le garnissage réfractaire n'augmente légèrement la teneur de la fonte en silicium.

M. Cailletet, en analysant les gaz pris dans une région voisine des tuyères, y a trouvé avec des traces d'oxygène du carbone libre, sous forme d'un brouillard très ténu.

La température de la zone inférieure est

celle qui correspond à la fusion des laitiers. Suivant la quantité de laitiers à fondre, leur température et leur *chaleur de fusion*, la *chaleur produite* par la combustion d'une quantité donnée de combustible se répartit sur une zone restreinte, et les hautes températures se localisent au voisinage des tuyères, ou bien elles montent dans le fourneau, produisant une fusion prématurée des laitiers et occasionnant une distribution défectueuse des températures dans le haut-fourneau. C'est là un point délicat dans le réglage de l'allure des hauts fourneaux, qui se trouve liée intimement aux dimensions du creuset, à la composition des laitiers, au volume de vent soufflé et à sa température.

La température du vent exerce, en effet, sur la marche une *influence considérable*. Grâce à la chaleur du vent, on peut diminuer la dépense de combustible tout en maintenant constante la température aux tuyères et la quantité totale de chaleur fournie à l'appareil. Il en résulte une localisation des hautes températures et une production moindre de gaz; par conséquent, un abaissement de la température au gueulard favorable à une réduction par CO aussi complète que possible : le rapport $\frac{\text{CO}^2}{\text{CO}}$ ira donc en aug-

mentant ; on se rapprochera de l'allure idéale ; et, au point de vue pratique, l'emploi du vent surchauffé aura pour conséquence une économie de combustible. Mais cette économie ne peut se poursuivre indéfiniment : à mesure que la proportion de CO^2 augmente, la réaction de ce gaz sur le carbone tend à augmenter aussi ; et par conséquent la proportion de carbone brûlée dans la cuve s'élèvera : de sorte que l'économie réalisée dans la région des tuyères se trouvera de ce fait neutralisée. Il est donc inutile de surchauffer au-delà d'une certaine limite la température du vent ; et cette limite est d'autant plus basse que le fourneau est plus petit, que le combustible brûle plus facilement, qu'on veut produire des fontes moins riches en Si ou Mn et que le minerai est plus réductible. Dans les fourneaux au bois de Styrie notamment, traitant des carbonates grillés et marchant en fonte grise avec du vent à 450°C , le surchauffage du vent n'a pas donné les résultats qu'on espérait. Au contraire, dans les grands fourneaux américains traitant au bois les minerais du lac Supérieur, on a pu avec avantage employer les appareils en briques, et chauffer le vent au-delà de 700°C .

Il n'a été question jusqu'à présent que des produits solides ou liquides des réactions du

haut-fourneau. Les produits gazeux y jouent également un rôle assez important.

Les fumées du haut-fourneau entraînent avec elles de la vapeur d'eau dont la vaporisation, vers le gueulard, consomme une forte proportion de chaleur. D'autre part, la vapeur d'eau réagit sur l'oxyde de carbone, pour donner de l'acide carbonique et de l'hydrogène. Souvent les fumées renferment des vapeurs de zinc et de plomb dont la réaction sur la vapeur d'eau occasionne la formation de cadmies ; elles entraînent de la mine menue, du charbon, des cendres, et une poussière très abondante de chaux ou de manganèse : c'est là, dans le traitement des minerais manganésés, une cause de pertes considérables. Enfin, elles renferment des cyanures.

Ces derniers composés se forment dans les régions chaudes du haut-fourneau. Ils s'élèvent avec les gaz sous forme de vapeurs ou de brouillard, et se décomposent en réagissant sur les minerais, de sorte qu'au gueulard ils n'existent en général dans les gaz qu'en très faible teneur. Mais leur rôle comme réducteur est loin d'être négligeable : d'autant que leur action sur les oxydes de fer, au point de vue de la réduction du métal et du dépôt de carbone, est plus active en présence de CO^2 que celle de CO .

Telles sont les principales réactions du haut-fourneau. D'autres réactions, dont l'importance au point de vue industriel est moindre, peuvent, dans certaines circonstances, amener des perturbations dans la marche de l'appareil. Il vient d'être question des cyanures dont l'influence est loin d'être négligeable. Les alcalis, contenus dans les cendres du coke, donnent lieu à d'autres réactions. Ainsi la destruction des briques ferrugineuses au gueulard, causée par la réaction de CO sur l'oxyde de fer et le dépôt de C qui fait éclater la substance solide, est activée par la présence dans les gaz d'alcalis, qui imprègnent les briques de potasse et de chlorure de potassium, et laissent sur la paroi du fourneau un dépôt de silico-aluminates de potassium et de sodium. Parfois ces dépôts se détachent et se décomposent en tombant dans la zone inférieure : c'est ainsi qu'on a observé, dans certains fourneaux, des coulées continues de carbonate de potasse.

Le métal qui résulte de réactions aussi complexes est loin d'être un produit simple. La fonte est, suivant l'expression de M. Osmond, une dissolution dans le fer fondu de corps solides, liquides ou gazeux — oxyde de carbone et hydrogène, entre autres, — chimiquement combinés ou dissous. L'étude de la composition de la

fonte et de ses propriétés, l'examen des divers composés qui se liquatent et se séparent au moment de sa solidification, trouvera sa place dans d'autres volumes de cette Encyclopédie. Mais l'étude des réactions du haut-fourneau serait incomplète s'il n'était pas fait mention ici de certains composés qui se séparent dans le creuset et durant la coulée ; le sulfure de manganèse, qui, par sa liquation, désulfure partiellement les fontes riches en soufre ; le silicure de manganèse qui, dans les fontes grises maintenues en fusion prolongée, se sépare et s'oxyde à la surface du bain, se transformant en silicate. Enfin, durant la coulée des fontes moyennement riches en silicium et en carbone, et spécialement des fontes n° 3 chaudes peu carburées, il se produit, à la surface du métal en fusion, une croûte dont le fendillement plus ou moins rapide occasionne des mouvements, dits vermiculaires, dont l'aspect renseigne les fondeurs sur l'allure de l'appareil. Lorsque l'allure devient mauvaise, ce phénomène s'exagère parfois, et il se forme à la surface des gueusets durant le refroidissement, des écailles à teneur élevée en carbone, en soufre, en silicium et surtout en manganèse.

CHAPITRE II

—

ETUDE DU HAUT-FOURNEAU. BILAN CALORIFIQUE.

Pour étudier la marche d'un haut-fourneau il est nécessaire de se rendre un compte exact des quantités de chaleur apportées par le vent ou produites par la combustion du carbone dans les diverses zones du haut-fourneau et, d'autre part, des quantités de chaleur consommées à l'intérieur de l'appareil et de celles qui se perdent inutilisées, par conduction ou convection. Cette étude conduit à dresser le bilan calorifique du haut-fourneau, suivant une méthode que nous allons brièvement exposer, d'après M. Grüner.

I. Quantités de chaleur produites par la combustion. — Soient α , le poids de carbone contenu dans la quantité de coke consommée

pour produire une tonne de fonte et b , le poids de carbone contenu dans la quantité correspondante de castine. Soient m , le rapport des poids d'acide carbonique et d'oxyde de carbone existant dans les gaz du gueulard et y , le poids de CO correspondant dans ces gaz à la production d'une tonne de fonte. La chaleur totale produite dans le fourneau provient de la transformation du carbone en un certain mélange de gaz CO et CO². Or, si l'on désigne par c la quantité de carbone absorbée par tonne de fonte, la quantité totale de carbone qui se retrouve dans les gaz du gueulard pour une tonne de fonte produite est égale à :

$$p - a + b - c.$$

D'autre part, on aura évidemment :

$$\frac{3}{7} y + \frac{3}{11} my = p;$$

d'où on tire la valeur y du poids de CO :

$$y = \frac{77p}{33 + 21m}.$$

Le poids de CO² est alors égal à my .

Il reste à calculer la chaleur de formation de ces deux gaz. Mais il faut tenir compte du poids b de carbone qui existait dans l'acide carbonique

de la castine, et n'a par conséquent pas brûlé dans le fourneau. La quantité de chaleur dégagée par la combustion est donc donnée par la formule :

$$(1) \quad Q = \frac{3}{7} y \times 2473 + \left(\frac{3}{11} my - b \right) \times 8080.$$

Cherchons maintenant à établir la répartition de cette production de chaleur entre l'ouvrage et la cuve :

Soit f , le poids de fer contenu dans une tonne de fonte. Il était combiné dans le minerai à un poids d'oxygène égal à $\frac{3}{7} f$. Si le minerai avait été entièrement réduit par CO, l'acide carbonique produit contiendrait un poids de carbone égal à $\frac{3}{4} \times \frac{3}{7} f = \frac{9}{28} f$; et on trouverait au gueulard une quantité d'acide carbonique correspondant à $\left(\frac{9}{28} f + b \right)$ de carbone. La différence :

$$\frac{9}{28} f + b - \frac{3}{11} my$$

doit donc correspondre à une quantité d'acide carbonique décomposée par le carbone dans la cuve. Or, le poids de carbone contenu dans

l'acide carbonique décomposé est égal au poids de carbone nécessaire pour effectuer cette décomposition ; l'expression considérée représente donc le poids de carbone brûlé dans la cuve. Le raisonnement précédent suppose que tout le minerai est réduit par CO, et que le carbone réagit après coup sur les produits gazeux de cette réduction. On arriverait au même résultat en admettant qu'une partie de ce carbone brûle en réduisant directement le minerai, avec production de CO. La combustion de 1 kilogramme de carbone, dans ces conditions, dégage 2473 calories.

La quantité d'acide carbonique produite par la réduction du minerai correspond à un poids de carbone égal à $\left(\frac{3}{11} my - b\right)$. La chaleur dégagée par cette réaction s'élève à 5600 calories par kilogramme de carbone.

Enfin la quantité de carbone brûlée aux tuyères à l'état d'oxyde de carbone est égale à :

$$a - c - \left(\frac{9}{28} f + b - \frac{3}{11} my\right).$$

Cette réaction dégage 2473 calories par kilogramme de carbone.

La quantité de chaleur totale produite dans

le fourneau se compose donc de la somme de trois quantités de chaleur dégagées : l'une aux tuyères et l'autre dans la région chaude de la cuve avec production de CO, la dernière enfin dans la zone supérieure avec production de CO². Elle a pour expression :

$$(2) \quad Q = \left[a - c - \left(\frac{9}{28} f + b - \frac{3}{11} my \right) \right] \times 2473 + \\ + \left(\frac{9}{28} f + b - \frac{3}{11} my \right) \times 2473 + \\ + \left(\frac{3}{11} my - b \right) \times 5600.$$

Il est aisé de se rendre compte que les formules (1) et (2) sont identiques.

II. Quantités de chaleur fournies par le vent.—Il s'agit tout d'abord de calculer le poids du vent soufflé, et celui des gaz du gueulard, qui correspondent à la production d'une tonne de fonte.

Soient x , l'oxygène apporté par le vent ; d , l'oxygène fourni par le minerai et l'acide carbonique de la castine. Exprimons que le poids d'oxygène contenu dans les gaz est la somme des poids d'oxygène fournis par le vent et le lit de fusion. Nous aurons l'équation :

$$\frac{4}{7} y + \frac{8}{11} my = d + x;$$

d'où on tire :

$$x = \frac{y}{77} (44 + 56m) - d.$$

On peut admettre que l'air, pris à 12 ou 13° C, tient en moyenne 8 grammes d'eau par mètre cube pesant 1 300 grammes. L'oxygène contenu dans cette eau a donc un poids égal à 0,0055 du poids de l'air sec.

Soit z , le poids de l'oxygène provenant de l'air sec. On aura :

$$z = 0,97677 x,$$

et on en déduira :

Poids de l'azote.	$3,33 \times z$
" l'air sec	$4,33 \times z$
" l'air humide.	$1,0062 \times 4,33 \times z$.

Soit donc T, la température du vent aux tuyères en degrés centigrades. La chaleur spécifique de l'air est 0,239. La quantité de chaleur apportée par le vent sera donc égale à :

$$Q' = T \times 1,0062 \times 4,33 \times z \times 0,239.$$

La somme (Q + Q') représentera la quantité totale de chaleur fournie à l'appareil.

III. Quantités de chaleur consommées dans le haut-fourneau. — 1° *Vaporisation de l'humidité de la charge.* — Soient t , la température des gaz du gueulard ; q , le poids d'eau à vaporiser. Le nombre de calories cherché sera donné par l'expression :

$$q [637 + 0,48 (t - 100)].$$

2° *Chaleur sensible des gaz du gueulard.* — Les chaleurs spécifiques sont :

pour l'azote	0,244
" CO.	0,246
" CO ²	0,216.

Le nombre cherché sera donc égal à :

$$t [3,33 z \times 0,244 + y \times 0,246 + my \times 0,216].$$

3° *Réduction du poids f de fer.* — La réduction de 1 kilogramme de fer de la combinaison Fe²O³ exige environ 2 000 calories.

4° *Décomposition de la castine.* — La décomposition de 1 kilogramme de CO²Ca en CO² et CaO exige 424 calories.

5° *Réduction des métalloïdes qui entrent dans la composition de la fonte.* — Le phosphore, le silicium, le manganèse et le soufre se trouvent respectivement dans le minerai à l'état d'acide

phosphorique, de silice, de bioxyde de manganèse et d'acide sulfurique. Dans ces conditions :

la réduction de 1 kilog. de Si	exige	7 828	calories
"	"	Ph	" 5 868 "
"	"	Mn	" 2 192 "
"	"	S	" 3 238 "

6° *Chaleur de fusion de la fonte et des laitiers.* — On peut admettre, pour la chaleur totale de la fonte grise n° 3, le chiffre de 300 calories par kilogramme; pour la fonte noire, il faudrait compter 310 calories; pour la fonte blanche, 280.

Pour les laitiers, les mesures effectuées par divers auteurs ont donné des résultats assez différents, suivant leur composition très variable. Sir L. Bell a trouvé le chiffre de 550 calories pour la chaleur totale des laitiers très aluminés du Cleveland. M. de Vathaire admet, avec les minerais français, les chiffres suivants: 500 calories pour les laitiers de fonte n° 1; 475 calories pour ceux de fonte grise n° 3; et 357 calories pour ceux de fonte blanche d'allure froide.

7° *Dissociation de l'eau du vent.* — La dissociation de 1 kilogramme de vapeur d'eau absorbe 3233 calories.

IV. Quantités de chaleur résultant de la formation du laitier, et de l'incorporation de divers métalloïdes dans la fonte. —

La chaleur de formation des laitiers n'a jamais été mesurée avec exactitude. Pourtant on peut admettre que la quantité de chaleur dégagée par la chaux dans sa combinaison avec la silice est à peu près égale à la quantité de chaleur qu'elle dégage dans sa combinaison avec l'acide carbonique. On peut alors, avec une certaine approximation, tenir compte de cette quantité, et de la chaleur correspondant à l'absorption des métalloïdes dans la fonte, en évitant de compter en dépense la quantité de chaleur correspondant à la décomposition de la castine.

V. Chaleur perdue par les parois. — Les pertes par les parois, ou par l'eau des tuyères, ne peuvent se calculer que par différence. Des mesures calorimétriques, entreprises par divers auteurs, ont toujours donné des chiffres trop faibles.

C'est ainsi qu'en calculant, en regard les unes des autres, les quantités de chaleur apportées au fourneau, ou produites par la combustion, et celles qui sont consommées par les diverses réactions qui s'y accomplissent, on parvient à se

rendre compte de la marche de cet appareil, et, dans une certaine mesure, des transformations chimiques qui s'y opèrent. C'est ainsi qu'on a pu étudier la raison des avantages du vent chaud, de l'agrandissement progressif des hauts-fourneaux ; mais il est évidemment indispensable, pour que l'on puisse se fier aux résultats d'une pareille étude, que les observations portent sur une période suffisamment longue de marche absolument régulière, c'est-à-dire sur plusieurs jours. Durant cette période, il faudra peser soigneusement le minerai, le coke et la castine, dont on s'efforcera de ne pas faire varier la qualité, et sur lesquels on effectuera des prises d'essai destinées à l'analyse chimique. La fonte produite sera également pesée et analysée. On s'efforcera de maintenir régulière l'allure du fourneau durant cette période ; et à certains intervalles on effectuera, sur la conduite des gaz du gueulard, des prises d'essai au moyen d'un aspirateur à écoulement lent, de façon à obtenir ainsi la moyenne de la composition des gaz durant plusieurs heures. Enfin, il faudra effectuer des mesures de températures, au gueulard et aux tuyères.

La mesure des hautes températures est la partie la plus délicate d'une pareille étude : elle

exige l'emploi d'appareils de précision entre les mains d'un personnel exercé. Mais, comme on le verra plus loin, ces appareils, dont l'emploi se généralise aujourd'hui dans l'industrie, sont précieux, non seulement pour l'étude mais pour la conduite quotidienne des hauts-fourneaux : car ils permettent de contrôler la température du vent, dont la régularité est un des principaux facteurs de la bonne marche du fourneau. Déjà, dans une des principales forges de l'Angleterre, une batterie de 12 fourneaux est munie d'un réseau de conducteurs destinés à relier, avec un galvanomètre central, les couples servant à suivre la marche de chacun des appareils. De pareilles installations doivent servir de modèles. Les analyses de gaz, réduites au dosage de CO et CO², ne présentent pas de grandes difficultés : on peut aisément y dresser de jeunes ouvriers.

Suivant les minerais, suivant la qualité des cokes, la production d'une tonne de fonte correspond à des consommations de carbone très variables. La consommation de coke par tonne de fonte qui, dans les anciens fourneaux, s'élevait couramment à 1 500^{kg} et dépassait même ce chiffre, varie aujourd'hui de 850 à 1 100 ou 1 200^{kg} suivant le minerai et suivant la nature de la

fonte produite, sauf dans le cas de fontes très manganésées. La consommation de carbone par tonne de fonte ordinaire varie donc de 750 à 1 000 ou 1 050 kilogrammes. Le rendement calorifique du carbone ainsi brûlé varie lui-même dans des limites assez larges suivant la proportion d'acide carbonique produite : tandis que 1 kilogramme de carbone, par sa combustion complète en CO_2 , dégagerait 8 080 calories, la quantité de chaleur dégagée dans les hauts-fourneaux par kilogramme de carbone dépensé varie de 3 500 à 4 200 calories au maximum.

C'est là un rendement faible, qu'il y aurait grand intérêt à pouvoir augmenter. Au contraire, si on compare la quantité de chaleur utilisée par les diverses réactions à celle fournie au haut-fourneau, on constate qu'à ce point de vue le rendement industriel du haut-fourneau est extrêmement élevé. Les pertes par la chaleur sensible des gaz du gueulard, qui sont en rapport direct avec le poids de ces gaz, et leur composition, par conséquent avec l'allure de l'appareil et la nature des matières premières, représentent moins de 11 % de la chaleur totale fournie et ce chiffre peut s'abaisser à près de 6 % quand la teneur en fer des minerais

atteint 60 à 65 %. Quant aux perles par les parois et par l'eau des tuyères, elles varient suivant la rapidité de l'allure de 10 à 20 % de la chaleur totale fournie au haut-fourneau. Cet appareil utilise donc 70 à 80 % et même 85 % de la chaleur qu'il consomme ; aucun appareil métallurgique ne possède de rendement thermique aussi élevé.

Mais si l'on examine comment est utilisée cette quantité de chaleur, on est frappé de voir l'importance des réactions accessoires par rapport à la réaction principale, qui est la réduction du fer. M. Howe, étudiant le cas des minerais riches, a calculé que la réduction complète pourrait être pratiquement obtenue, au-dessous de 800° C, en consommant moitié moins de coke que les meilleurs hauts-fourneaux américains. On brûle donc la moitié du combustible en pure perte pour des opérations accessoires, telles que la fusion des laitiers et la réduction des métalloïdes, qu'on incorpore dans la fonte à grands frais pour les séparer ensuite dans la fabrication du fer et de l'acier, au prix de dépenses considérables de main-d'œuvre et de combustible. Ces considérations ont conduit plusieurs inventeurs à penser qu'il y aurait avantage à éviter, pour la fabrication du fer et de l'acier, l'intermédiaire du

haut-fourneau et à utiliser directement le minerai après sa réduction complète, achevée à température assez basse pour que le fer seul soit réduit. Tel est le principe des nombreux *procédés directs*, qu'on a expérimentés pour la plupart en pure perte. La séparation de la gangue dans le traitement subséquent occasionnait, en général, des pertes de fer considérables ; la réoxydation de l'éponge ferreuse dans les transports est aussi une cause de pertes difficile à éviter. Enfin, le haut-fourneau a sur les autres appareils qu'on a tenté de lui substituer plusieurs avantages indiscutables : sa forte production, qui réduit considérablement les frais de main-d'œuvre et les frais généraux, et son haut rendement calorifique. De sorte que l'économie qu'on cherchait à réaliser dans les procédés directs a toujours été compensée, et au-delà, par des pertes de métal, ou des frais plus considérables de combustible et de main-d'œuvre. D'accord avec la théorie, l'expérience a prouvé que dans nos pays et avec nos minerais, aucun procédé direct ne peut lutter avec la méthode indirecte ; et que le seul procédé rationnel de traitement consiste à passer le minerai au haut-fourneau, malgré les frais et les difficultés de la dénaturation de la fonte.

CHAPITRE III

PROFIL ET ALLURE DES HAUTS FOURNEAUX

La détermination du profil d'un haut-fourneau dépend de plusieurs éléments : en premier lieu, la nature du combustible et des minerais employés ; en second lieu, l'allure à laquelle on se propose de conduire la fabrication.

La nature du combustible a une influence capitale, car elle impose une limite à la hauteur des appareils. Les charbons de bois s'écrasent sous des charges qui varient de 8 à 15 mètres. Les coques résistent à 20, 25 et même plus de 30 mètres. Aussi les hauts-fourneaux au bois n'ont-ils guère plus de 12 à 13 mètres de hauteur en France, avec les charbons les plus durs, 15 mètres en Suède et en Russie, et en Amérique 18 à 20 mètres ; tandis que les hauts-four-

neaux au coke ont atteint 36 mètres en Angleterre, 27 mètres aux États-Unis, avec des coques exceptionnellement durs ; et ont couramment, dans ces deux pays, 24 mètres de hauteur. En France, ce chiffre peut être considéré comme un maximum : en Meurthe-et-Moselle les hauts-fourneaux ont des hauteurs comprises entre 18 et 22 mètres.

Les conditions que doit réaliser un haut-fourneau sont les suivantes : descente régulière des charges, bonne circulation des gaz, échange de chaleur aussi complet que possible entre le courant gazeux et la charge solide. D'autre part, la température de la cuve doit être assez basse dans la région supérieure pour que le dédoublement de l'oxyde de carbone y soit abondant et que la réduction s'effectue aussi complètement que possible sans l'intervention du combustible solide ; vers le bas du fourneau, les hautes températures doivent être localisées de manière à éviter la fusion prématurée des laitiers.

Ces conditions se trouvent facilement réalisées dans les hauts-fourneaux au bois ; la température aux tuyères n'a pas besoin d'être très élevée : réducteur et carburateur énergétique, le charbon de bois donne aisément des fontes riches en carbone. D'autre part, les cendres de ce combus-

tible ne renferment pas de soufre ; les laitiers peuvent donc être siliceux, relativement fusibles. Il n'est, par conséquent, besoin aux tuyères que d'une production de chaleur relativement modérée, qu'une faible hauteur suffit à absorber ; aussi les hauteurs de 12 à 15 mètres conviennent-elles à d'excellentes marches de hauts-fourneaux au bois.

Le coke, au contraire, exige des laitiers basiques très réfractaires nécessitant aux tuyères une haute température ; et pour éviter que la chaleur ne monte dans le fourneau, suivant l'expression des fondeurs, et qu'il n'en résulte une consommation de combustible exagérée, il sera nécessaire de donner à l'appareil une hauteur et un volume beaucoup plus considérables.

D'autres raisons, d'ordre mécanique, conduisent à donner aux hauts-fourneaux au coke une hauteur supérieure à celle des fourneaux au bois. C'est un fait d'expérience que la substitution du coke au charbon de bois dans les mêmes appareils a donné des résultats déplorable. La descente se fait mal et par chutes : les morceaux de coke s'arc-boutent et le creuset s'engorge, tandis qu'au charbon de bois la descente était parfaitement régulière. C'est qu'en effet les conditions de la descente de la charge aux étalages,

où le minerai est complètement désagrégé, dépendent principalement de la nature du combustible. Avec un combustible tendre, les accrochages ne sont guère à redouter ; tandis qu'avec le coke, ils se forment aisément, s'il n'y a pas au-dessus des étalages une forte charge pour déterminer le mouvement de toute la masse. Pour assurer la descente régulière des charges, il faudra donc donner aux hauts-fourneaux au coke une hauteur plus grande, et surtout augmenter les dimensions relatives de la cuve au-dessus des étalages.

Dès que les maîtres de forges se furent rendu compte des avantages que présentaient au point de vue de la consommation de combustible les fourneaux de grandes dimensions, ils s'engagèrent résolument dans une voie qui devait les conduire, d'autre part, à une production plus intense et par conséquent à une économie de main d'œuvre et de frais généraux. Au début du siècle, les hauts-fourneaux n'avaient guère plus de 12 à 13 mètres, avec 70 à 80 mètres cubes de capacité. Vers 1850, commença en Angleterre l'ère des grandes dimensions. En 1860, on avait construit des fourneaux de 15 mètres de hauteur cubant 175 mètres ; en 1864, on avait atteint 25 mètres

et 330 mètres cubes de capacité. La production avait augmenté d'un tiers, et la consommation de coke avait baissé dans le Cleveland de 1450 à 1125 kilogrammes par tonne de fonte, avec du vent chauffé à 450° C. Ces résultats étaient trop encourageants pour qu'on ne persévérât pas dans la même voie. Après avoir construit des fourneaux de 29 mètres cubant 430 mètres, on augmenta progressivement les dimensions transversales jusqu'au moment où l'on construisit, en 1870, des fourneaux monstres, cubant 1100 et même 1200 mètres avec des hauteurs de 27 mètres 50 et des diamètres au ventre de plus de 9 mètres. Mais ces essais donnèrent des résultats déplorables et l'on dut revenir à des dimensions moindres.

Ainsi donc, en élevant les fourneaux jusqu'à 24 mètres, en augmentant la capacité jusqu'à 250 ou 350 mètres cubes, on avait obtenu une amélioration d'allure considérable, due à ce que la température des gaz du gueulard s'abaissait, que la réduction s'effectuait plus complètement par l'oxyde de carbone et que les pertes de chaleur par les parois avaient notablement diminué. Si l'on cherchait à augmenter outre mesure les dimensions, ces avantages disparaissaient. La température du gueulard restait stationnaire :

en passant de 24^m,40 de hauteur, avec 453 mètres cubes, à 31^m,50 avec 935 mètres cubes, on ne gagnait que 6° centigrades. D'autre part, la production était loin de varier proportionnellement au volume. Ainsi on ne réalisait plus aucune économie de coke ; et les fourneaux monstres comportaient une allure dont la lenteur exagérée présentait des inconvénients sérieux.

L'expérience a été répétée dans tous les pays : partout les fourneaux monstres ont dû être décapités. M. Grüner attribue ce fait à ce que le dégagement de chaleur produit par le doublement de l'oxyde de carbone limite le refroidissement dû à la hauteur de la cuve ; de sorte qu'au-dessus d'une certaine hauteur, la température des gaz se maintient sensiblement constante. Quant à l'exagération des dimensions transversales, elle nuit à la bonne circulation des gaz ; au milieu de ces larges sections, le courant gazeux se fraye des cheminées et monte à travers la charge sans avoir avec le minerai une plus grande surface de contact : il en résulte un moindre effet utile du combustible employé.

Pour que la circulation des gaz s'effectue d'une façon régulière, il est nécessaire que le

profil soit élancé. Le diamètre du haut-fourneau est limité au gueulard par celui de l'appareil de chargement, et ne dépasse en général pas 4 à 5 mètres. Il est déterminé au creuset par la limite pratique de la pression du vent, qui doit être assez forte pour faire pénétrer la zone chaude jusqu'au centre du fourneau. Avec les pressions de 18 à 22 centimètres de mercure habituellement employées en France, on ne peut guère dépasser 2 mètres à 2^m,50 de diamètre et on n'a jamais été, dans aucun pays, au-delà de 3^m,50. Au-dessus du creuset, le haut-fourneau doit donc s'évaser de manière que la cuve atteigne un volume raisonnable. Mais si l'on veut assurer une bonne circulation des gaz, il faut que la pente des étalages soit raide : Elle est généralement comprise, dans les hauts-fourneaux modernes, entre 70 et 80°. Avec des étalages plats, une zone considérable échappe à l'action des gaz, et la charge descend à l'intérieur d'un profil qui se trace naturellement au milieu des garnissages accumulés dans l'angle plus ou moins aigu des étalages. On n'a pas tardé à reconnaître qu'il y avait grand avantage à s'en tenir comme profil à celui qui correspondait à la descente naturelle de la charge. M. Grüner classait les hauts-fourneaux en trapus, moyens ou élancés, suivant

que le rapport de la hauteur au diamètre était inférieur à 3, compris entre 3 et 4, ou supérieur à 4. Seuls, les fourneaux élancés ont donné des résultats satisfaisants.

Ainsi donc il est établi, par des considérations théoriques confirmées par l'expérience, que les étalages doivent être raides. On admet généralement que le ventre doit avoir un diamètre au plus égal au quart de la hauteur du fourneau. Mais la hauteur du ventre au-dessus du fond du creuset ne doit pas être exagérée, au moins dans les fourneaux au coke. Cette distance est supérieure au tiers, sans jamais atteindre la moitié de la hauteur totale de l'appareil.

Au-dessus du ventre est la cuve, dont le profil a été l'objet de longues discussions et de nombreuses expériences. Aux étalages, l'évasement plus ou moins rapide du fourneau a localisé les hautes températures. La cuve est à proprement parler la zone des échanges de chaleur. Il importe donc que sa capacité soit grande. Toutefois le profil cylindrique, qu'on a notamment appliqué aux fourneaux monstres de 1870, présente des inconvénients : les accrochages s'y produisent aisément ; d'autre part, les charges y descendent inégalement : la partie centrale beaucoup plus

rapidement que la périphérie. Enfin, pour réaliser une distribution satisfaisante des matières au gueulard — condition essentielle à la bonne circulation des gaz — il faut qu'il n'y ait pas un trop grand écart entre le diamètre du gueulard et celui de l'appareil de chargement : la base du cône devant avoir une section sensiblement égale à la moitié de celle du gueulard. Toutes ces considérations conduisent à rétrécir notablement le fourneau à sa partie supérieure. — Le gueulard a généralement un diamètre compris entre les $\frac{2}{3}$ et les $\frac{3}{4}$ de celui du ventre. Le profil, entre ces deux points, est, en général, rectiligne ou très légèrement courbe ; la plupart des hauts-fourneaux, notamment en France, en Styrie, en Suède, aux États-Unis, sont ainsi constitués par deux troncs de cône, ayant leur grande base commune, raccordés parfois par une partie cylindrique de peu de hauteur. Plusieurs ingénieurs préfèrent des profils courbes, afin de supprimer les angles. Dans tous les cas, il y a un sérieux avantage à s'en tenir aux lignes simples et à éviter les complications inutiles qui rendent la construction plus difficile et qui ne résistent pas à quelques mois de marche.

Ces indications sont forcément peu précises, car chaque cas particulier comporte une solu-

tion différente, qu'on ne peut guère déterminer que par tâtonnements. La pente de la cuve, notamment, est un point délicat à fixer ; trop droite, elle occasionne des accrochages : les charges, en descendant, usent le garnissage réfractaire, et ces dégâts ont pour conséquence une descente irrégulière, et une circulation défec- tueuse du gaz ; trop inclinée, elle occasionne dans la descente des charges une séparation mécanique ; le coke étant chassé vers les parois. D'autre part, il y a avantage, au point de vue de la réduction des minerais, à donner la plus grande capacité possible à la zone supérieure du haut-fourneau. Il faudra donc éviter d'exagérer l'inclinaison de la cuve et pour cela donner au gueulard la section la plus large possible, dans les limites compatibles avec une bonne circulation des gaz et avec une descente des matières solides effectuée sans accrochages. Ici la nature physique des minerais a une grande importance. A ce point de vue, les documents les plus instructifs seront fournis par l'examen du profil d'un fourneau mis hors feu, après une campagne.

D'autre part, suivant la nature chimique du minerai, diverses modifications pourront s'imposer. Avec des matières très fusibles, il conviendra d'ouvrir davantage les étalages, afin d'empêcher

la chaleur de monter ; on pourra les rendre plus raides, lorsqu'il s'agira de traiter des minerais réfractaires ou bien de fabriquer des produits riches en Mn ou en Si. Les substances difficilements réductibles exigeront une cuve plus vaste, où elles puissent séjourner davantage dans les régions froides.

Mais il ne suffit pas de déterminer, d'une façon rationnelle, le profil d'un haut-fourneau. Il est un point non moins délicat à régler : c'est l'allure, qui doit varier, suivant la nature des minerais, et celle des produits à obtenir, et qui a, avec le profil du fourneau, les rapports les plus intimes. Or, l'allure se règle par la quantité de vent soufflée aux tuyères.

Le haut-fourneau est un appareil fort élastique, qui permet d'obtenir, par un choix judicieux de matières premières, par un lit de fusion approprié et par un chauffage convenable du vent, les produits les plus divers. Les corrosions ou les garnissages qui se produisent à l'intérieur des étalages réalisent naturellement, dans de certaines limites, le profil qui convient à chaque fabrication. Mais à chaque fabrication avec un profil donné correspond une allure dont on ne peut guère s'écarter. Car si l'on augmente la

quantité de vent soufflée sans faire varier le diamètre du creuset, la chaleur monte dans les étalages et occasionne des irrégularités de marche. Si l'on veut trop pousser des fourneaux marchant en fonte grise, on obtient des laitiers noirs, des fontes plus riches en soufre et en silicium. Lorsqu'on veut passer, avec les minerais oolithiques de la Lorraine, de l'allure de moulage, donnant des laitiers blancs et consommant 1000 à 1100 kilog. de coke, à l'allure d'affinage, en diminuant les charges de coke et en rendant les laitiers plus fusibles, on peut accélérer l'allure; mais les laitiers deviennent noirs, en se chargeant de fer, et le déchet augmente.

Pour augmenter la production d'un haut-fourneau en conservant la même marche, il faut modifier son profil : si l'on veut brûler plus de coke on doit, pour ne pas changer la répartition des températures dans la hauteur du fourneau, donner au creuset une plus large section ; ce qui conduit à augmenter la pression du vent.

L'élargissement du creuset, l'élévation de la pression du vent, telles sont les conditions essentielles d'une forte production. En Europe, jusqu'à ces dernières années, on a hésité à dépasser les pressions de 20 centimètres de mercure ; et même avec les fourneaux monstres du Cleveland,

où on atteignait des diamètres de 2^m,50 et 3 mètres, pour des capacités de 700 et 1 165 mètres cubes, on s'en tenait en deçà de ce chiffre. De là l'insuccès de ces tentatives : au-delà de la capacité et de la hauteur qui correspondent à l'abaissement maximum de la température du gueulard et à la meilleure utilisation du carbone, toute augmentation des dimensions est inutile, à moins qu'elle ne corresponde à une production plus grande. Or, on ne peut produire davantage qu'en forçant le vent proportionnellement au diamètre du creuset. On ne pouvait marcher pour 30 mètres de hauteur à la même pression que pour 20 mètres, que s'il se formait des cheminées : ceci explique le rendement defectueux, et l'allure déplorablement lente des fourneaux monstres d'Ormesby et de Ferry-Hill.

Les Américains, vers 1880, se sont engagés dans la voie des fortes productions. Après avoir obtenu d'excellents résultats en soufflant dans un fourneau de 19^m,50 de hauteur, et cubant 172 mètres, un volume de 400 mètres cubes de vent chauffé à 560° C par minute, ils augmentèrent progressivement le vent, en même temps que le diamètre du creuset et le volume du haut-fourneau, jusqu'au moment où ils arrivèrent à faire passer dans un fourneau de 450 mètres un

volume de 900 mètres cubes de vent. Mais devant les consommations de coke qui allaient en croissant, et la production qui restait stationnaire, on dut revenir en arrière et modifier le profil, en même temps qu'on diminuait le vent. On abaissa le ventre, on donna plus de pente à la cuve tout en s'en tenant à une règle qui avait donné d'excellents résultats, et qui consistait à donner au creuset un diamètre moitié de celui du ventre. On arriva ainsi à constituer un profil qui, avec 27 mètres de hauteur, 3^m,30 de diamètre au creuset, 6^m,90 au ventre et 4^m,80 au gueulard, et une capacité totale de 580 mètres cubes, permet de produire 350 tonnes de fonte par 24 heures, avec un minerai rendant 62 % de fer, en soufflant par minute 730 mètres cubes de vent chauffé à 600° C. ; la consommation de coke se maintenant à 840 kilogrammes par tonne de fonte.

La rapidité de l'allure a pour premier avantage de réduire les pertes par rayonnement et conductibilité. Il en résulte une économie considérable, car ces pertes représentent parfois une proportion de 20 % de la chaleur totale fournie à l'appareil. Dans certains fourneaux d'Europe, ces pertes s'élèvent à 1 000 calories par kilogramme de fonte, ce qui correspond à la combus-

tion de près de 300 grammes de coke. Réduire de moitié ces pertes reviendrait à diminuer de près de 15 % la consommation de combustible.

En revanche, la rapidité exagérée de l'allure présente des inconvénients. Les échanges de chaleur sont d'autant moins complets que la vitesse du courant gazeux est plus grande. La chaleur sensible des gaz du gueulard doit donc augmenter avec la rapidité de l'allure. C'est là un inconvénient auquel on peut remédier en partie en exhaussant le fourneau : c'est ainsi que les Américains, grâce à leurs fortes pressions de vent, ont pu employer avec avantage des fourneaux de 27 mètres de hauteur. Mais il est un inconvénient plus grave : c'est la moins bonne utilisation du combustible. Il est difficile, avec une allure rapide, d'empêcher la chaleur de monter ; d'autre part, les charges parviennent plus vite dans les zones chaudes, où le carbone solide intervient ; elles restent moins longtemps dans la zone où s'effectue le dédoublement de CO ; la réduction s'effectue donc d'une façon moins avantageuse ; si l'on exagérait l'allure outre mesure, la réduction cesserait même de pouvoir s'effectuer complètement, et la production baisserait malgré l'énergie du soufflage. L'économie réalisée sur les pertes par

les parois se trouve de ce fait en partie compensés.

D'autre part, la vitesse du courant gazeux tend à diminuer la proportion d'acide carbonique réduite dans la cuve par le carbone solide. Mais le principal avantage de l'allure rapide, et des hautes pressions qui en sont la condition essentielle, vient de ce qu'elles assurent un contact plus complet entre le minerai et les gaz réducteurs : les gaz filtrent à travers la masse solide d'une façon plus régulière, plus complète : les surfaces de contact se trouvent ainsi multipliées, et il faut moins de gaz, par conséquent moins de combustible, même avec un moins bon rendement calorifique, pour enlever au minerai une même proportion d'oxygène. C'est ainsi que l'allure rapide a donné d'excellents résultats aux États-Unis, malgré la nature difficilement réductible des minerais du lac Supérieur.

L'art du fondeur consiste à établir la balance entre ces inconvénients et ces avantages opposés. Mais comme règle générale, il faut s'efforcer de marcher vite. On se trouve arrêté dans cette voie, comme l'ont été les Américains, par une limite qui varie suivant la nature du lit de fusion. Les minerais difficiles à réduire devront séjourner davantage dans la zone tempérée ;

avec des gangues fusibles, il faudra éviter de laisser monter la chaleur : d'où la nécessité de ralentir l'allure. Mais, en principe, il faut demander l'économie de combustible à l'allure rapide ; les avantages qui en résultent compensent et au-delà, jusqu'à une certaine limite, les inconvénients occasionnés par une légère élévation de la température du gueulard, et une moins bonne utilisation du combustible. Dans la plupart des cas, à l'avantage qui résultera au point de vue du prix de revient d'une production plus élevée, s'ajoutera une économie de combustible.

L'exemple des Américains commence à se répandre en Europe et la plupart des maisons de construction ont commencé à livrer à l'industrie des souffleries plus puissantes qui permettront, sinon d'atteindre les pressions de 40 et 50 centimètres de mercure, usitées aux États-Unis, du moins d'aller, lorsque le besoin s'en fera sentir, au-delà des pressions de 20 centimètres rarement dépassées autrefois. L'emploi de ces hautes pressions a d'ailleurs un avantage notable : il permet de traiter rationnellement les minerais menus. C'est ainsi qu'on passe, à Scranton, en Pennsylvanie, dans un fourneau de 22 mètres de hauteur, ayant 6 mètres de diamètre au ventre, et 3^m,60 au creuset, un minerai composé, pour

70 PROFIL ET ALLURE DES HAUTS-FOURNEAUX

une proportion de $\frac{1}{6}$, de concentrés magnétiques de 1 centimètre de dimension moyenne; le combustible employé se compose de $\frac{1}{6}$ de coke et de $\frac{5}{6}$ d'anhracite; la pression varie de 50 à 80 centimètres de mercure; et on obtient ainsi une production de 80 tonnes de fonte par 24 heures, avec du minerai tenant en moyenne 55 % de fer.

L'allure rapide a un dernier avantage qui n'est pas le moins important, au point de vue de la conduite du travail : par le fait même que les charges passent moins longtemps dans l'appareil, les changements d'allure sont plus rapides, l'appareil est plus maniable, et on remédie plus aisément aux accidents. Dans les fourneaux monstres, aujourd'hui abandonnés, les charges séjournaient 60 à 70 heures. Dans les fourneaux actuels du Cleveland, de 450 mètres cubes, elles séjournent 30 à 40 heures. Dans les fourneaux modernes des États-Unis, elles ne séjournent guère plus de 24 heures : c'est là un avantage précieux.

Au lieu d'accélérer l'allure du haut-fourneau en forçant la pression aux tuyères, on peut atteindre ce résultat en diminuant la charge qui s'oppose à la circulation des gaz. C'est ce que viennent de réaliser en Angleterre, à l'usine de Newport,

MM. Hawdon et Howson, par l'emploi d'un haut-fourneau à profil assez compliqué, comportant, au-dessus du creuset et des étalages, deux régions cylindriques reliées par une seconde zone d'étalages de peu de hauteur ; une troisième zone d'étalages, également peu développée, relie le sommet de cette cuve à une sorte de demi-sphère qui termine le fourneau. L'effet de cette double série d'étalages est de reporter le poids de la charge solide sur les parois, et de l'empêcher de peser sur les matières pâteuses de la zone chaude. On a, par ce moyen, réalisé une économie de 50 kilogrammes de coke par tonne de fonte produite, tout en augmentant la production de 40 % : le nouveau fourneau de Newport produit 700 tonnes par semaine de fonte n° 3, tandis que les anciens fourneaux de même capacité produisent 500 tonnes de fonte n° 2.

L'indication de la capacité par tonne produite en 24 heures peut servir de mesure à la rapidité de l'allure, mesure d'ailleurs peu comparable d'une région à l'autre, puisque cette méthode d'évaluation ne tient pas compte de la nature du minerai et des gangues à fondre. Les hauts-fourneaux au bois, les hauts-fourneaux au coke de Styrie, cubant 150 mètres, et les fourneaux de Pittsburg de 550 mètres cubes ont une

caractéristique inférieure à 2 mètres cubes par tonne de fonte produite en 24 heures. Avec des minerais de 35 à 45 % de fer, on s'en tient en général, en Europe, à 3 ou 4 mètres cubes. Les hauts-fourneaux monstres du Cleveland atteignaient 12 mètres cubes. Comme il a été dit plus haut, ces fourneaux produisaient très peu.

On a vu que l'on avait été vite arrêté, dans la voie de l'accroissement des dimensions des hauts-fourneaux. Il ne paraît pas qu'on ait intérêt, au point de vue de la consommation de combustible, à augmenter la capacité de ces appareils au-delà de 350 mètres cubes. Des résultats au moins aussi bons que ceux d'Edgar Thomson ont été obtenus à Chicago avec des hauts-fourneaux de 250 mètres cubes de capacité. En France, avec du minerai à 52 % de fer, on a obtenu des résultats remarquables dans des hauts-fourneaux au coke qui n'avaient pas plus de 100 mètres cubes de capacité, et 15 mètres de hauteur, mais avec 2 mètres de diamètre au creuset, 3^m,50 au ventre, et 2^m,50 au gueulard. On produisait ainsi 50 tonnes par 24 heures, en consommant par tonne de fonte moins de 950 kilogrammes d'un combustible très cendreux. Cette marche correspondait à une capa-

rité de $1^{\text{m}^3},8$ par tonne de fonte produite en 24 heures.

Une fois le profil réalisé, l'allure déterminée, et le fourneau en bonne marche, il est nécessaire, si l'on veut obtenir de bons résultats, de maintenir une régularité parfaite dans les conditions de la production. Il faut donc assurer simultanément la régularité du chargement, celle du vent soufflé, et celle de la température aux tuyères. En particulier, il est nécessaire de faire marcher les machines soufflantes à une vitesse constante, quelle que soit la pression aux tuyères, afin qu'il y ait toujours, dans un même temps, un même volume de vent soufflé, correspondant à un même poids de minerai, de castine et de coke. C'est là un principe fondamental, que les Américains appliquent depuis 1871, et qui consiste à régler l'allure des hauts-fourneaux non à la pression du vent aux tuyères, mais au nombre de tours des machines soufflantes. C'est dans l'application de ce principe qu'il faut chercher l'une des causes des grands progrès qu'a faits depuis 20 ans la fabrication de la fonte aux États-Unis.

CHAPITRE IV

—

ROULEMENT DES HAUTS-FOURNEAUX

Classification des fontes. — Les fontes peuvent être divisées, au point de vue de leur emploi, en trois catégories principales : les fontes de moulage, les fontes d'affinage, et les fontes pour acier.

Les *fontes de moulage* sont les plus carburées et surtout les plus riches en graphite : elles tiennent 3 à 4 % de carbone dont 0,3 à 0,7 % de carbone dissous. La présence des paillettes de graphite diminue la ténacité du métal, c'est-à-dire sa résistance à la traction, qui ne dépasse jamais 30 kilogrammes par millimètre carré, avec les fontes au bois les plus pures ; en revanche, ces fontes, moins dures que les fontes

blanches qui sont riches en carbone dissous, résistent mieux aux chocs, et sont propres à travailler à la compression.

Ainsi qu'on le verra plus loin, la séparation du carbone à l'état de graphite est provoquée par la présence du silicium. Ce métalloïde doit donc entrer dans la composition des fontes de moulage : mais à trop haute dose il rend la fonte esquilleuse ; sa teneur ne peut guère dépasser 3 %. Le manganèse doit également s'y trouver à faible dose, car il retient le carbone en combinaison, et à des teneurs supérieures à 1,5 % il provoque la cristallisation du métal. Le phosphore a l'avantage de rendre la fonte plus fusible ; aussi sa présence est-elle recherchée pour les moulages d'ornement. Mais il diminue la ténacité, et pour cette raison doit être proscrit des moulages mécaniques : les teneurs de 0,5 % correspondent à une ténacité moyenne ; 1 % est la limite extrême admissible pour les moulages courants. Quant au soufre, il est extrêmement nuisible dans les moulages, dont il augmente le retrait, provoquant des soufflures et des cavernes.

Les fontes de moulage sont divisées en cinq ou six classes, numérotées suivant l'aspect du grain. Les fontes n^{os} 1 et 2, trop gra-

phiteuses, ne sont guère employées qu'en deuxième fusion, en mélange avec des fontes avancées. Le n° 3 peut se mouler directement, et convient aux pièces les plus diverses ; les derniers numéros, plus durs, à grain plus serré, moins riches en silicium, trempent généralement en pièces minces. Les fontes les plus tenaces sont, parmi celles à grain relativement serré, les plus pures.

La dureté de la fonte dépend de la teneur en carbone dissous. Or, un refroidissement brusque, empêchant le graphite de se séparer, provoque la formation de la fonte blanche. C'est une propriété dont on a tiré parti en appliquant la trempe à certains moulages, destinés à résister à l'usure, tels que les roues de wagons, les cylindres de laminoirs, les projectiles de rupture, etc. Cette trempe s'effectue par la coulée en coquille, c'est-à-dire par l'emploi de moules métalliques : on obtient ainsi un durcissement superficiel, plus ou moins profond, de l'objet moulé.

Les fontes destinées à être ainsi durcies doivent tenir assez de silicium pour que la partie non trempée reste grise ; mais elles doivent en renfermer le moins possible ; car plus la teneur en silicium est élevée, plus il faut un refroidis-

sement brusque pour empêcher la séparation du graphite ; il se produit alors des tensions excessives, pouvant occasionner des ruptures.

Ces fontes tiennent en moyenne de 3,5 % de carbone, et 0,7 % de silicium. Le manganèse y est peu abondant, du moins dans les pièces fines. Quant au phosphore, il doit être considéré comme une impureté. On voit que les hauts-fourneaux au bois conviennent d'une façon toute spéciale à cette fabrication, qu'on n'a réussie au coke qu'à une époque relativement récente.

Les *fontes d'affinage* sont destinées à la fabrication du fer. Elles renferment moins de silicium que les fontes de moulage et sont en général plus pures ; le phosphore, et surtout le soufre et l'arsenic, ont de graves inconvénients. Par contre, la présence du manganèse est avantageuse pour le puddlage.

La composition de ces fontes est d'ailleurs extrêmement variable. Le bas-foyer exige des fontes très graphiteuses, tenant jusqu'à 4,5 % de carbone total, avec 1 % de carbone dissous. Pour le puddlage bouillant, on se sert de fontes grises, à grain plus ou moins serré, où la teneur en silicium varie de 2 à 1%. Lorsque cette teneur s'abaisse au-dessous de 1%, on passe aux fontes

truitées, où le graphite est disséminé en taches, au milieu d'un métal plus ou moins blanc, et qui se divisent elles-mêmes en truitées blanches et truitées grises. Puis viennent les fontes blanches grenues, où il n'existe plus de graphite, et où la teneur en carbone s'abaisse au-dessous de 3 % ; produites au coke à une allure rapide et peu chaude, avec des laitiers fusibles, elles tiennent peu de silicium mais souvent beaucoup de soufre.

Il existe des fontes blanches plus riches en carbone qui proviennent, soit du traitement au charbon de bois — elles ont alors une cassure satinée ou fibreuse — soit du traitement au coke, mais avec des minerais manganésés : la présence du manganèse retient le carbone en combinaison ; et, dès la teneur de 3 %, donne à la cassure de la fonte un aspect cristallisé et rayonné.

Les fontes pour acier sont infiniment plus pures encore que les fontes d'affinage : le phosphore, qui s'élimine relativement bien au puddlage, reste dans le bain, au Bessemer ou au Martin, si le revêtement est acide : pour la fabrication des rails on ne tolère pas plus de 0,10 % de phosphore dans la fonte ; et cette teneur s'abaisse, pour la fabrication de l'acier or-

dinaire, à 0,05 % ; et pour celle de l'acier à outils, à 0,01 %. Le soufre ne doit pas dépasser une teneur de 0,05 %. Quant au carbone total, il doit être en teneur suffisante pour que tout le silicium soit éliminé avant le départ complet du carbone.

Au four Martin, on emploie de préférence des fontes manganésées, pauvres en silicium. Au Bessemer, il faut au contraire des teneurs en silicium relativement élevées, afin que la combustion de ce métalloïde fournisse de la chaleur au bain ; on ne peut guère s'en tenir au-dessous de 0,7 à 0,8 %, et généralement on s'en tient entre 2 et 3 %, la teneur en carbone total étant voisine de 4 %, et celle en manganèse variant de 2 à 6 %.

L'utilisation de revêtements basiques dans la cornue Bessemer a nécessité l'emploi de fontes spéciales, dites fontes Thomas : comme élément comburant à défaut du silicium, dont la teneur doit être réduite autant que possible, on force dans ces fontes la teneur en phosphore ; 2,50 et 2,75 % sont des teneurs aujourd'hui recherchées. Le silicium est réduit à moins de 0,5 %. Quant au soufre, on cherche à abaisser sa teneur au-dessous de 0,10, en introduisant dans la fonte 1,50 à 1,75 % de manganèse.

En dehors de ces produits, de fabrication courante, on fabrique au haut-fourneau des fontes spéciales, renfermant des proportions élevées de métalloïdes ou de métaux étrangers : silicium, manganèse, chrome, tungstène, nickel, etc.

La fabrication des fontes nickélifères est aujourd'hui abandonnée, à cause de la difficulté qu'on éprouve à les débarrasser, dans le traitement ultérieur, du soufre qu'elles retiennent toujours en proportion plus ou moins grande. Mais on obtient au haut-fourneau des ferrotungstènes, tenant jusqu'à 24 % de tungstène, 41,5 % de manganèse, et plus de 5 % de carbone, qui se présentent sous l'aspect de fontes blanches, finement grenues, et même à cassure presque unie ; — des ferrochromes, dont la composition varie depuis 3,8 % de chrome, avec 4,4 % de carbone, jusqu'à 25,3 % de chrome, 53,20 % de manganèse, et 4,75 % de carbone, produits durs, à cassure blanche, fibreuse et brillante. Les fontes siliceuses, peu fusibles, mais très fluides, sans ténacité ni sonorité, à cassure esquilleuse, renferment jusqu'à 12 % de silicium. Mais parmi ces produits spéciaux, les plus importants, au point de vue des applications métallurgiques, sont ceux qui renferment du manganèse : fonte rubanée, lorsque la

teneur en manganèse varie de 3 à 10 %; fonte miroitante, spiegeleisen, ou par abréviation spiegel, lorsqu'elle varie de 10 à 20 %; ferromanganèse, lorsqu'elle dépasse 25 %. A mesure que la teneur augmente, la fonte prend un aspect cristallin; la cassure est d'abord miroitante, à larges facettes, qui, vers les teneurs de 15 à 16 %, ont un éclat très vif. Au-delà de 16 %, la cristallisation devient confuse et l'éclat diminue; de 15 à 30 %, la fonte est feuilletée, puis elle devient grenue. La teneur en carbone s'élève avec celle en manganèse: de 5,20 % avec 25 % de Mn, elle s'élève à 5,65 pour les ferromanganèses à 64 %; et à 6,62 % pour ceux à 85 %. On fabrique enfin au haut-fourneau des produits tenant ensemble du silicium et du manganèse: ce sont les silico-spiegels, d'un usage précieux pour la métallurgie de l'acier; ces fontes peuvent renfermer 10 % de Si, avec 20 % de Mn, et 2,50 à 2,70 de C.

Les divers produits qui viennent d'être passés en revue ont des teneurs en carbone qui varient dans d'étroites limites: 2,50 est un minimum, au moins pour les fontes au coke; 7 % est un maximum; les fontes ordinaires, blanches ou grises, renferment 3 à 4 ou 4,5 % de carbone.

Ce qui les différencie, indépendamment de leur pureté relative, au point de vue des propriétés physiques, ce n'est donc pas tant la teneur en carbone total que l'état dans lequel se trouve ce carbone. Le grain, qui dépend de la présence plus ou moins abondante du graphite, et des conditions dans lesquelles ce corps s'est séparé du métal, est, à ce point de vue, la caractéristique principale des fontes.

Quelles sont donc les lois de la précipitation du graphite ? Les fontes noires — les plus riches en graphite — sont d'ordinaire les plus chargées en carbone et en silicium ; mais cette règle n'est pas générale : il existe des fontes grises qui ne renferment pas plus de 3 et même 2,5 % de carbone total.

Les études de M. Osmond, et notamment ses expériences sur le refroidissement des métaux, ont fourni sur ce sujet des données précieuses : Il a établi que, dans les fontes blanches, le carbone improprement appelé *combiné*, par opposition au graphite, est, au contraire, pour la majeure partie, simplement *dissous* dans le fer dans l'état qu'il a désigné sous le nom de *carbone de trempe*. Une partie est combinée ; mais cette combinaison ne s'effectue que durant le refroidissement, une fois la solidification effectuée,

vers 695° C. Dans la fonte liquide, le carbone est entièrement dissous, et non combiné au fer.

La fonte grise, à l'état liquide, se compose d'une dissolution, dans le fer fondu, de corps solides, liquides et gazeux ; durant le refroidissement et la solidification de la fonte, ces divers éléments précipitent suivant leur ordre de fusibilité : d'abord le fer pur, ou faiblement carburé ; puis, vers 1150° C, un siliciure de fer, qui probablement correspond à la formule $Fe^4 Si$; plus tard encore, dans les fontes phosphoreuses, vers 900° C, un phospho-carbure de fer. Après la solidification du siliciure de fer, il reste, dans le barreau d'apparence solide, une solution de carbone dans le fer, qui se solidifie à son tour ; si elle est sursaturée, le carbone en excès se précipite, sous forme de graphite, au moment de la solidification, et entraîne une partie du carbone qui aurait pu rester dissoute ; le silicium aurait donc pour effet de concentrer le carbone dans une quantité de fer insuffisante pour le maintenir dissous à l'état solide ; le manganèse, au contraire, augmente la solubilité du carbone, et combat l'action du silicium.

Toutes ces transformations exigent du temps pour s'accomplir ; un refroidissement brusque maintient la situation originelle relativement

intacte : c'est le principe de la trempe. Des barreaux qui, par refroidissement lent, prendraient le grain de la fonte grise, se transforment en fonte blanche s'ils sont brusquement refroidis avant la température qui correspond à la solidification du siliciure. Inversement, des barreaux de fonte blanche, chauffés au-delà de ce point et refroidis lentement, se chargent de graphite.

Ainsi plusieurs éléments concourent à provoquer le dépôt de graphite, et la formation de la fonte à gros grains : c'est d'abord l'excès de carbone absorbé, qui peut provenir de la nature du minerai, de celle du combustible (les fontes au bois sont chargées de graphite, sans qu'il y ait besoin d'une très haute température aux tuyères), ou, dans les hauts fourneaux au coke, de la température de l'ouvrage. C'est ensuite l'excès de silicium, corrélatif, dans les hauts-fourneaux au coke, de l'excès de carbone. Mais la capacité calorifique doit aussi jouer un grand rôle dans des phénomènes qui dépendent de la vitesse de refroidissement. C'est là un fait d'expérience : la capacité calorifique des fontes grises est égale à 0,210 ; celle des fontes blanches n'est pas supérieure à 0,178 ; de même, la fusion des premières exige 25 calories ; celle des secondes, 11 calories par kilogramme. Or, la capacité

calorifique dépend de la composition chimique : les impuretés, provenant du minerai ou des combustibles, ont donc une importance considérable, impossible à déterminer *a priori*.

Ainsi donc, pour qu'un haut-fourneau fabrique de la fonte graphiteuse, il faudra que la fusion dans l'ouvrage soit précédée d'une réduction complète, et que, par conséquent, la gangue ne soit pas trop fusible ; il faudra aussi marcher à une allure chaude. Mais d'autres conditions, inhérentes à la nature du combustible ou du minerai, pourront rendre cette fabrication plus ou moins difficile. Dans certains cas, il sera presque impossible de marcher en moulage n^{os} 1 et 2. Dans d'autres cas, comme en Écosse, des minerais poreux et charbonneux donneront, avec du vent modérément chauffé, d'excellentes fontes de moulage. Mais dans tous les cas, avec un minerai et un combustible donnés, il suffira, pour s'élever dans l'échelle des fontes grises, de rendre l'allure plus chaude, et le laitier plus réfractaire, ce qui revient à augmenter la teneur en carbone et en silicium.

Combustibles employés au haut-fourneau. — On emploie principalement dans les hauts-fourneaux les produits de la carbonisation

de la houille et du bois. Les houilles grasses et demi-grasses qui boursoufflent au feu occasionneraient des accrochages et leur emploi doit être absolument proscrit. Mais les houilles non collantes, sèches ou maigres, constituent, lorsqu'elles sont suffisamment dures, d'excellents combustibles qui conviennent bien à la fabrication de la fonte. Dans le district anthracifère de Scranton, en Pennsylvanie, existent de nombreux hauts-fourneaux marchant à l'anthracite. En Écosse, aux environs de Glasgow, comme autrefois dans le Derbyshire et dans le pays de Galles, on se sert pour cet usage de houilles sèches à longue flamme ; les gaz du gueulard, aspirés par un ventilateur, se rendent dans des appareils de condensation où ils se débarrassent des produits de la distillation avant d'aller brûler aux chaudières.

L'*anthracite* a l'inconvénient de décrépiter au feu et de manquer de dureté. En revanche, son pouvoir calorifique est voisin de 9 000 calories et sa pureté est généralement grande. Les anthracites de Pennsylvanie tiennent en moyenne 88 % de carbone fixe, 3,5 % de matières volatiles, et 0,2 % de soufre.

Le *charbon de bois* est friable, et s'écrase sous une charge relativement faible. Il faut, si l'on veut obtenir le maximum de dureté, le préparer

vers 350 ou 400° C, et par calcination lente. C'est aussi dans ces conditions qu'il résiste le mieux à l'action de l'acide carbonique. Le charbon de bois est très hygrométrique et tient normalement 7 % d'eau. Son poids au mètre cube varie, suivant qu'il provient de bois résineux, de bois feuillus tendres ou durs, de 125 à 180 kilogrammes, de 140 à 200 kilogrammes, ou de 200 à 240 kilogrammes. Son pouvoir calorifique est d'environ 8 000 calories. Sa pureté est extrême; aussi la fabrication de la fonte au bois ne s'est-elle guère conservée, en dehors des pays de forêts comme la Suède, l'Oural, la Bohême, la Styrie, le Michigan et la région du lac Champlain, que pour la fabrication des fontes fines destinées à la fabrication de fers ou d'aciers de choix. On fabrique encore dans les Landes de la fonte au bois, à l'air froid, avec une économie relative de combustible. Le charbon de bois tient en moyenne 3 à 4 % de cendres, qui se composent d'une partie soluble (carbonate de potasse) et d'un résidu insoluble, formé de carbonates de chaux et de magnésie, d'oxydes de fer et de manganèse, et de silice. Le phosphore et le soufre n'existent qu'à l'état de traces insignifiantes.

Au contraire, le *coke* ne renferme jamais moins de 4 à 5 % de cendres; les cokes métal-

lurgiques en tiennent couramment en France 12 à 14 % ; et cette teneur s'élève parfois à 16 et 18 %, pour s'abaisser en Angleterre et en Allemagne à 8 ou 10 %. Ces cendres sont généralement impures : la carbonisation élimine une partie du soufre des pyrites ; mais il en reste au minimum 3 à 5 millièmes dans le coke, et parfois jusqu'à 3 %. La teneur en phosphore varie de 0,01 à 0,1 %, et même davantage. Pour le reste, les cendres se composent principalement de silice (50 à 60 %) et d'alumine (25 à 30 %), combinées avec de l'oxyde de fer, de la chaux et de la magnésie.

Moins hygroscopique que le charbon de bois, le coke n'absorbe à l'air sec que 1,5 % de son poids d'eau. Quand il a été mouillé, il en conserve 5,10 et même 15 %. Son pouvoir calorifique est d'environ 8 000 calories. Sa dureté, la facilité de son emploi, son prix généralement peu élevé, et l'abondance presque inépuisable des gisements de houille sont des avantages précieux ; de sorte que, sauf dans certaines régions ou pour des usages qui se restreignent de jour en jour, le coke tend à devenir le seul combustible employé dans la fabrication de la fonte.

L'effet utile des combustibles dans le haut-four-

neau dépend bien moins de leur pouvoir calorifique que d'un ensemble de circonstances qui modifient, suivant leur nature et leur composition, la manière dont ils se comportent en présence du minerai et du courant gazeux. A ce point de vue, le charbon de bois a sur les autres combustibles un avantage marqué. Son effet utile, déduction faite de l'humidité qu'il renferme, dépasse 4100 calories, tandis que celui du coke dépasse rarement 3800. Cela tient à la forte proportion d'acide carbonique qui se produit dans les fourneaux au bois, comme il a été indiqué au Chap. I^{er}, grâce à la propriété particulière de ce combustible, aux températures relativement modérées où il est soumis. L'anhracite a un effet utile moindre que le coke, malgré son pouvoir calorifique supérieur : ceci tient à la propriété qu'a ce combustible de se déliter à la chaleur : le poussier qui se produit tend à obstruer le passage des gaz, et à leur opposer une résistance peu favorable à leur bonne utilisation : de sorte que, pour une même qualité de fonte produite, la consommation de combustible suivra une progression croissante, suivant que le même minerai sera traité dans des fourneaux au bois, au coke, ou à l'anhracite.

L'emploi de la houille crue présente des avan-

tages que des inconvénients sérieux compensent, et au-delà, dans la plupart des cas. Considérons, par exemple, le cas des fourneaux d'Écosse, qui traitent de la houille ainsi composée :

Eau	11,62	
Carbone total	66,00	dont 53,41 fixe et 12,59 volatil
H	4,34	} dont 16,37 //
O	11,09	
Az	0,94	
S	0,59	
Cendres	5,41	
Total . .	100,00	dont matières volatiles : 38,96.

On constate, à l'analyse des gaz du gueulard, qu'il s'est formé à l'intérieur de l'appareil un poids d'eau correspondant exactement au poids d'oxygène renfermé dans la houille, qui s'est combiné à un poids de 1^{er},38 d'hydrogène sur 4^{es},34 contenus dans ce combustible. Il semble donc que la combustion de l'hydrogène, et la présence à l'intérieur du fourneau d'une quantité appréciable d'un agent aussi réducteur, doivent augmenter l'effet utile du combustible. Il n'en est rien : la fabrication d'une même nature de fonte, avec du vent chauffé à 450° C, consommait, dans le Cleveland, 1 450 kilogrammes de coke renfermant 1 132 kilogrammes de carbone fixe ; et à Gartsherrie, 2 100 kilogrammes de houille, renfermant 1 318 kilogrammes de carbone fixe.

L'effet utile du kilogramme de combustible était avec le coke de 3912 calories, avec la houille crue de 3746 calories ; soit une différence de $4\frac{1}{2}\%$.

Cette différence d'effet utile peut s'expliquer par la différence des teneurs en acide carbonique des gaz du gueulard : En comparant deux hauts-fourneaux traitant des minerais à peu près identiques, l'un au coke, dans le Cleveland, l'autre dans le Derbyshire, avec de la houille à 35 % de matières volatiles, sir Lowthian Bell a pu établir que, dans les gaz du second, il y avait 20 % de carbone en moins à l'état d'acide carbonique, ce qui correspondait à une diminution d'effet utile de 1020 calories par kilogramme de combustible. En se transformant en coke dans la région supérieure du haut-fourneau, la houille demeure un certain temps dans cet état intermédiaire de coke tendre insuffisamment cuit, où l'acide carbonique l'attaque avec une grande énergie ; d'autre part, l'hydrogène libre réagit sur l'acide carbonique. Ces deux actions tendent à régénérer de l'oxyde de carbone. Elles suffisent à expliquer le rendement inférieur de la houille crue dans le haut-fourneau.

Si l'on veut effectuer une comparaison rationnelle il faut, en regard de cette perte de 4 à 5 %

sur la houille chargée, considérer le déchet qui se produit dans la fabrication du coke et le prix de revient de la carbonisation. Ceci ferait pencher la balance en faveur de la houille crue, s'il n'y avait pas entre les gros morceaux, seuls utilisables au haut-fourneau, et les menus livrés à la carbonisation, une différence de valeur qui, dans la plupart des cas, donne à l'emploi du coke un avantage incontestable. Les districts où l'on trouve une réelle économie à faire de la fonte à la houille sont en définitive fort rares ; il faut pour cela des conditions spéciales, qui se rencontrent par exemple dans le Lanarkshire, où les couches de *splint coal* donnent à un prix de revient modique du charbon en gros morceaux, brûlant à l'air sans trace d'agglomération, et qui, calciné au creuset, donne un coke dense sans changement apparent de volume. Il est juste d'ajouter que, à Gartsherrie, les produits de la distillation sont soigneusement recueillis au sortir du fourneau, tandis que les fours de boulanger, généralement en usage en Angleterre, ne les utilisent pas et laissent ainsi échapper une source de bénéfices considérables.

Calcul du dosage. — Le laitier se forme par la combinaison de la gangue du minerai avec les

cen­dres du com­bus­ti­ble et avec la cas­line, ou l'er­bue, ajou­tée à la charge. Or, c'est de la fu­si­bi­lité plus ou moins grande du laitier que dépend prin­ci­pa­le­ment la marche du haut-four­neau. Le calcul du dosage, c'est-à-dire la déter­mi­na­tion des élé­ments con­sti­tuant la charge, doit donc avoir pour but de former un laitier dont la fu­si­bi­lité cor­res­p­ond à l'allure et à la fabri­ca­tion qu'on se propose de réaliser.

Les laitiers, comme il a été dit au Chap. I^{er}, ne sont pas des composés définis. Ce sont plutôt des mélanges de silicates et de sulfures, dont le point de fusion varie d'une manière continue lorsqu'on fait varier leur composition. On peut résumer, à ce point de vue, les propriétés de ces silicates dans les trois règles suivantes :

1^o un silicate formé d'une base fusible est d'autant plus fusible qu'il renferme une plus grande quantité de base ;

2^o si la base est infusible, le maximum de fu­si­bi­lité du silicate cor­res­p­ond à une composition déter­mi­née, gé­né­ra­le­ment comprise entre celle d'un bisilicate et celle d'un trisilicate ;

3^o pour un même rapport entre la teneur en oxygène de l'acide et des bases, les silicates sont
- d'autant plus fusibles qu'ils renferment un plus grand nombre de bases.

On conçoit donc qu'avec des produits aussi complexes, où la nature et surtout le nombre des éléments ont une importance si grande, les classifications fondées sur le rapport du poids d'oxygène de l'acide à celui des bases n'ait pas donné de résultats bien nets, et qu'on ait été conduit à cesser de distinguer entre mono, sesqui, bi et trisilicates, pour diviser simplement les laitiers en deux catégories : les laitiers acides — tenant plus de 50 % de silice — et les laitiers basiques, qui en renferment moins de 40 %.

Les éléments principaux qui entrent dans la constitution des laitiers sont : la silice, l'alumine, la chaux et la magnésie. Jusqu'à une teneur de 17 %, l'alumine se comporte comme une base. Au-delà, elle joue le rôle d'un acide, et le laitier peut-être considéré comme un silico-aluminate. La chaux et la magnésie se substituent l'une à l'autre ; la présence de la magnésie est particulièrement avantageuse dans le cas de laitiers basiques, car on peut obtenir par l'emploi simultané de ces deux bases des laitiers aussi fusibles, et plus basiques, qu'avec la chaux seule : c'est ainsi que l'introduction de 10 % de magnésie dans un laitier permet d'abaisser la teneur en silice de 36 à 34 %. En cherchant à obtenir des laitiers plus basiques encore, on a été amené à

introduire une nouvelle base. La baryte s'est trouvée convenir parfaitement à ce but : le bisilicate de baryte, qui tient 28 % de silice, fond déjà à la température de cuisson de la porcelaine. Combinée à la chaux, à la magnésie et à l'alumine, la baryte donne des laitiers ultra-basiques qui fondent à la température des tuyères.

On a vu que la bonne marche d'un haut-fourneau dépend de la zone où commence la fusion de la gangue. D'autre part, la nature de la fonte produite varie avec la température de l'ouvrage. Dans les fourneaux au bois, où l'on peut fabriquer des fontes graphileuses à une température relativement peu élevée, à peine assez chaude pour les fontes blanches au coke, il n'est pas besoin de laitiers très réfractaires ; et l'on obtient un dosage convenable en ajoutant au minerai, comme fondant, de l'erbue, c'est-à-dire du sable, du quartz, ou de l'argile, de façon à produire des laitiers acides.

Suivant la nature de la fonte à produire, on emploiera des dosages plus ou moins réfractaires. Pour les fontes blanches, la teneur en silice des laitiers variera de 50 à 55 %, et celle en alumine, de 15 à 10 % ; la chaux et la magnésie représentant ensemble 30 %, les alcalis et les

oxydes métalliques, 5 %⁰. Pour les fontes graphitiques, la teneur en silice s'élève, et varie de 58 à 68 %⁰, et la teneur en alcalis et oxydes métalliques s'abaisse à 2 %⁰; la chaux, l'alumine, et la magnésie représentent ensemble 40 %⁰. Ces divers laitiers sont légèrement visqueux à la coulée : on les désigne sous le nom de laitiers filants, ou gras.

Dans les hauts-fourneaux au coke, les laitiers acides doivent être absolument proscrits : car la silice déplace le soufre des sulfures alcalins et terreux. Et la formule du traitement consistera à employer des dosages plus ou moins réfractaires, suivant la température à obtenir aux tuyères ; plus ou moins basiques, suivant le degré de réduction, de carburation et de désulfuration à atteindre. Ce seront toujours des silicates basiques, plus fluides et plus clairs à la coulée que les précédents, et qu'on désigne sous le nom de laitiers courts, ou secs.

La fabrication des fontes blanches exige des laitiers relativement fusibles, qui renferment en moyenne 37 à 41 %⁰ de silice, 8 à 18 %⁰ d'alumine, et retiennent en général 3 à 4 %⁰ d'oxydes métalliques : le reste se composant de chaux et de magnésie. Pour avoir des fontes blanches et

pures, il faudrait forcer la magnésie, et réduire la silice.

Les laitiers des fontes grises sont des silico-aluminates de chaux et de magnésie, d'autant plus riches en alumine qu'on veut avoir des fontes plus chaudes, d'autant plus riches en magnésie qu'on veut les avoir moins siliceuses, et plus pures. Leur composition varie en moyenne dans les limites suivantes : Silice, 37 à 40 % ; Alumine, 11 à 22 %. Les oxydes métalliques n'y entrent pas pour plus de 1 %.

Les fontes noires correspondent aux dosages les plus basiques. S'il s'agit de fontes de moulage, où la pureté vient en seconde ligne, on force la teneur en alumine, afin d'avoir un laitier réfractaire, tenant 36 à 39 % de silice, 10 à 23 % d'alumine, et on évite la magnésie. S'il s'agit au contraire de fontes d'affinage, où la pureté prend une importance prédominante, on compose le lit de fusion de minerais purs ; et on y ajoute de la magnésie de façon à obtenir, à fusibilité égale, des laitiers plus basiques que les précédents ; la teneur en alumine variant dans les mêmes limites, 10 à 24 %, la teneur en magnésie peut s'élever jusqu'à 10 % ; et la teneur en silice s'abaisse alors jusqu'à 34 %.

Les fondants, dans le cas de dosages basiques, portent le nom de *castine*. Ce sont en général des calcaires, qu'on cherche à obtenir aussi purs et dépourvus de silice que possible. La magnésie s'ajoute sous forme de dolomie, ou castine magnésienne, qui constitue un fondant excellent pour les fontes d'affinage, les spiegels et les fontes manganésées, mais qui donne une fusion trop prématurée dans les étalages pour la fonte n^o 1.

Chaque kilogramme de castine exige pour se décomposer en acide carbonique et chaux 424 calories. Il pouvait donc paraître logique d'employer comme fondant de la chaux vive : on pensait réaliser ainsi une économie sur le combustible, qu'on pouvait remplacer dans les fours à chaux par un combustible moins coûteux ; d'autre part, on espérait éviter dans le haut-fourneau le dégagement considérable d'acide carbonique qui limite l'effet réducteur du courant gazeux, et consomme, par sa transformation partielle en oxyde de carbone, un poids notable de coke.

Malheureusement, ces tentatives n'ont abouti qu'à des succès. Par le fait des incuits, la marche devenait irrégulière : d'autre part, il était difficile d'empêcher la chaux de fuser, en présence de l'humidité de la charge. Enfin le gueulard s'échauffait. Il paraît probable que la chaux

se carbonatait en présence du courant gazeux, dans la zone froide du haut-fourneau, pour se décomposer un peu plus bas. Loin de réaliser l'avantage désiré, on augmentait donc la consommation de combustible, par la nécessité où l'on se trouvait de fournir de l'acide carbonique en excès.

Le spath fluor, qui a comme fondant de nombreuses applications dans les opérations métallurgiques, ne peut guère s'employer au haut-fourneau. On a essayé de l'utiliser pour rendre fusibles certains laitiers ultra-basiques. Mais dès que la température du vent atteignait 600 ou 700° C., tout le fluor s'éliminait à l'état de fluorure de silicium, qui rendait incombustibles les gaz du gueulard, sans avantage pour les laitiers.

C'est donc en faisant varier les proportions d'erbue, ou de castine — calcaire ou dolomie — et exceptionnellement de barytine et de feldspath potassique, suivant la température du vent, la quantité soufflée, et la charge de coke, que l'on règle la marche d'un haut-fourneau. Tous les minerais ne conviennent d'ailleurs pas à toutes les allures. Les plus faciles à traiter sont les hématites, tenant environ 55 % de fer ; elles sont poreuses, et conviennent aux fabrications

les plus diverses. Faciles aussi sont les minerais à moins de 45 %, si l'on prend soin d'éviter une marche trop froide. Les minerais riches, à plus de 60 %, passaient autrefois pour difficiles, sans doute parce qu'on les soumettait à une allure trop lente. L'exemple des Américains a montré que ces minerais, riches, durs et compacts conviennent, sinon à la fabrication des fontes de moulage, du moins à la fabrication d'excellentes fontes d'affinage, avec une faible consommation de coke, à une allure suffisamment rapide.

La nature de la gangue a une importance capitale au point de vue du traitement. Les minerais à gangue fusible conviennent à la fabrication de la fonte blanche. Si on veut s'en servir pour fabriquer de la fonte grise, il faut ajouter au dosage de l'alumine, éviter les laitiers polybasiques. Au contraire, les minerais siliceux et alumineux exigeront des additions de bases multiples pour pouvoir donner de la fonte blanche. Si la silice y est finement disséminée, il sera difficile d'éviter que la fonte n'absorbe une forte proportion de silicium : de pareils minerais seront particulièrement recherchés pour la fabrication de fontes spéciales, fontes siliceuses ou silico-spiegels. Enfin les minerais phosphoreux conviennent pour la fabrication des fontes d'affi-

nage très froides, car ils donnent dans ces conditions des laitiers phosphoreux, où l'acide phosphorique augmente la fusibilité, surtout en présence d'oxydes métalliques.

Il n'a été question jusqu'à présent que des fontes ordinaires. La fabrication des fontes spéciales exige des laitiers de composition particulière.

Le manganèse a une forte tendance à se scoriifier : les laitiers acides se combinent au manganèse, dès qu'il est réduit à l'état de MnO , et la grande oxydabilité de ce métal le rend attaquable, même réduit et allié au fer. La fabrication des fontes manganésées exige donc des laitiers réfractaires et très basiques ; aussi convient-il d'ajouter au dosage, avec de la chaux, de la magnésie et de la baryte. L'alumine, en trop forte proportion, aurait l'inconvénient d'introduire du silicium dans la fonte. Mais les pertes de manganèse sont toujours considérables : il s'en perd près du tiers dans les laitiers, dans la fabrication des fontes les moins manganésées ; et les fumées en entraînent, à l'état de poussière, une proportion qui peut s'élever jusqu'à 10 % de la charge.

La fabrication des fontes spéciales est facile : il suffit d'avoir une marche parfaitement régu-

lière. Le laitier tient en moyenne 35 à 39 % de silice, 8 à 14 % d'alumine, et 4 % de MnO; le reste se composant de chaux et de magnésie.

Pour les spiegels, il faut un laitier plus réfractaire, tenant 33 à 36 % de silice, 8 à 13 % d'alumine. Avec des minerais moyennement riches en manganèse, on perd environ un tiers du métal dans le laitier, qui tient 8 à 10 % de MnO.

La fabrication des ferromanganèses riches fut réussie au haut-fourneau dès 1875, et devint régulière lorsqu'on eut substitué, au creuset réfractaire, un creuset en graphite capable de résister aux actions corrosives, et de n'introduire dans le laitier aucune substance qui ne fût pas prévue dans le dosage. Des minerais à 30 ou 35 % de manganèse conviennent bien à la fabrication des spiegels à 60-70 %. Mais pour atteindre des teneurs de 80 et 82 % d'une manière rationnelle, il faut des minerais à 40-45 %, afin de réduire les pertes en ne produisant pas plus de laitier que de fonte. Dans ces conditions, on obtient une utilisation du manganèse de 72 et 75 % en introduisant dans le laitier, ultra-réfractaire, un grand nombre de bases, et notamment de la baryte. L'usine de Terrenoire, qui la première réussit cette fabrication au haut-

fourneau, avait adopté pour la composition des dosages la formule suivante :

Chaux et magnésie = 2 fois silice.
Silice -- 2 fois baryte.

On obtenait ainsi des laitiers tenant : 28 % de silice, 40 % de chaux, 4 % de magnésie, 4 % de baryte, et 8 % de protoxyde de manganèse. La proportion de manganèse perdue dans le laitier n'atteignait pas 20 % ; le déchet complémentaire provenait des fumées. La consommation de coke atteignait 2 700 kilogrammes par tonne de fonte.

C'est également dans des creusets de graphite, avec des dosages ultra-basiques, qu'on réussit à fabriquer au haut-fourneau, d'une manière courante, les fontes au chrome et au tungstène. Le silico-spiegel peut se fabriquer dans les mêmes conditions, avec des laitiers basiques, moyennement riches en alumine, rendus plus fluides par la baryte ; la charge renfermant de la silice libre finement disséminée. Cette silice est réduite à raison de 60 à 70 % pour fournir le silicium du spiegel, qui peut s'obtenir couramment à 10-13 % de Si, et 20 % de Mn.

Nous ne parlerons que pour mémoire des fontes métis, obtenues en se servant comme combustible d'un mélange de coke et de charbon de bois. Ces tentatives ont donné, partout où on

les a essayées, de mauvais résultats. Pour se débarrasser du soufre renfermé dans les cendres du coke, il faut en effet rendre le dosage basique, comme s'il s'agissait du traitement au coke seul. Dès lors la consommation de combustible augmente et l'économie qu'on cherchait à réaliser par la substitution partielle du coke au charbon de bois disparaît.

La quantité de laitier produite par tonne de fonte est une caractéristique dont il était autrefois tenu grand compte. On admettait que le laitier agissait comme régulateur de l'allure, et qu'on ne pouvait marcher avec moins de 600 kilogrammes de laitier par tonne de fonte grise, ou 800 kilogrammes par tonne de fonte blanche. Cette idée a conduit certains maîtres de forges à ajouter au lit de fusion, dans le cas de minerais riches, des silicates tout formés, dans le but de produire la quantité de laitier nécessaire. C'est là une augmentation volontaire de la dépense de combustible qui ne paraît justifiée par aucune raison sérieuse. De nombreux exemples attestent qu'on peut obtenir d'excellentes marches, avec des productions de laitier extrêmement faibles, à condition de maintenir, par des soins apportés au chargement, au soufflage et au chauffage du vent, une régularité parfaite de l'allure.

DEUXIÈME PARTIE

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE V

LE HAUT-FOURNEAU ET SES ACCESSOIRES

On ne trouve plus guère aujourd'hui de hauts-fourneaux entourés, comme ils l'étaient autrefois, d'épais massifs de maçonnerie. La nécessité de refroidir le garnissage réfractaire des étalages et du creuset, afin de les conserver, a conduit à en dégager les abords ; de sorte qu'après avoir progressivement élargi les embrasures du massif, et ménagé des vides entre le creuset et son enveloppe, on en est venu à supprimer les piliers de cœur, et à les remplacer par des colonnes de fonte, ou des flasques en tôle, qui supportent la cuve par l'intermédiaire de marâtres.

Les dilatations causées par la chaleur produisent dans la maçonnerie des hauts-fourneaux des poussées irrésistibles. Les piliers, au milieu desquels on noyait autrefois la chemise réfractaire, ne pouvaient les supporter, et se fissaient. On a reconnu que le meilleur moyen de parer à cet inconvénient consiste à former le haut-fourneau de parties indépendantes, capables de jouer les unes par rapport aux autres, et à donner aux surfaces extérieures des formes cylindriques, ou coniques, frettées de cercles métalliques, dont la raideur est diminuée par des rondelles de plomb.

Construction de la cuve. — La maçonnerie de la cuve se compose en général d'une double enveloppe : à l'intérieur, une chemise réfractaire ; à l'extérieur, séparée de la première par un intervalle d'environ 10 centimètres, rempli de coke, ou de débris de briques, est une contrechemise en briques ordinaires, qui supporte la plate-forme du gueulard. Cette enveloppe extérieure est maintenue par des frettes horizontales, auxquelles on adjoint parfois des fers placés suivant les génératrices, de façon à constituer le frettage dit *en crinoline*. Souvent même la cuve est complètement blindée en

tôle. Il faut alors laisser entre la maçonnerie et le blindage un espace considérable rempli de débris de briques. La contre-chemise fait parfois défaut, et les consoles de la plate-forme sont supportées par une cuve en tôles rivées de 10 à 15 millimètres d'épaisseur, qui se trouve séparée de la chemise réfractaire par un intervalle plus ou moins considérable, qu'on a même porté à 0^m,80, de façon à constituer un matelas d'air isolant. On a aussi employé des hauts-fourneaux à chemise nue (type Buttgenbach), qui ont le grand avantage de permettre les réparations en cours de marche, et de se prêter à une surveillance constante des conditions de la fabrication ; mais ils ont l'inconvénient de permettre aux influences climatiques de se faire sentir sur l'allure des appareils : et cela particulièrement dans les pays à vents dominants. Aussi la plupart des fourneaux, en Angleterre et aux États-Unis, ont-ils la cuve blindée en tôle.

La cuve — maçonnerie et blindage — repose sur des marâtres en fonte, qui sont supportées, directement ou par l'intermédiaire de fers à double T, par des colonnes ou des flasques (*fig. 1*). Contre la cuve viennent s'appuyer les étales, dont la maçonnerie réfractaire

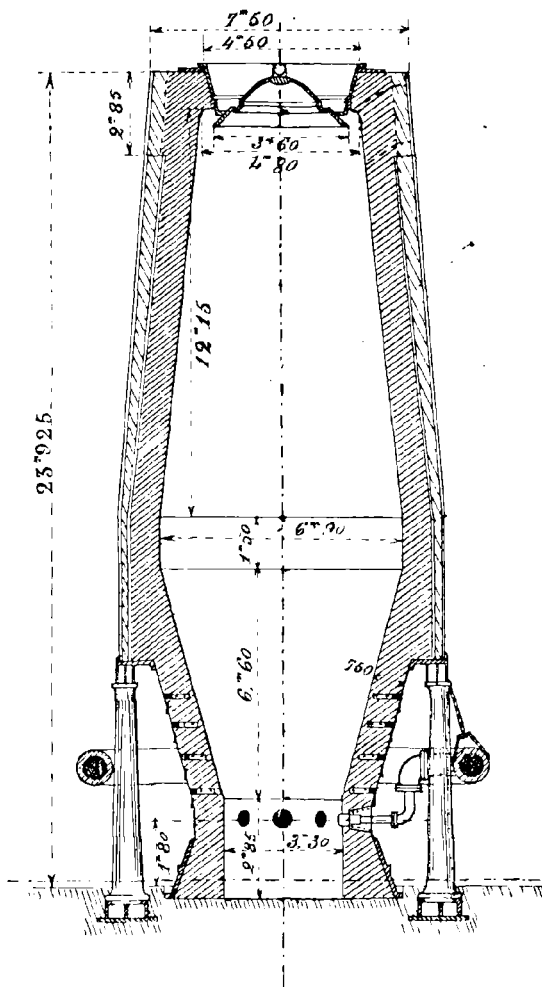


Fig. 1. — Fourneau d'Edgar Thomson (Etats-Unis).

est soutenue par un frellage énergique, rarement par un blindage complet. Les étalages et le creuset sont sur toute leur hauteur absolument dégagés. Le raccordement des étalages et de la cuve se faisait autrefois en biseau. Pour éviter les angles, qui sont toujours des points faibles, on emploie aujourd'hui des dispositifs analogues à celui que représente la *fig. 2*, où se trouve ménagé, en vue de permettre les dilatations, un jeu de quelques centimètres. A la mise en feu, il faut compter que les briques gonflent de 8 à 10 milli-

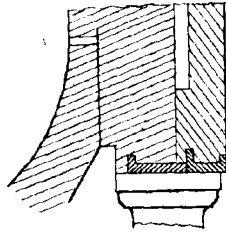


Fig. 2.

Raccordement des étalages.

mètres par mètre, et même de 12 millimètres dans les parties les plus chaudes.

L'épaisseur totale de la paroi, au ventre, est généralement comprise entre 1 mètre et 1^m,30, dont 0^m,60 à 0^m,70 pour la chemise réfractaire.

La maçonnerie doit être faite avec le plus grand soin, et on ne doit y employer que des matériaux de choix. Au gueulard, il faut proscrire absolument les briques ferrugineuses : car elles éclatent sous l'influence de l'oxyde de carbone. D'autre part, les briques doivent être dures,

de façon à résister à l'usure mécanique. Mais il faut aussi qu'elles résistent aux actions chimiques, à celle des oxydes métalliques notamment, et qu'elles soient très réfractaires. On emploie donc de préférence des briques alumineuses, spécialement dans les parties du haut-fourneau où les oxydes ne sont pas entièrement réduits.

On trouve un grand avantage, au point de vue de la conservation de la cuve, à la blinder intérieurement en tôle sur quelques mètres. Mais ceci n'est possible que si l'on marche à gueulard froid.

L'appareillage des briques était autrefois considéré comme une question des plus importantes : le fourneau était construit en briques de grosses dimensions, constituant des voussoirs dont l'épure était soigneusement faite à l'avance ; les briques étaient confectionnées exactement sur ces dessins, ou bien on leur donnait à la presse, au moment de les employer, la forme définitive. En tous cas, on exigeait un dressage parfait. On est aujourd'hui revenu de ces pratiques coûteuses. L'emploi de petits matériaux, et de joints moins soignés, recommandé par plusieurs métallurgistes, notamment par M. de Vathaire, paraît avoir donné de bons résultats,

Le creuset et les étalages. — Il reste pourtant une région où l'appareillage mérite la plus grande attention : c'est le fond du creuset, que les infiltrations de fonte et, dans certains cas, de plomb fondu, tendent à soulever et à détruire graduellement. Pour éviter ce grave inconvénient, on a appliqué avec succès divers dispositifs : briques disposées en vousoirs renversés, ou bien en queue d'aronde, de manière à produire un solide arc-boutement. On a également construit les soles à joints horizontaux croisés : par ce moyen, quelle que soit l'usure de la sole, aucune brique ne peut se soulever, chacune d'elles étant prise entre les briques voisines plus profondément enfoncées.

La maçonnerie réfractaire qui compose le fond du creuset, et dont l'épaisseur est en général voisine de 1^m,50, est séparée par un lit de matières meubles : sable, laitiers, déchets, etc., des fondations du haut-fourneau, qui reposent sur un lit solide de béton ou de grès. Parfois on ménage à leur partie supérieure, dans la maçonnerie, un réseau de canaux rectangulaires pour la circulation de l'air. Ce dispositif, assez fréquemment employé autrefois, est aujourd'hui abandonné : le refroidissement ainsi obtenu était insignifiant.

La profondeur du creuset, d'où dépend la fréquence des coulées, n'est pas une dimension arbitraire. Avec les diamètres usités en France, la surface de refroidissement est grande par rapport à la section, et on ne peut dépasser des profondeurs de creuset de 1^m,50 sans s'exposer à voir la sole se prendre. En Amérique, avec des diamètres de 3^m,30, on n'hésite pas à dépasser 2 mètres, et 4 coulées, effectuées à six heures d'intervalle, suffisent pour une production journalière de 300 tonnes. Cette profondeur est comptée de l'axe des tuyères au fond du creuset, où se trouve le trou de coulée.

Les tuyères sont des troncs de cône à double enveloppe et à circulation d'eau, établies à l'intérieur d'embrasures ménagées dans la maçonnerie du creuset, et garnies de cadres en fonte à circulation d'eau. Elles servent à recevoir et à protéger les busillons, ajutages qui terminent les conduits de vent chaud. On a construit des tuyères en tôle et en fonte. Le bronze, qui n'adhère pas à la fonte liquide, a donné de meilleurs résultats. Le cuivre rouge a le même avantage, et il est plus régulier de composition; aussi préfère-t-on généralement les tuyères obtenues par l'emboutissage de viroles en cuivre évidées en leur milieu (*fig.* 3). Expo-

sées à l'action corrosive des laitiers, ces tuyères ne résistent que grâce à une circulation d'eau qui, pour être efficace, doit être active et complète : l'eau fraîche débouchant du tuyau de conduite le plus près possible du museau ; l'évacuation devant se faire par le point le plus haut, afin que les bulles d'air ou de vapeur ne

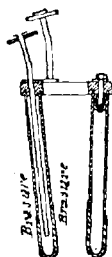


Fig. 3.
Tuyère en cuivre.

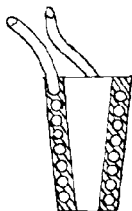


Fig. 4.
Tuyère en fonte.

puissent séjourner contre les parois. On obtient aussi de bons résultats en constituant les tuyères de serpentins en fer, noyés dans de la fonte (*fig. 4*).

Les tuyères doivent avoir leurs axes rigoureusement horizontaux, et disposés sur le même niveau. A 30 ou 50 centimètres au-dessous de ce niveau se trouve le trou de coulée des laitiers, qu'on doit ménager, pour éviter les corrosions de la maçonnerie, dans un bloc métallique à

circulation d'eau, pénétrant jusqu'à la paroi intérieure du haut-fourneau. M. Luermann a proposé pour cet usage une tuyère en bronze, à circulation d'eau, fixée dans une caisse en fonte refroidie par un serpentin noyé dans sa masse, maintenue elle-même, par un bourrage en terre réfractaire, à l'intérieur d'une embrasure garnie d'un cadre en fonte avec serpentin (*fig. 5*).

Le creuset et les étalages constituent la partie la plus délicate du haut-fourneau. On a vu de

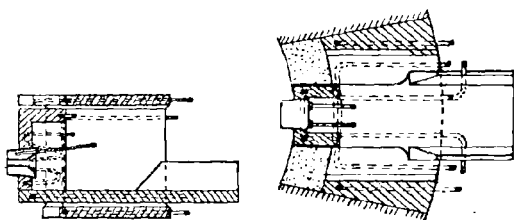


Fig. 5. — Tuyère Luermann.

quelle importance était, au point de vue de la marche de l'appareil, la conservation du profil. A un autre point de vue, un percage peut occasionner un désastre. Il est relativement facile de maintenir la maçonnerie, et de résister aux poussées considérables qui s'exercent durant la marche : on y parvient par un système convenable de frettes. Mais comment parer aux corrosions produites par les laitiers ferreux ou man-

ganésés, qui rongent les étalages et les parois du creuset, et les réduisent à une épaisseur trop faible pour résister à la charge qu'ils supportent, et qui affouillent la sole au point de compromettre les fondations du haut-fourneau ?

Les briques réfractaires, siliceuses, ou silico-alumineuses, ne peuvent résister à ces actions corrosives. Seuls, les garnissages qui se forment contre les parois, en se substituant progressivement à la brique, sont capables de les protéger. Ces dépôts se composent de matières charbonneuses, et tiennent en moyenne 25 à 45 % de carbone, 20 % de chaux et autant de silice, avec de l'alumine et de la magnésie ; ils se forment naturellement en allure chaude et extra-calcaire ; mais survienne un laitier moins basique : le garnissage disparaît, et la paroi se ronge.

Pour favoriser la formation des garnissages, pour arrêter les progrès des corrosions, un moyen s'imposait : l'arrosage. Les moyens de refroidissement se sont notablement perfectionnés dans ces dernières années : autour de la maçonnerie, une rigole, profonde de 0^m,50 à 0^m,60 au-dessous du fond du creuset, toujours pleine d'eau, empêchait la sole de s'affouiller. Le long des étalages, on faisait ruisseler de l'eau froide. Ces moyens étaient suffisants pour les fourneaux marchant

en moulage ; pour d'autres marches, il a fallu perfectionner le refroidissement des parois, afin d'augmenter l'épaisseur d'équilibre qui résulte

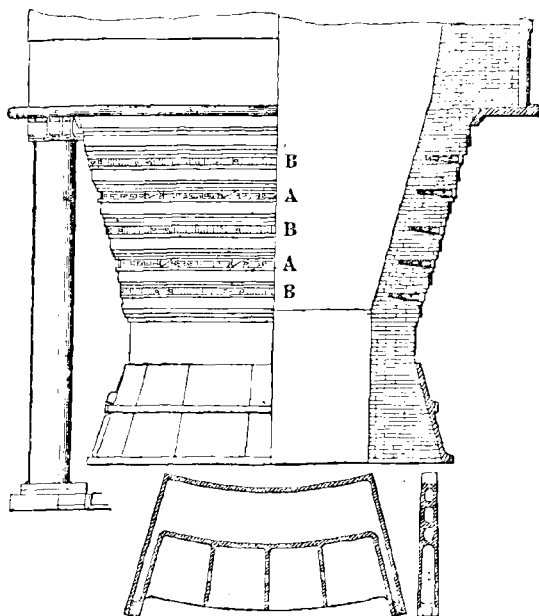


Fig. 6. — Refroidisseurs des fourneaux américains.

de la double action de l'eau froide et du laitier. Et l'on est arrivé en Amérique à loger dans la paroi des étalages cinq ou six rangées de refroidisseurs en fonte à circulation d'eau, et à entou-

rer la paroi du creuset d'un blindage composé de plaques formées de serpentins noyés dans de la fonte (*fig. 6*).

Ces moyens ne sont encore que des palliatifs : entre les refroidisseurs, les parois se corrodent ; et il en résulte, pour le profil, une irrégularité fâcheuse. D'autre part, lorsqu'il s'agit de fontes spéciales, l'introduction, par suite des corrosions, de matières non prévues dans le dosage peut déranger la marche. Pour obvier à cet inconvénient, on a cherché à constituer dès la construction du haut-fourneau le revêtement charbonneux qui seul résiste à l'action du bain en fusion : L'emploi des briques de graphite, inauguré à Terrenoire, a été appliqué avec succès à la Voulte, à Bes-sèges, à Tamaris, et aux États-Unis, où M. Gayley en préconise l'emploi pour le creuset et même pour les étalages. Les briques se composent de graphite et d'argile, ou bien de coke mélangé d'argile ou de goudron. Pour les lier on se sert d'un mélange d'argile et de poussier de coke. Combiné avec un bon refroidissement, l'emploi de ces matériaux neutres avec des laitiers non ferreux donne des résultats excellents (*fig. 7*).

On a réussi en France à tourner la difficulté par un autre moyen, applicable aux laitiers noirs comme à ceux des allures les plus chaudes.

L'inconvénient de la maçonnerie est sa faible conductibilité, de sorte qu'à moins d'employer

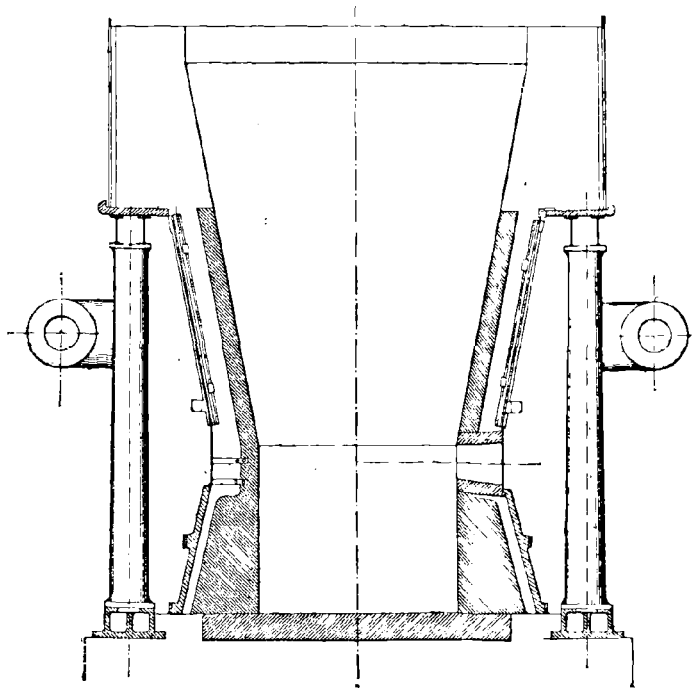


Fig. 7. — Crenset et étalages en graphite (Les parties hachurées représentent le graphite, et les parties non hachurées, la maçonnerie réfractaire).

les refroidisseurs compliqués et coûteux des fourneaux américains, l'épaisseur d'équilibre est

faible dès qu'on a affaire à des laitiers corrosifs. On a songé à tirer parti de la conductibilité des métaux, et on a constitué le creuset d'une paroi métallique d'environ 15 centimètres d'épaisseur. Suffisamment solide pour résister aux charges qu'elle a à supporter, cette paroi est assez con-

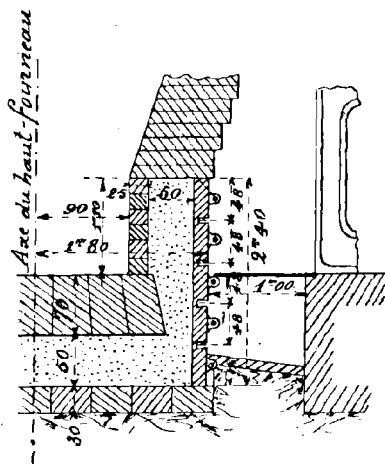


Fig. 8. — Creuset en acier (A l'intérieur de la paroi métallique est un revêtement en matériaux réfractaires, nécessaire pour la mise en feu).

ductible pour qu'un arrosage énergique assure la formation d'une épaisseur suffisante de garnissages. Tel est le dispositif employé à Denain, à Chasse, à Firminy. Dans les deux premières

usines, on se servait de petites briques en acier, de la grosseur des briques ordinaires. Les joints s'étant montrés faibles, on en a perfectionné la confection à Firminy, en même temps qu'on augmentait la dimension des voussoirs, constitués de blocs de 50 à 60 kilog. d'acier moulé et recuit. On a ainsi réussi à obtenir une marche excellente et régulière dans un fourneau où les corrosions constituaient un danger permanent (*fig. 8*).

Le frettage, dont il a été dit un mot plus haut, a, au point de vue de la résistance aux poussées, et par conséquent de la conservation du profil, une influence capitale. Le cadre de cet Aide-Mémoire ne nous permet pas d'insister sur ces points, malgré l'importance de certains détails des dispositifs employés. Le frettage a d'ailleurs besoin d'être complété par un soutènement latéral. On a trouvé un grand avantage dans certaines usines à supporter les étalages, soit par des consoles venues de fonte avec les colonnes ou les plaques qui supportent la cuve, soit par un blindage en tôle suspendu aux marâtres.

Appareils de chargement. — Pour réaliser une descente régulière des charges, et une bonne circulation des gaz, conditions essentielles d'une marche satisfaisante, il faut opérer au gueulard

un chargement rationnel des matériaux constitutifs du lit de fusion.

Dans la descente des charges il se produit en effet un classement des matières : grâce à son poids le minerai déplace le coke, et le chasse vers les parois, tandis que la mine descend à peu près verticalement. Or, les gaz ont une tendance naturelle à suivre les parois, où ils trouvent une zone de moindre résistance, et à laisser intacte la partie centrale. Cet inconvénient prend une réelle gravité si c'est au centre que se trouve la substance à réduire, et à la périphérie le combustible. Il faut donc y remédier en opérant au moment du chargement un classement inverse.

D'autre part, les différentes substances ne descendent pas avec la même vitesse. Grâce à l'influence des parois, il se produit un retard à la périphérie ; de sorte que les couches successives chargées horizontalement prennent en descendant la forme de cônes renversés. Et ce phénomène s'accroît à mesure que le diamètre du fourneau augmente par rapport à celui du creuset. Mais à cause du poids des gros morceaux de minerai, qui déplacent le coke, et de la finesse des menus, qui tamisent, la mine descend plus vite que le combustible : ce qui produit, outre le classement horizontal, un classement dans le

sens vertical : les charges arrivant dans la partie inférieure du fourneau, alternativement trop riches et trop pauvres en coke.

Pour remédier au premier de ces deux inconvénients, il faut charger le minerai à la périphérie, et le coke au centre. Pour remédier au second, c'est-à-dire pour éviter que deux couches successives de minerai ne se rejoignent à travers le coke, en formant une colonne continue, il faut opérer par charges considérables, et cela d'autant plus que le fourneau est plus grand : les fourneaux de Meurthe-et-Moselle, produisant 100 tonnes de fonte par jour, reçoivent des charges composées de 5000 à 5500 kilogrammes de minerai, et 1800 à 2200 kilogrammes de coke. La charge en coke des grands fourneaux américains ne pèse pas moins de 4500 kilogrammes.

La plupart des hauts-fourneaux modernes ont le gueulard fermé, et muni d'appareils de prise de gaz : à moins de se trouver dans des pays où le combustible est extrêmement peu coûteux, il y a avantage à tirer parti de ces gaz, riches en oxyde de carbone, pour chauffer le vent, et pour produire de la vapeur.

On construit pourtant encore, notamment en Angleterre et en Belgique, des hauts-fourneaux

à gueulard ouvert. Le chargement y est facile : il suffit de verser les charges successives de minerai et de coke auprès des parois. Le talus d'éboulement du coke est, dans ces conditions, moins raide que celui du minerai : le coke a tendance à rouler sur le minerai et à se concentrer au fond de l'entonnoir, c'est-à-dire vers le centre du fourneau. Quant au mode de chargement, il varie suivant le diamètre du gueulard : Il se fait au panier, ou à la brouette pour les appareils de faible dimension, au wagon pour les grands fourneaux. Lorsque le diamètre est compris entre 1 mètre 50 et 2 mètres 50, il peut être commode d'employer des wagons circulaires, à fond conique, et dont la paroi se soulève pour laisser tomber la charge contre les parois.

Mais la plupart du temps le gueulard est fermé ; l'appareil de fermeture et de chargement le plus fréquemment employé est désigné sous le nom de *cup and cone*. Une trémie en fonte, posée sur la paroi du gueulard, est fermée par un cône en tôle, avec rebord inférieur en fonte. Lorsque ce cône s'abaisse, la charge qu'on a accumulée dans la trémie se déverse dans le fourneau, les morceaux décrivant des paraboles tangentes à l'origine aux génératrices du cône. Suivant l'inclinaison de ces génératrices, et la dis-

tance du bord du cône aux parois, la charge tombe plus ou moins loin du centre. Ces éléments sont invariables pour un fourneau ; mais il reste deux éléments qu'on peut faire varier pour modifier la répartition des matières : en augmentant ou en réduisant l'intervalle entre deux opérations successives, on fait varier la

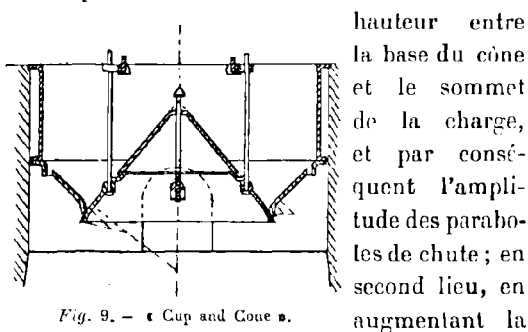


Fig. 9. - « Cup and Cone ».

hauteur entre la base du cône et le sommet de la charge, et par conséquent l'amplitude des paraboles de chute ; en second lieu, en augmentant la levée du cône, on rend plus épaisse la nappe de minerai ou de coke, qui tend alors à se répartir sur une zone plus large, et par conséquent à se rapprocher des parois.

En pratique, le cône a des génératrices inclinées de 40 à 45°. La distance de sa base aux parois de la cuve ne dépasse pas 0^m,50. Sa course varie aux environs de 0^m,50 (*fig. 9*).

Lorsque le gueulard est ouvert, il importe que la prise de gaz se fasse exactement au centre : les

prises latérales auraient pour effet d'accentuer la tendance qu'ont les gaz à suivre les parois. D'autre part, cette prise doit se faire à une certaine profondeur — au moins 2 mètres — du gueulard, afin que la résistance opposée par cette hauteur de charge soit suffisante pour empêcher les fuites par la surface libre. Parfois on complète la prise centrale par des prises latérales. Tel est le principe de la trémie annulaire, employée en Belgique, et dans la région de Longwy, en France.

Lorsque le gueulard est fermé, il n'y a pas grand intérêt à établir une prise centrale : que la conduite débouche au centre ou sur les côtés de l'espace vide compris entre la charge et l'appareil de fermeture, la pression étant sensiblement la même sur toute la surface de la charge, la répartition des gaz à l'intérieur du fourneau ne s'en trouve pas modifiée. La plupart des fourneaux sont aujourd'hui munis du *cup and cone* avec prise latérale.

D'autres types de fermeture ont été proposés et appliqués, sans que leur emploi se soit beaucoup généralisé : nous citerons l'appareil Hoff, dérivant du *cup and cone*, avec prise centrale ; et l'appareil Langen, où le cône est remplacé par une cloche placée au-dessus de la trémie ; celle-

ci doit donc avoir des parois très raides, si l'on veut réaliser un chargement méthodique.

Lorsqu'il s'agit de minerais menus, on s'attache à réaliser un chargement uniforme : les

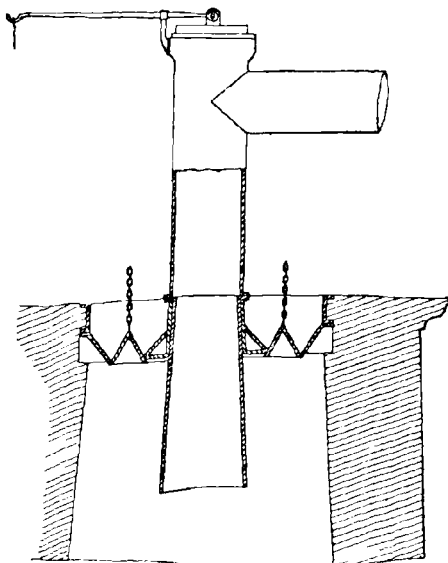


Fig. 10 — Appareil Coingt.

menus, qui tamisent entre les morceaux de coke, ont une tendance à descendre verticalement ; leur localisation, aux parois ou au creuset, arrêterait la circulation des gaz. Pour opérer un

chargement uniforme, on peut avec avantage se servir des appareils à double chargement, et notamment de l'appareil Coingt (*fig. 10*), qui se compose d'une trémie extérieure, et d'un cône intérieur fixe, avec prise de gaz centrale, entre lesquels se trouve un espace annulaire obturé par une sorte de tore à section triangulaire. Cet appareil a rendu de grands services, notamment en Amérique pour l'emploi de menus provenant de la concentration magnétique.

Nous n'insisterons pas sur les divers modes de commande de ces appareils. Le meilleur système paraît être celui qui se compose d'un piston, hydraulique ou à vapeur, placé vers le bas du fourneau, à portée du chef fondeur. La transmission au gueulard se fait simplement, par tiges rigides. Il y a un grand avantage à ce que la commande du chargement ne soit pas laissée à des manœuvres.

Appareils à air chaud. — Les gaz ainsi recueillis renferment 25 à 30 % d'oxyde de carbone. On utilise en partie la chaleur dégagée par leur combustion à chauffer le vent destiné aux tuyères.

Les premiers appareils à vent chaud se composaient d'une canalisation en fonte, disposée à

l'intérieur d'une enceinte en maçonnerie, où brûlaient les gaz. Le principal inconvénient de ces appareils provient de la nature même de la fonte, qui ne supporte pas des températures supérieures à 400 ou 500° C. D'autre part, leur construction est compliquée ; il faut, pour parer aux inconvénients dus aux dilatations du métal, prendre un soin tout particulier des coudes et des joints, les placer, si possible, en dehors de l'enceinte chauffée. Les frais d'entretien sont toujours élevés.

La surface de chauffe, proportionnelle au volume du vent, croît rapidement avec la température à atteindre. Elle est au minimum de 1 mètre carré par mètre cube de vent à chauffer par minute pour 300° de température finale, et s'élève au triple lorsque la température est de 400° C. D'autre part, la vitesse ne doit pas être trop forte, si on veut éviter les pertes de charge, ni les sections trop larges, si on veut bien utiliser la surface de chauffe : en pratique, on ne dépasse pas, pour le vent froid, une vitesse de 6 à 7 mètres par seconde.

Les divers appareils employés se rattachent à quatre types : les appareils à serpentins ou tuyaux horizontaux, dont les meilleurs, pour 150 mètres carrés de surface de chauffe, don-

naient par minute 90 mètres cubes d'air à 300° C., avec une perte de charge de 1 centimètre de mercure ; les appareils à siphons droits, avec leurs variantes de bottes à pied, et les appareils à tuyaux suspendus. Dans tous, on cherche à réaliser une circulation méthodique, les produits de la combustion cheminant en sens inverse de l'air.

Mais ces appareils ne conviennent pas à la production intensive des hauts-fourneaux modernes, qui consomment, par minute, pour une production de 100 tonnes par 24 heures, plus de 350 kilogrammes de vent chauffé à 600 ou 800° C. On a donc renoncé aux systèmes de chauffage fondés sur la transmission à travers des parois métalliques, pour appliquer le procédé, imaginé par Siemens, de la régénération de la chaleur. Les appareils modernes se composent de vastes enceintes en briques réfractaires, où circulent à tour de rôle, marchant en sens inverse, les gaz, qui brûlent en échauffant les parois, puis l'air qui s'échauffe au contact des briques.

Ces appareils se rattachent à deux types principaux : le type Whitwell (*fig. 11*) où la cuve cylindrique qui constitue le régénérateur est partagée par des cloisons parallèles en une série de chambres, larges d'environ 0^m,30, cons-

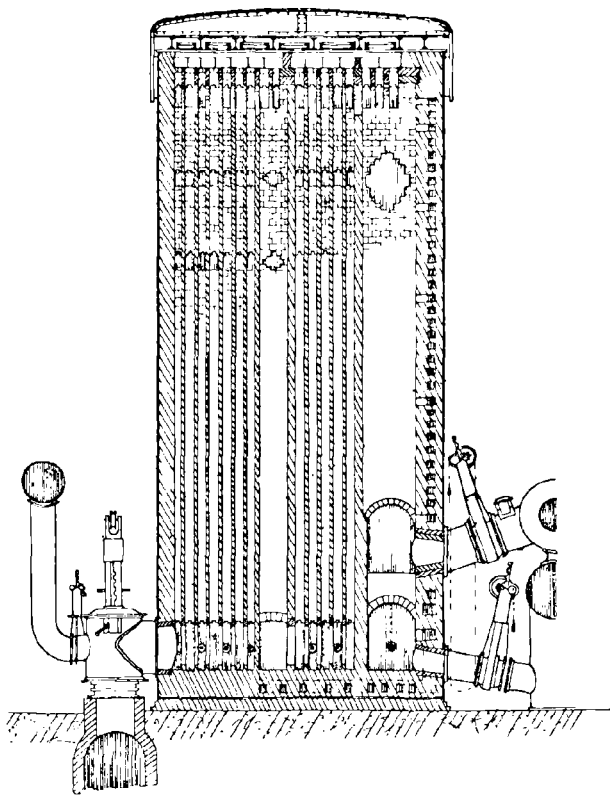


Fig. 11. — Appareil Whitwell.

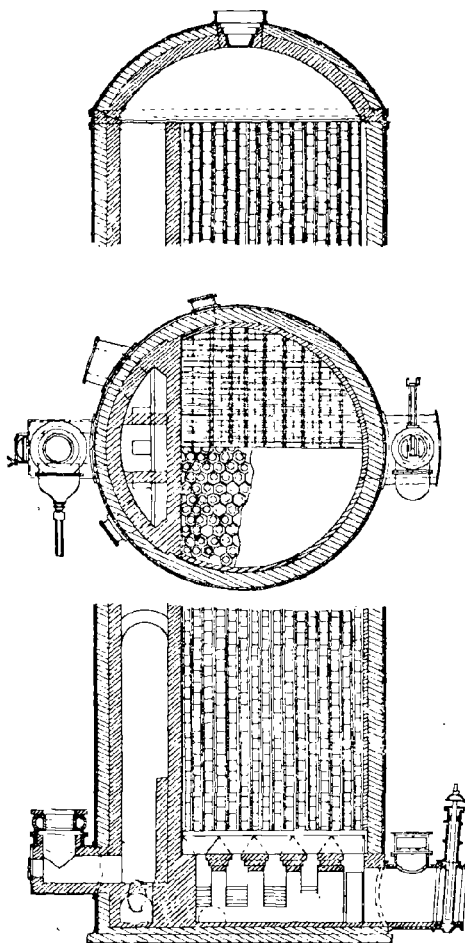


Fig. 12. — Appareil Cowper.

tituant pour le courant gazeux un circuit sinuieux unique ; et le type Cowper (*fig.* 12), où les gaz, après avoir brûlé dans une chambre de combustion cylindrique ayant la hauteur de la cuve, redescendent au niveau inférieur à travers des empilages qui occupent le reste de la section, constituant un circuit multiple, rectiligne, et peu résistant ; les carnaux sont à section carrée, ou circulaire, suivant qu'ils sont constitués de briques ordinaires, ou de briques spéciales.

Ces appareils se prêtent à de fortes productions. Ils ont, en général, 6 à 7 mètres de diamètre, et 20 mètres de hauteur. Leur section utile, gaine déduite, est de 15 à 20 mètres carrés, et on compte qu'ils peuvent chauffer 200 à 300 mètres cubes par minute, à des températures comprises entre 600 et 800° C. Le volume des briques est sensiblement égal à la moitié du volume utile de l'appareil. Ces appareils renferment donc 1 tonne de briques par mètre cube de volume utile, ce qui correspond, pour 1 tonne de briques employées, au chauffage de 1 mètre cube d'air par minute. La chaleur spécifique des briques étant voisine de celle de l'air, on voit que, pour limiter à 50° C. les écarts de température, il faut, dans les conditions moyennes pré-

cédemment indiquées, opérer un renversement par heure.

Les appareils Cowper présentent sur les Whitwell l'avantage de renfermer un poids de briques beaucoup plus considérable, et de présenter une surface de chauffe plus grande par rapport au volume de vide. D'autre part, la vitesse y est beaucoup moindre et ne dépasse guère $0^m,50$ par seconde. La résistance du circuit est donc faible. Le seul inconvénient résulte de l'encrassement rapide des empilages par les poussières entraînées, qui exige des réparations fréquentes. Mais cet inconvénient est compensé par un effet utile beaucoup plus considérable. On a d'ailleurs modifié récemment la disposition des appareils Whitwell, de façon à diminuer le nombre des circuits, en augmentant la largeur des chambres, constituées chacune par des empilages (*fig. 13*).

Les hauts-fourneaux modernes comportent, en général, trois Cowper. Les fourneaux américains en ont quatre. La manœuvre de ces appareils exige certaines précautions. Il faut, au moment des renversements, n'introduire le vent froid qu'après avoir fermé le gaz, et avoir purgé l'appareil en laissant les brûleurs ouverts pendant un certain temps. Pour la manœuvre in-

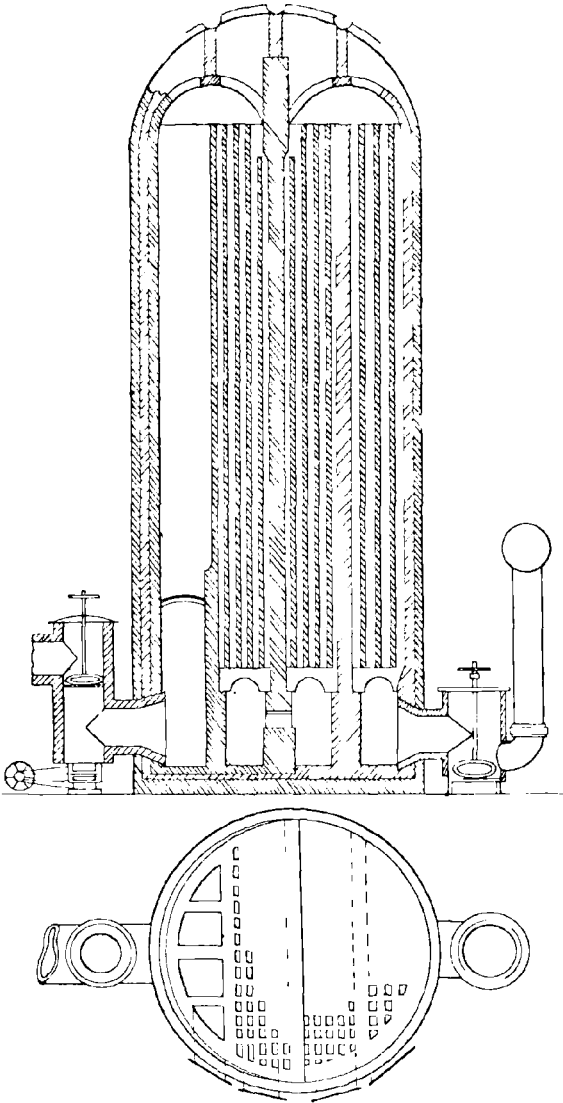


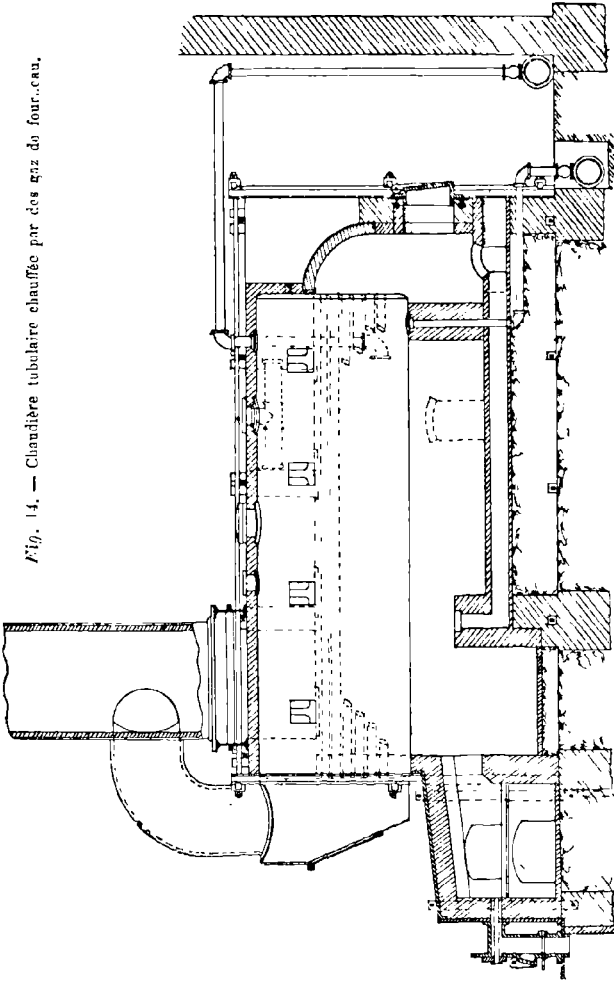
Fig 13. — Appareil Whitwell modifié.

verse, il faut d'abord fermer la valve à vent chaud, puis celle à vent froid, ouvrir ensuite les brûleurs, puis successivement la cheminée, la valve et le registre à gaz.

Chaudières. — Les gaz exigent pour brûler 60 à 70 % de leur poids d'air. Le poids des produits de la combustion est donc environ le double du poids de vent à chauffer. Il suffira donc d'utiliser à la production du vent chaud une proportion comprise entre la moitié et les deux tiers des gaz du gueulard. Le reste est brûlé aux chaudières.

Ces appareils n'offrent pas de grandes particularités. L'abondance des poussières entraînées par les gaz a souvent fait proscrire l'emploi des chaudières tubulaires. On a cependant tiré un excellent parti de ce dispositif, avec des tubes suffisamment gros et courts (*fig. 14*). Dans ces chaudières, où on n'emploie pas de combustible solide, et où, par conséquent, on n'a pas à utiliser le rayonnement d'une masse incandescente, il n'y a aucun intérêt à développer la surface de chauffe directe; ce qu'il faut éviter, c'est la combustion incomplète. Il est donc tout indiqué de faire déboucher les brûleurs dans une chambre de combustion placée en avant de la

Fig. 14. — Chaudière tubulaire chauffée par des gaz de fourneau.



chaudière, et d'où les gaz ne s'échappent qu'entièrement brûlés (*fig. 14*).

L'emploi du vent chaud, pour assurer la combustion complète de ces gaz relativement pauvres, est très avantageux. Dans diverses usines d'Allemagne, cette pratique a donné d'excellents résultats économiques.

Canalisations de gaz et de vent chaud. —

Les conduites de gaz se font en tôle de 5 millimètres d'épaisseur environ. Leur section se détermine par la condition que la vitesse ne doit pas y dépasser 10 mètres. Or on peut compter sur un volume de 6 mètres cubes environ par kilogramme de fonte produite.

Ces conduites sont munies de clapets de sûreté, libres de se soulever aisément s'il se produit des explosions : ces accidents ne sont malheureusement pas rares ; ils pourraient devenir graves si les parois offraient une trop grande résistance. C'est pourquoi aussi la trémie du *cup and cone* est simplement posée sur la maçonnerie du gueulard et non scellée ; et le cône lui-même est généralement composé de deux parties, capables d'un certain déplacement relatif.

Les gaz entraînent un poids notable de pous-

sieres, composées en grande partie de chaux et de manganèse. Afin d'éviter l'encrassement des appareils à air chaud et des chaudières, on interpose sur la conduite des gaz des chambres de dépôt, parfois aussi des laveurs. Mais pour être efficaces, les chambres de dépôt doivent être vastes. On obtient de bons résultats avec des cylindres verticaux en tôle, de 6 mètres de hauteur et 5^m,40 de diamètre, terminés à chaque extrémité par des cônes de 90° d'ouverture : c'est le type de South Chicago. Par le sommet pénètre la colonne de prise de gaz ; au bas est une trappe, par où l'on charge les poussières déposées ; les gaz s'échappent par des ouvertures latérales.

Les conduites de vent chaud doivent être installées avec un soin spécial : elles sont garnies à l'intérieur de briques réfractaires ; des joints suffisamment nombreux permettent de racheter les effets des contractions et des dilatations successives. La conduite générale est en communication avec une conduite circulaire, établie autour des étalages de chaque fourneau, supportée par des consoles fixées aux supports de la cuve. De cette conduite partent les porte-vent, tuyaux coudés réunis par un joint télescopique au tuyau horizontal qui se rend à la tuyère. Au coude du porte-vent est un regard muni d'un verre bleu.

Des ajutages permettent d'y visser un manomètre, et d'y introduire les pyromètres, ou couples thermo-électriques, nécessaires pour la mesure des températures.

Sur ces conduites sont établies, au gueulard, et auprès des appareils à air chaud et des chaudières, des vannes et des registres. Sur les conduites de gaz et d'air froid, les vannes sont généralement de simples cloches en fonte, rodées sur leurs sièges, sauf au voisinage du gueulard, où on préfère des obturateurs à bords arrondis. Sur les canalisations de vent chaud, on fait usage d'obturateurs refroidis par une circulation d'eau.

Soufflerie. — La soufflerie est le principal accessoire d'une installation de hauts-fourneaux. Elle doit être largement calculée, de façon à pouvoir fournir, le cas échéant, un volume notablement supérieur au débit normal ; le moteur, à détente, doit se prêter à des variations de travail correspondant aux variations de la pression du vent. Les conduites d'air comprimé doivent être disposées de manière à assurer, en temps normal, l'indépendance des fourneaux, mais de permettre aussi d'alimenter chaque appareil, en cas d'avarie, par les souffleries des fourneaux voisins.

On a vu, au Chap. II, comment on peut calculer le volume de vent nécessaire à la marche d'un haut-fourneau. En pratique, on admet qu'à la consommation d'une tonne de coke par 24 heures, correspondent 3 mètres cubes de vent par minute : à une production de 100 tonnes de fonte correspond un volume de 250 à 300 mètres de vent soufflé par minute. Les hauts-fourneaux américains consomment 600 à 700 mètres cubes pour 300 tonnes.

Les machines soufflantes sont donc de puissants appareils : d'autant que, si l'on veut appliquer le principe américain du réglage au nombre de tours, et non à la pression aux tuyères, il faut prévoir des pressions élevées — une demi-atmosphère, dans les cas ordinaires — une atmosphère si l'on emploie principalement des menus. La difficulté d'éviter les ovalisations avec les machines horizontales, la nécessité de simplifier autant que possible des appareils encombrants et de leur donner la marche la plus régulière possible, ont conduit à adopter presque partout des machines verticales à bâti robuste et trapu, avec un cylindre à vent supérieur, dont le piston a une tige, tantôt commune avec celle du piston à vapeur, tantôt actionnée par une traverse-guide réunissant les extrémités des

tiges des deux pistons à vapeur. Simples ou compound, ces machines sont à détente. Deux bielles pendantes actionnent deux volants montés sur un même arbre.

En Amérique, chaque fourneau de 300 tonnes est muni de deux machines ayant un cylindre à vent de 2 mètres de diamètre, et 1^m,52 de course, marchant à 30 ou 40 tours par minute, à détente commandée par un régulateur à boules. En France, en Belgique et en Allemagne, on employait jusqu'à ces derniers temps des souffleries trop faibles, marchant à raison de 15 tours par minute. Une heureuse réaction se produit depuis quelques années et l'une des plus importantes maisons de construction de Belgique a récemment livré des machines soufflantes compound à deux cylindres à vapeur, actionnant deux cylindres soufflants de 2^m,35 de diamètre et 1^m,50 de course, destinées à marcher à 30 tours.

Machines diverses. — Pour compléter la description des accessoires d'un haut-fourneau, il faut encore mentionner les pompes et les monte-charges. L'eau sous pression est indispensable pour le refroidissement des parois, qui n'absorbe jamais moins de 1 mètre cube par minute, pour les fourneaux de 80 à 100 tonnes ;

et souvent pour les manœuvres du gueulard, où la commande par pistons hydrauliques offre de grands avantages. Les monte-charges servent à élever les vagonnets de coke, de castine et de minerais au niveau du gueulard. Parmi les divers types de ces appareils, on peut citer ceux où les cages sont élevées par des câbles passant sur des molettes pour s'enrouler ensuite sur des tambours actionnés par des machines à vapeur ; et ceux où la commande du câble s'effectue par un piston, à vapeur ou à eau comprimée, par l'intermédiaire de poulies différentielles.

Organisation de la halle de coulée. — Lorsqu'il s'agit de couler la fonte dans des lingotières métalliques — c'est le cas des fontes blanches d'affinage — il est essentiel, si l'on veut éviter les explosions, que les moules soient tenus parfaitement secs : la halle de coulée doit alors être couverte. Les lingotières sont en fonte ; elles ont une épaisseur moyenne de 6 à 8 centimètres ; on évite ainsi qu'elles ne rougissent.

Dans le cas des fontes grises, les moules se font en sable : la coulée est dirigée dans des rigoles ménagées à cet effet, d'où elle déborde

pour remplir les moules, disposés sur toute la surface du chantier. L'humidité n'est alors pas à craindre : et il n'est pas rare, surtout en Angleterre, de voir des chantiers de coulée exposés aux intempéries des saisons : ce qu'il faut, pour assurer la réussite de l'opération, c'est un sol poreux, humide et froid jusqu'à une profondeur de 50 à 60 centimètres, de façon que la vapeur d'eau, produite au contact de la fonte liquide, se condense instantanément. Il faut donc que le chantier soit profond et bien drainé, et constitué d'un sable maigre et peu tassé. Si ces conditions ne sont pas remplies, il se produit des explosions, et la coulée s'enterre.

La préparation du chantier est une opération délicate, qui exige des ouvriers habiles et expérimentés.

Disposition d'une usine. — La disposition qu'on recommandait autrefois pour l'établissement d'une usine à fonte consistait à adosser les hauts-fourneaux à une déclivité naturelle du sol permettant de constituer, au niveau des gueulards, une plate-forme où des voies amenaient le coke et les minerais. Des ponts, jetés entre les gueulards et la plate-forme, permettaient d'effectuer le chargement. Cette disposi-

tion tend aujourd'hui à disparaître. On la retrouve encore, notamment dans certains hauts-fourneaux de Meurthe-et-Moselle adossés aux montagnes où débouchent par des galeries de niveau les mines de fer qui les alimentent. Mais d'une façon générale, la hauteur des hauts-fourneaux modernes exigerait, pour l'établissement des plates-formes, des murs de soutènement très coûteux. D'autre part, la complication croissante des accessoires des hauts-fourneaux, et notamment le développement des appareils à air chaud, exige que les abords des hauts-fourneaux soient plus dégagés que par le passé ; et surtout pour les fortes productions qu'on cherche aujourd'hui à atteindre, ces exigences s'accommodent mal du voisinage d'un haut mur de soutènement voisin des fourneaux.

On choisira donc de préférence, pour établir une usine à fonte, une surface plane, bien desservie, par voies navigables ou ferrées, pour la réception des matières premières et l'expédition des produits. Ce point est essentiel, car les manutentions portent sur un tonnage considérable : un haut-fourneau de Meurthe-et-Moselle consomme en moyenne, par journée de marche normale, 300 tonnes de minerai et de castine, et 100 tonnes de coke, pour produire

100 tonnes de fonte, et au moins autant de laitier.

Les hauts-fourneaux sont généralement disposés en ligne, reliés entre eux par des passerelles jetées entre les plates-formes des gueulards. D'autres passerelles relient les plates-formes des monte-charges avec celles des hauts-fourneaux, ou avec les passerelles de communication.

Parfois un seul monte-charges, situé entre deux fourneaux, suffit à leur alimentation commune. C'est notamment le cas d'une des usines les plus considérables du Cleveland, où les fourneaux produisent 80 tonnes par 24 heures, avec du minerai à 40-45 %. Cette disposition est économique, mais elle peut présenter des inconvénients sérieux, dans le cas des fortes productions. La régularité des conditions de marche est un point tellement essentiel, qu'il faut éviter sur toutes choses que l'alimentation d'un fourneau vienne à souffrir par le fait d'une avarie de machine ou de cable. La plupart des installations récentes comportent un monte-charges par fourneau : fourneaux et monte-charges sont alors disposés sur deux lignes parallèles.

L'intensité du refroidissement par les conduites exige que les appareils à air chaud soient aussi voisins que possible des fourneaux qu'ils

doivent alimenter, de façon à réduire au minimum la longueur des canalisations. Leur nombre est considérable, trois ou quatre par fourneau ; leur diamètre n'est guère inférieur à 6 mètres, pour les appareils à grande production. On voit donc qu'ils exigent une surface considérable, si l'on veut laisser autour du haut-fourneau les dégagements nécessaires pour le travail courant, et pour les réparations en cours de marche. Deux dispositions sont possibles, qui consistent à les établir, soit sur une ligne parallèle à celle des fourneaux, soit entre ces appareils. C'est également entre les fourneaux qu'il est commode d'établir les collecteurs de poussières, ou les laveurs, montés sur les conduites de gaz.

Ainsi donc, d'un côté de la ligne des hauts-fourneaux se trouvent les monte-charges et les appareils à air chaud. L'autre côté est occupé par les halles de coulée, qui sont établies normalement à la ligne des fourneaux. Entre les halles sont des voies, qui permettent d'amener au voisinage du trou de coulée les poches qui doivent se charger de fonte, au cas où l'usine dessert un atelier Bessemer, marchant en première fusion, et les vagonnets destinés à recevoir le laitier et à l'emporter au crassier. Ceci exige que le fond du creuset, partant le sol des halles

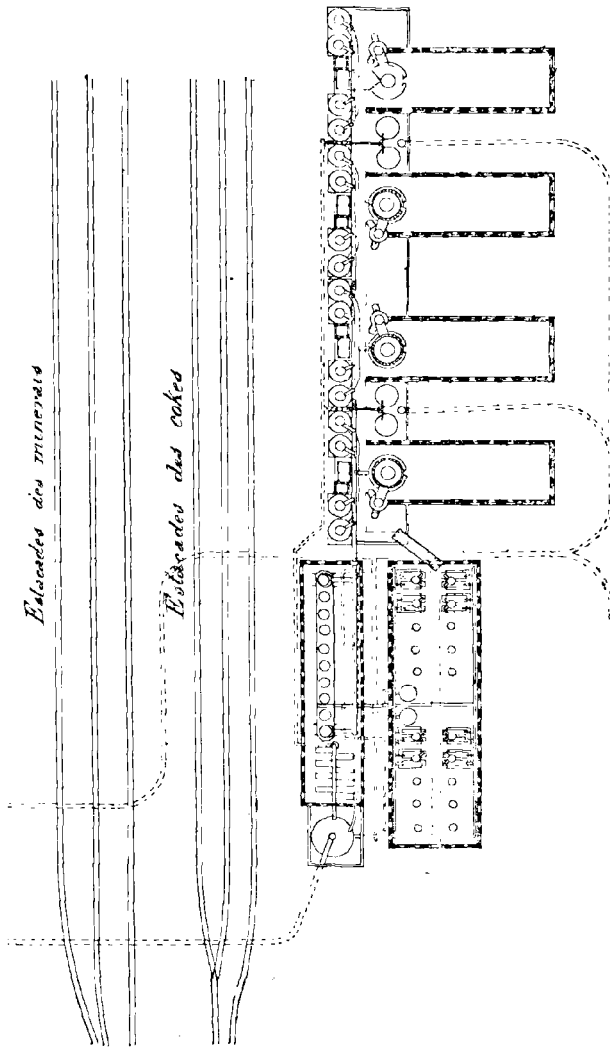


Fig 15. — Plan de l'usine de South Chicago.

de coulée et de la plate-forme où sont établis les fourneaux et les appareils à air chaud, soit élevé de 1^m,50 à 3 mètres au-dessus de la plate-forme où sont les voies de chargement des fontes.

L'emplacement des machines soufflantes et des chaudières est déterminé par les circonstances locales. Parfois on profite pour les établir de la place laissée libre entre les halles de coulée ; parfois, comme à South Chicago (*fig. 15*), on les établit sur deux lignes parallèles, dont la direction fait suite à la ligne des hauts-fourneaux ; il y a avantage à ne pas trop rapprocher ces accessoires des appareils principaux, aux abords desquels il faut éviter, avant toutes choses, l'encombrement. Un espace considérable sera consacré aux paires à minerai et à fonte, au magasin de combustible. Les quantités nécessaires à tenir en réserve varient suivant les pays et les conditions d'approvisionnement ; elles représentent toujours un tonnage considérable : il y a donc un grand intérêt à étudier, d'après la manière dont l'usine est desservie, les dispositions permettant de réduire au minimum les manutentions successives. En général, les réserves de minerai et de combustible forment une ligne parallèle à celle des fourneaux, aussi

voisine que possible des monte charges, afin de réduire le trajet que les vagonniers ont à faire des estacades aux bascules. Quant à l'aménagement des parcs, il varie suivant les dispositions du terrain. Partout on cherche à économiser la main-d'œuvre, et les frais d'achat de terrain, en constituant des estacades élevées, d'où les wagons se déchargent automatiquement, et en facilitant par des installations mécaniques puissantes le déchargement des bateaux, lorsque l'approvisionnement s'effectue par eau.

L'espace occupé par une usine à fonte est toujours considérable. Avec des fourneaux de 50 tonnes, on comptait 1 hectare pour une installation d'un fourneau, 2 hectares pour trois fourneaux. Une usine possédant deux hauts-fourneaux de 100 tonnes et utilisant du minerai à 30-35 % a besoin, pour être largement installée, de 20 hectares, en y comprenant les parcs à matières premières et à fonte, et le crassier.

Décrassage. Utilisation des laitiers. — L'évacuation des laitiers constitue une des difficultés principales de l'industrie de la fonte. Leur production est en moyenne égale à celle du métal. L'Angleterre, pour ne citer qu'un exemple, produit annuellement 12 millions de tonnes de

laitier. On conçoit que l'amoncellement de pareilles quantités de matières stériles occupe des surfaces considérables, qu'il faut prévoir dans l'établissement d'une usine.

Dans ces derniers temps on a cherché, et on a réussi à utiliser les laitiers basiques des fourneaux marchant en moulage, en confectionnant des briques ou du ciment. Ces applications, sur lesquelles il n'y a pas lieu d'insister ici, commencent à prendre en France un développement considérable.

Le laitier est généralement coulé, à mesure qu'il s'échappe du fourneau, dans des vagonnets qu'on emmène, et qu'on décharge sur le crasier. Dans plusieurs usines on emploie, pour s'en débarrasser, un procédé qui donne de bons résultats : à sa sortie de la tuyère Luermann, le laitier en fusion est entraîné et granulé par un violent courant d'eau. Repris au fond d'une fosse par une chaîne à godets, le sable ainsi formé est chargé dans de grands wagons qui l'emportent et le déchargent dans des conditions fort économiques.

CHAPITRE VI

—

CONDUITE DU HAUT-FOURNEAU

Personnel. — Le personnel attaché au travail du haut-fourneau proprement dit se compose de fondeurs et de chargeurs.

Les fondeurs ont à surveiller les tuyères, à couler le laitier et la fonte, à régler la marche des appareils à vent chaud et à préparer les rigoles et les moules en sable qui doivent recevoir la coulée. Parfois un ouvrier a spécialement la surveillance du laitier : c'est le cas dans le Cleveland.

Les chargeurs ont à remplir de coke, de castine et de minerai les vagonnets qu'ils amènent à la baseule, puis au monte-charges. Pour que ce service n'occupe pas un personnel trop nom-

breux, il est bon que les tas ne soient pas distants de plus de 50 à 60 mètres des fourneaux.

Au gueulard sont d'autres ouvriers qui versent la charge dans le fourneau ; dans la halle de coulée est un personnel de manœuvres chargé de démouler les lingots, de les casser, de les charger sur wagons et de les emmener au parc.

Le nombre total des ouvriers varie avec les circonstances locales, suivant la richesse du minerai, d'où dépend le poids des matières premières pour une production donnée, et les installations de déchargement. Dans le Cleveland, où l'utilisation de la main-d'œuvre a atteint un degré de perfection qui n'a été dépassé en aucun pays, le travail des chargeurs et des fondeurs n'employait autrefois qu'un personnel de 6 hommes par poste de 12 heures, pour une production de 64 tonnes par 24 heures : un seul verseur, au gueulard, pour verser plus de 100 tonnes ; 2 $\frac{1}{2}$ fondeurs (1 équipe de 5 hommes, dont 2 spécialement affectés aux laitiers, suffisait à 2 fourneaux) ; et 2 $\frac{1}{2}$ chargeurs pour remplir les vagonnets. Et dans les hauts-fourneaux récents, produisant 80 tonnes par 24 heures, le personnel ne dépasse pas 7 hommes par poste : il est vrai que le minerai est pris aux fours de rôtissage, et qu'il suf-

fit, pour remplir les vagonnets, d'ouvrir une trappe.

En France, les fourneaux de Meurthe-et Moselle fournissent également de bons exemples d'utilisation de main-d'œuvre. Pour une production de 50 tonnes de fonte en 12 heures, correspondant à plus de 200 tonnes de matières premières, on emploie deux verseurs au gueulard, 8 chargeurs pour remplir les vagonnets (ici il faut prendre le minerai aux tas) et 5 fondeurs. A mesure que la production diminue, l'utilisation de la main d'œuvre est moins bonne. Il n'était pas rare autrefois de voir un pareil personnel de chargeurs pour une production moitié moindre. Aux États-Unis, au contraire, pour une production de 150 tonnes de fonte par 12 heures, qui correspond à 400 tonnes de matières premières, il suffit de 2 verseurs au gueulard, et de 8 fondeurs.

Outre ce personnel, chaque haut-fourneau comporte un basculeur, un machiniste au monte-charges, un autre aux machines soufflantes, puis de nombreux manœuvres dans la halle de coulée ; il n'en faut guère moins d'une quinzaine par poste, pour une production de 100 tonnes par 24 heures. D'autre part, il faut un personnel considérable pour la manutention des ma-

tières premières, du laitier et de la fonte : le déchargement des wagons ou des bateaux de minerai et de coke, le chargement des fontes, le service du crassier exigent, quelle que soit la perfection des installations, un grand nombre de bras. Aussi ne faut-il guère compter, dans une usine à fonte, sur moins d'un ouvrier par tonne de fonte produite en 24 heures. Ce nombre ne s'abaisse que pour les productions intensives. Ainsi, en 1891, l'usine d'Edgar Thomson, pour une production de 2300 tonnes de fonte en 24 heures, avec 7 fourneaux, employait 1 900 ouvriers : ce qui correspondait pour chaque fourneau à une production moyenne de 330 tonnes, avec un personnel de 270 hommes.

Mise en feu et hors feu. — Deux opérations des plus délicates, dans l'existence d'un haut-fourneau, sont la mise en feu, et la mise hors feu.

Pour la mise en feu, on se borne en général à remplir de bois le creuset et l'ouvrage ; au-dessus on verse du coke mélangé de castine, en proportion suffisante pour scorifier les cendres, puis on achève en versant alternativement du coke, par charges normales, et du minerai, par charges croissant de la moitié aux trois quarts de la

charge normale. On met le feu par le trou de coulée et les embrasures des tuyères ; et lorsque le feu a gagné les étalages, on place les tuyères, on bouche le trou de coulée, et on laisse couvrir le feu pendant 24 à 36 heures. Lorsque le combustible incandescent arrive aux tuyères, on ferme le gueulard, et on met le vent, à faible pression, puis on l'augmente graduellement jusqu'à la moitié de la pression normale, pour ne dépasser ce point qu'après la première coulée. Jusque-là, il est prudent de laisser échapper les gaz dans l'atmosphère : au début, ils risqueraient d'occasionner des explosions ; d'autre part, les maçonneries seraient saisies si on soufflait dès l'abord au vent chaud.

M. Gayley recommande de faire précéder l'allumage d'un séchage des maçonneries, obtenu en entretenant dans le fourneau, durant un mois entier, un feu de bois. Des expériences comparatives sur deux hauts-fourneaux identiques lui ont permis de constater, en faveur de cette dernière méthode, des avantages qui se poursuivaient durant la campagne entière. On peut alors procéder à un allumage beaucoup plus rapide, et laisser le feu prendre librement, au lieu de réduire l'accès de l'air, et de le laisser couvrir durant 24 ou 36 heures. Et les parois,

complètement sèches, se comportent mieux au feu.

Les premiers dosages sont relativement fusibles, à cause de la faible température de l'ouvrage. Mais bientôt il convient de modifier le dosage, et de le rendre réfractaire, si l'on veut préserver contre les corrosions les parois encore dépourvues de garnissages, et favoriser la formation de ces revêtements protecteurs. La conservation du profil doit être, durant la mise en feu, la principale préoccupation des fondeurs. Aussi n'est-il pas rare de voir doser les premiers laitiers à 50 % de chaux, afin de fournir la quantité de cette base nécessaire à la formation des garnissages, et à la neutralisation de la silice et de l'alumine provenant de la maçonnerie réfractaire.

Dans la mise hors feu, comme dans la mise en feu, les explosions sont à redouter. D'autre part, lorsque le niveau a baissé dans la cuve de quelques mètres, à la suite de l'arrêt du chargement, les gaz, n'étant plus suffisamment refroidis, risqueraient de détériorer les appareils métalliques qui servent de fermeture au gueulard. Il est donc prudent, à ce double point de vue, de supprimer ces appareils. On trouve un grand

avantage à remplacer les dernières charges, au moment de la mise hors feu, par de la castine pure qui, par sa décomposition, rend les gaz inexplorifs et même, au bout de peu de temps, absolument incombustibles. On peut, grâce à cet artifice, se dispenser d'enlever les pièces métalliques du gueulard.

Marche normale. — En cours de marche normale, les fondeurs se guident, pour régler l'allure, sur l'aspect des laitiers. Gluants à la coulée, vitreux après refroidissement, lorsque la teneur en silice est élevée, ils ont, en dosage basique, une cassure toute différente : pierreuse, s'ils sont principalement calcaires, porcelanique, s'ils renferment de l'alumine, et prennent enfin une texture souvent cristallisée sous l'influence de la magnésie. A la coulée, ils sont visqueux, laiteux d'aspect, pour les hautes teneurs en silice ; fluides, mais pouvant encore s'étirer en fils s'ils renferment de l'alumine, lorsque la teneur en silice varie de 40 à 45 % ; au-dessous de cette teneur, ils sont courts au crochet ; et lorsque la teneur en chaux et magnésie dépasse 50 %, ils cessent de couler en filets minces, et fusent au cours du refroidissement.

Leur coloration donne aussi des indications

importantes, car elle dépend des teneurs en oxydes métalliques, et par conséquent de l'allure du fourneau. Les laitiers basiques de fonte noire ont une cassure grise, légèrement bleuâtre ; à mesure que le numéro de la fonte s'élève, la teinte fonce, pour devenir jaune, jaune sale, brune avec les fontes blanches, noire enfin avec les fontes d'allure froide. Les laitiers acides, dans les mêmes conditions, prennent des colorations vertes, fonçant progressivement jusqu'au noir.

D'autre part, les sulfures apportent des colorations spéciales d'un brun jaune, et cela tout particulièrement dans les laitiers acides laitieux, naturellement colorés. Le manganèse donne aux laitiers acides des teintes d'améthyste ; aux laitiers basiques des colorations vertes ou jaunes ; en allure de spiegel, ou de ferro-manganèse, les laitiers sont intérieurement colorés en vert par du sulfure de manganèse, qui s'oxyde à l'air et donne à la surface une teinte rousse.

La *peau* des laitiers varie aussi de texture : rugueuse en allure chaude, elle est au contraire lisse dans le cas des fontes froides, écaillée pour les fortes teneurs en alumine.

La température des laitiers à la coulée, que les fondeurs apprécient à la couleur, permet de

juger de leur composition, plus ou moins réfractaire. Le temps pendant lequel ils conservent cette température, la rapidité avec laquelle ils se figent, donnent des indications sur leur chaleur spécifique, c'est-à-dire sur l'allure plus ou moins chaude du fourneau, et sur leur composition.

Ainsi à chaque allure, pour un fourneau marchant sur des approvisionnements réguliers, correspondent des laitiers nettement caractérisés par leurs propriétés physiques. Aussi les fondeurs arrivent-ils à se rendre un compte fort exact, par l'examen de ces laitiers, de l'allure du fourneau, et des modifications qu'elle comporte. Les refroidissements, en particulier, se manifestent par une tendance des laitiers à prendre une couleur plus foncée, et à devenir vitreux : la réduction étant moins parfaite, il passe de l'oxyde de fer dans les crasses ; d'autre part, celles-ci s'enrichissent de tout le silicium que la fonte cesse d'absorber.

Mais la précision à laquelle parviennent les fondeurs exercés ne doit pas empêcher de suivre la marche des fourneaux par des observations fréquentes de température et de composition de gaz : c'est là le seul moyen d'assurer la régularité d'allure, et de prévenir des dérangements

que l'examen des laitiers permet seulement de constater aussitôt qu'ils se sont produits.

Le calcul du dosage s'effectue en combinant les minerais et la castine dont on dispose, de façon à obtenir un laitier dont on a déterminé *a priori* la composition, réduite aux éléments principaux : silice, chaux, magnésie et alumine. Il faut bien entendu dans ce calcul tenir compte des cendres du combustible. Mais l'irrégularité de la composition des minerais et de leur gangue, les variations de la teneur en cendres du combustible, l'influence qu'exerce la teneur en humidité des matières sur des charges faites au poids; enfin les dérangements accidentels d'allure, obligent à modifier constamment le dosage. C'est pour ce réglage perpétuel que l'examen des laitiers donne des indications essentielles. Mais, à moins de détériorations importantes, les charges ne doivent jamais s'écarter beaucoup de celles qui correspondent à l'allure normale.

Lorsqu'il s'agit de changer d'allure, le fourneau présente en général, grâce au temps que mettent les nouveaux dosages à parvenir jusqu'au creuset, et au classement naturel qui mélange les nouvelles charges aux anciennes, une inertie

dont les effets sont parfois très préjudiciables. On évite cet inconvénient en faisant précéder le nouveau dosage d'une charge à blanc, composée exclusivement de combustible ou de minerai, suivant qu'il s'agit de passer à une allure plus ou moins chaude.

Les charges, comme les coulées, s'effectuent à intervalles réguliers. Chaque charge se compose d'un poids fixe de coke, et d'un poids de minerai qui varie suivant l'allure. C'est par le nombre de charges en 12 ou en 24 heures que se mesure en général la rapidité d'allure d'un haut-fourneau.

Le minerai est généralement chargé, sans préparation, tel qu'il sort de la mine. Les minerais en grains, à faible teneur, sont parfois soumis à un lavage. Les carbonates, ainsi qu'on l'a vu plus haut, doivent être grillés. On a aussi recours à une véritable préparation mécanique, qui consiste en un concassage, ou en une calcination destinée à désagréger la roche, lorsqu'il s'agit de minerais durs, compacts, en morceaux volumineux. Ce traitement assure une réduction plus rapide, avec une moindre mise au mille : car il a pour résultat de diviser le minerai, et d'augmenter les surfaces de contact entre celui-ci

et les gaz réducteurs. Telle est la raison des excellents résultats économiques qu'ont donnés les minerais menus et friables ; soit en Styrie, avec des hauts-fourneaux au bois, où on ne consommait pas plus de 700 à 800 kilogrammes de combustible par tonne de fonte ; soit au Pouzin, en France, où on a pu abaisser autrefois la consommation de coke à 740 kilogrammes normalement, avec un minerai tenant 40 % de fer, composé surtout de Filhols. C'est ainsi qu'on s'est bien trouvé de passer au haut-fourneau le résidu du grillage des pyrites. Aux États-Unis, les minerais magnétiques de la région du lac Champlain et des Adirondacks, trop pauvres pour être avantageusement transportés, subissent une préparation qui consiste à les griller, à les concasser, puis à séparer l'oxyde de fer de la gangue par l'effet de puissants aimants. On obtient ainsi des concentrés, tenant 60 à 68 % de fer, formés de grains ayant 2^{mm},5 de dimension moyenne, et qu'on passe aux hauts-fourneaux en forte proportion, atteignant au maximum $\frac{8}{10}$ de la charge de minerai. A Port-Henry, où de nombreux essais ont été faits sur ce traitement, on a toujours trouvé une économie de coke à forcer la proportion de concentrés.

Ce qu'il faut surtout chercher à réaliser, c'est un chargement uniforme. Lorsque le minerai est en morceaux de dimensions sensiblement égales, la régularité de la descente, et par conséquent l'économie du traitement, en sont grandement accrues. L'avantage qu'on a retiré, dans certaines usines, à constituer exclusivement la charge de briques de minerai fin aggloméré, a largement compensé les frais de cette préparation.

Le haut-fourneau est souvent employé, de préférence aux cubilots de fonderie, pour repasser les vieilles ferrailles, les riblons, les bocages de fonte. Il ne faut, en effet, guère moins de 100 kilogrammes de coke au cubilot par tonne de fonte; au haut-fourneau, 60 à 65 kilogrammes suffisent largement. Il n'est pas rare de voir ainsi ajouter au lit de fusion des déchets de fonte, dans une proportion qui varie de 10 à 20% du poids total.

Réparations en cours de marche. — Les avaries qui surviennent à la chemise réfractaire sont si préjudiciables à la bonne marche d'un haut-fourneau, dès qu'elles atteignent une certaine importance, qu'elles exigent une réparation immédiate, alors même qu'elles ne menacent pas la solidité de la construction. Lorsque les

circonstances le permettent, on évite d'avoir recours à la mise hors feu, qui occasionne toujours une perte de temps et des frais considérables.

Les réparations courantes à la maçonnerie de la cuve s'effectuent assez facilement. Mais lorsqu'il s'agit de briser des accrochages, l'opération devient fort délicate, car on ne peut plus agir par l'extérieur. On procède alors de la manière suivante : On cesse de verser au gueulard, lorsque le niveau des charges s'est suffisamment abaissé on arrête le vent, on retire les tuyères, et après une dernière coulée on lute tous les orifices par où l'air pourrait avoir accès dans l'ouvrage. On peut alors pénétrer à l'intérieur de la cuve, à condition d'assurer l'aérage par un ventilateur, et y effectuer les travaux nécessaires. On réussit ainsi, en lutant tous les orifices d'entrée d'air, à conserver le feu dans le fourneau durant un temps souvent fort long. Ce procédé, appliqué en cas de chômage imprévu, a permis de reprendre la marche après six semaines d'interruption. Il faut alors remplir complètement le fourneau avant de pratiquer l'arrêt, afin d'éviter l'accumulation, au voisinage du gueulard, d'oxyde de carbone qui pourrait provoquer des explosions lors de la remise en marche.

Plus délicates sont les réparations, en cours

de marche, à la maçonnerie des étalages. On y réussit pourtant de la manière suivante : on cesse de souffler ; puis on démolit les maçonneries avariées, en commençant par le haut. En avant de chaque brique enlevée, on refoule de l'argile, qui, se mêlant aux charges, forme une croûte solide, à l'abri de laquelle on établit la maçonnerie neuve.

Dérangements d'allure. — On a vu que, pour un haut-fourneau donné, la production de chaque nature de fonte était caractérisée par un ensemble de circonstances dont on ne pouvait s'écarter que dans d'assez faibles limites. Les défauts de soufflage ou de dosage, et l'insuffisance ou l'excès de chauffage du vent, ont donc pour conséquences des dérangements et des accidents, souvent fort graves, pouvant entraîner la perte du haut-fourneau, et auxquels il importe de remédier dans le plus bref délai. Les symptômes de ces dérangements sont les suivants : laitiers noirs, fontes moins chargées en carbone, gaz plus combustibles au gueulard.

Une première catégorie de défauts d'allure a pour conséquence l'engorgement du creuset. Si la marche est trop rapide pour les dimensions du creuset, la chaleur monte dans l'ouvrage ; les

laitiers se forment prématurément ; le minerai arrive dans le creuset imparfaitement réduit ; et, réagissant sur la fonte déjà formée, produit un loup ferreux. A la coulée, la fonte est donc décarburée, caverneuse, et les laitiers s'enrichissent d'oxyde de fer ; d'autre part, la sole monte et bientôt, si l'on n'y remédie, le creuset entier se trouve pris. Le même accident se produit si le minerai, par suite d'une descente trop rapide dans la cuve, vient à être réduit avec production trop abondante d'oxyde de carbone : la charge de combustible se trouve alors insuffisante, et l'allure devient froide. Une marche trop lente, conduisant à une circulation défectueuse des gaz, conduit au même résultat. Enfin, la marche en excès de mine qui, dans la fabrication des fontes chaudes, a pour seul résultat d'abaisser le numéro, a de graves conséquences dans la fabrication des fontes blanches : la chaleur fournie au haut-fourneau se trouve insuffisante pour fondre l'excès de matières ; il en résulte une allure trop froide, avec l'engorgement du creuset pour conséquence. Enfin, en allure extra-chaude, les dosages trop réfractaires occasionnent une formation de garnissages exagérée, et le creuset se prend graduellement, envahi, non plus par un loup ferreux, mais par un dépôt calcaire.

A ces causes diverses d'engorgement, on appliquera divers remèdes : en écartant ou en rapprochant les tuyères, en changeant le diamètre des busillons et en faisant varier la quantité de vent soufflée, on modifie l'allure et la dimension du creuset. D'autre part, on agit sur le dosage : rendant les laitiers plus fusibles si l'engorgement résulte de la formation des garnissages ; passant en allure extra-chaude, si l'on a reconnu la formation d'un loup, en diminuant la charge de mine, et en élevant la température du vent.

La détermination du remède à appliquer exige une grande habitude, et un diagnostic exercé : car des causes opposées peuvent conduire au même résultat. C'est ainsi que dans la fabrication des fontes chaudes la marche avec défaut de mine permet à la chaleur de monter dans l'ouvrage ; comme conséquence, il se produit une scorification du minerai, et il se forme un loup ferreux. Cet accident, qui se manifeste par un échauffement du gueulard, comporte un remède opposé à celui dont il a été question tout à l'heure.

On parvient parfois, si l'on s'y prend à temps, à dissoudre par de la fonte extra-chaude un loup ferreux en formation. Si cette tentative échoue, et si le haut-fourneau s'engorge, il faut,

après avoir modifié le dosage, faire le nécessaire pour assurer, jusqu'à l'arrivée des nouvelles charges, l'évacuation des produits pâteux qui encombrant l'ouvrage. C'est là une opération des plus délicates, qui exige parfois l'établissement de tuyères provisoires, au dessus du niveau des tuyères engorgées : opération d'autant plus pénible que l'on doit assurer le passage de l'air au milieu d'une masse métallique, partiellement solidifiée, qu'on ne peut attaquer qu'au moyen de ciseaux d'acier, avec l'aide de béliers puissants.

S'il faut éviter avec soin les garnissages excessifs, il faut aussi se garder contre les corrosions, et modifier le dosage dès qu'on s'aperçoit de la disparition du revêtement protecteur des parois.

D'autres dérangements d'allure proviennent de la méthode de chargement. Le coke, lorsqu'il est chargé aux parois, a une tendance à s'arc-bouter. Il en résulte une marche par chutes, préjudiciable à la régularité de la réduction, et qui peut, d'autre part, compromettre la solidité de la construction. De pareils accidents sont fréquents après des arrêts prolongés.

Enfin, les fuites d'eau, si elles ne sont pas combattues énergiquement en temps opportun,

peuvent occasionner trois sortes d'inconvénients : le figement et l'engorgement du creuset ; l'oxydation de la fonte ; enfin la vaporisation instantanée d'un volume notable d'eau, parvenant sous un bain de fonte, peut occasionner des explosions formidables.

Dans la plupart des cas qui viennent d'être rapidement passés en revue, les dérangements d'allure correspondent à une réduction imparfaite, partant à une moindre production d'acide carbonique : ils ont donc pour conséquence une augmentation de combustibilité des gaz du gueulard.

CHAPITRE VII

—

EXEMPLES D'APPLICATIONS

A l'appui des développements qui précèdent, il ne sera pas sans intérêt de présenter ici quelques exemples, tirés de la pratique des usines. Ces exemples seront peu nombreux, car on ne saurait en fournir beaucoup sans sortir du cadre de cet ouvrage. Leur seul but est de donner, sur un petit nombre de cas particuliers, des détails suffisamment complets pour bien faire comprendre les conditions de la fabrication.

Fabrication de la fonte au coke. — Nous donnerons trois exemples de cette fabrication :

1° *Haut-fourneau américain. Fabrication de fonte Bessemer* (Usine d'Edgar-Thomson,

avril 1890). — Le fourneau, dont le profil est représenté (*fig. 1*, p. 108), avait une hauteur de 24^m,00, et un diamètre de 3^m,30 au creuset, de 6^m,90 au ventre, et de 4^m,80 au gueulard. Sa capacité était de 534 mètres cubes. Les tuyères, au nombre de 7, avaient 0^m,15 de diamètre.

Le minerai traité provient du Lac Supérieur. Il tient 62 % de fer, 0,095 % de phosphore, 0,05 % de soufre, 0,60 % de manganèse. La gangue est siliceuse et aluminieuse et ne renferme pas de chaux.

La castine employée est du calcaire presque rigoureusement pur.

Le coke, qui provient de Connelsville, a la composition suivante :

Carbone fixe	89,000
Cendres.	9,700
Soufre	0,800
Phosphore.	0,013
Humidité	0,060
Matières volatiles	0,040
	<hr/>
Total	99,613.

Le vent était soufflé, à une pression moyenne de 45 à 50 centimètres de mercure, à une température variant de 500 à 750° C. Le volume de vent soufflé par minute était de 570 mètres cubes (pris à 13° C).

La production de fonte s'élevait à 330 tonnes par 24 heures. Le fourneau consommait, par tonne de fonte produite, 1 550 kilogrammes de minerai, 452 kilogrammes de castine, et 840 kilogrammes de coke, et produisait 543 kilogrammes de laitier. Voici la composition de la fonte et du laitier :

<i>Fonte</i>	{	C	3,5		<i>Laitier</i>	{	SiO ²	33
		Ph + S	0,1				Al ² O ³	12
		Si	1,0				MgO	5
		Mn	0,8				Impuretés	
		Fe	94,6				(Se, S, etc.)	2 à 3
							CaO	47 à 48
Total.	.		100,0		Total	.		100

Les gaz s'échappaient du gueulard à la température de 171° C. Leur composition était, en volumes :

CO . . .	27 p. 100	CO ² . . .	11,7 p. 100
	$\frac{CO^2}{CO}$ (en poids).		0,671.

2° *Haut-fourneau de Middlesborough (Angleterre). Fabrication de fonte n° 3 de moulage.* — Le fourneau (*fig.* 16), avait une hauteur de 24 mètres, et une capacité de 324 mètres cubes.

Le minerai traité était du carbonate provenant

des mines du Cleveland. Calciné dans des fours

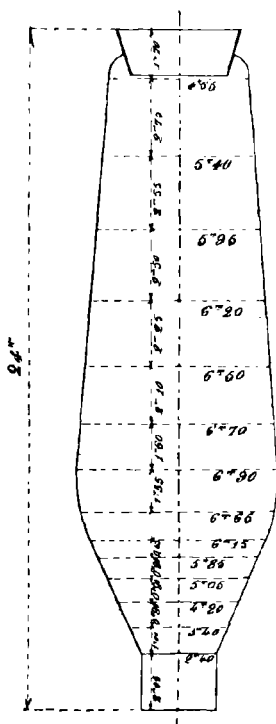


Fig. 16. — Fourneau de Middlesborough.

de rôtissage, de manière à expulser l'acide carbonique, il était chargé chaud, à la température

d'environ 270° C ; ceci explique la haute température des gaz du gueulard.

Le vent était soufflé, à une pression moyenne de 20 centimètres de mercure aux tuyères, à la température de 700° C. Le volume de vent soufflé par minute était de 211 mètres cubes (pris à 13° C.)

La production de fonte s'élevait à 80 tonnes par 24 heures. Le fourneau consommait, par tonne de fonte produite, 2 250 kilogrammes de minerai grillé (à 46,4 % de fer), 525 kilogrammes de castine, et 1 094 kilogrammes de coke.

Les gaz s'échappaient du gueulard à la température de 322° C.

3° *Haut-fourneau de Meurthe-et-Moselle. Fabrication de fonte de moulage.* — Ce fourneau (*fig. 17*) était remarquable par son profil formé de lignes courbes, où on avait soigneusement évité les angles. La cuve avait son diamètre maximum (5^m,700) à 9^m,433 au-dessus du fond du creuset. Sur une hauteur correspondant à un angle au centre de 5°14'20" au-dessus de cette ligne médiane et de 17°43' au-dessous, soit sur des hauteurs verticales de 1^m,275 au-dessus et de 4^m,260 au-dessous, le profil se com-

posait d'un arc de cercle de 7^m,033 de rayon qui se raccordait par des lignes courbes avec le

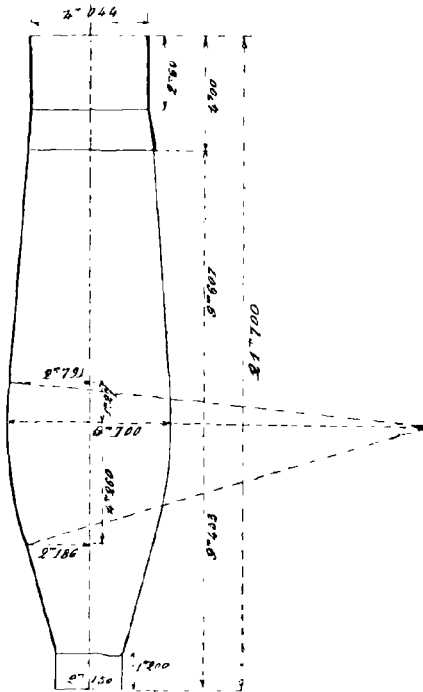


Fig. 17. — Fourneau de Meurthe-et-Moselle.

guculard et avec le creuset. Le creuset avait un diamètre de 2^m,150, une hauteur de 1^m,200. Les

étalages faisaient avec la verticale un angle de $20^{\circ}8'9''$. Ils s'élargissaient pour atteindre au ventre le diamètre de $5^{\text{m}},700$, puis la cuve se rétrécissait jusqu'au gueulard, situé à $11^{\text{m}},667$ au-dessus du ventre. L'appareil de chargement occupait une hauteur de 2 mètres sur un diamètre de $4^{\text{m}},044$. La hauteur totale était de $21^{\text{m}},700$, la capacité de 330 mètres cubes.

Le minerai traité était de l'oolite de Meurthe-et-Moselle, chargée crue, tenant 35 % de fer.

Le vent était chauffé à 750° C. Il était soufflé par 6 tuyères, sous une pression de 18 centimètres de mercure. Le volume soufflé par minute était de 270 mètres cubes (pris à 13° C).

La production de fonte s'élevait à 95 tonnes par 24 heures. Le fourneau consommait, par tonne de fonte produite, 2 800 kilogrammes de minerai, 345 kilogrammes de castine, et 1 180 kilogrammes de coke à 14 % de cendres, et produisait 1 160 kilogrammes de laitier.

Les gaz s'échappaient du gueulard à la température d'environ 200° C. Les charges séjournaient 30 heures dans le haut-fourneau.

Le tableau suivant résume, pour les deux derniers exemples, l'analyse des matières premières et des produits :

Matières premières et produits	Fourneau du Cleveland	Fourneau de Meurthe-et-Moselle	
	(craie)	(craie)	
Minerai . . .	Fe.	46,40	35,00
	Fe ² O ³	66,28	50,23
	Fe ³ O ⁴	0,66	"
	Al ² O ³	7,76	6,74
	CaO	6,49	9,53
	CO ²	"	7,46
	MgO	4,78	0,53
	SiO ²	11,89	12,24
	Ph ² O ⁵	1,15	1,27
	SO ³	0,89	"
H ² O	"	11,00	
Total	99,90	99,00	
Castine . . .	SiO ²	2,90	2,40
	Al ² O ³	1,21	(Al ² O ³ + Fe ² O ³). 2,40
	CaO	50,96	53,16
	MgO	1,05	0,5 à 1
	FeO	1,55	"
	CO ² + H ² O	42,33	42,06
Total	100,00	100,00	
Coke	Cendres	5,92	
	S	1,04	
	H ² O	0,31	
	C (fixe)	92,73	
Total	100,00		

Matières premières et produits	Fourneau du Cleveland		Fourneau de Meurthe-et-Moselle	
	(deux analyses)		(analyse moyenne)	
Laitier . . .	SiO ₂ . . .	27,78 27,23	33,20	
	Al ₂ O ₃ . . .	26,86 24,34	21,57	
	FeO . . .	traces traces	1,27	
	CaO . . .	31,43 32,54	41,52	
	MgO . . .	10,30 10,80	0,81	
	CaS . . .	4,05 5,24	"	
	Total.	100,42 100,15	98,37	
Fonte . . .	C (total).	3,314	3,08	
	Si	1,764	3,00	
	Mn.	0,230	"	
	S.	0,030	0,05	
	Ph	1,620	1,34	
	Fe (par différence).	93,042	91,00	
	Total.	100,000	98,47	
Composition des gaz du gueulard (en poids).	CO ₂	17,03		
	CO	26,70		
	Az	56,26		
	H	0,01		
	Total.	100,00		
Rapport (en poids). . .	CO ₂			
	CO	0,637	0,90	

Fabrication de la fonte à la houille crue.
 — Un bon exemple d'emploi de l'anhracite,

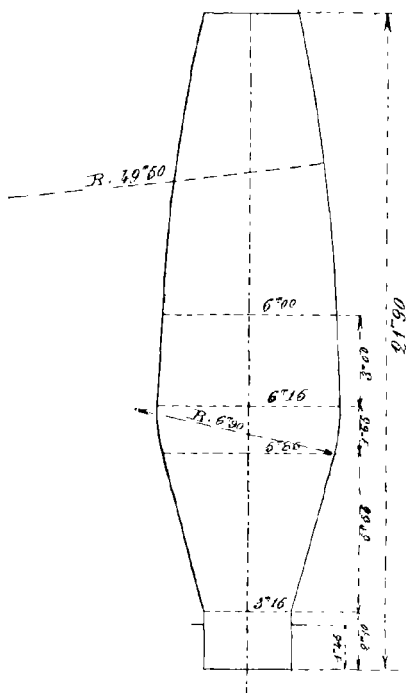


Fig. 18. — Fourneau de Seranton.

concurrentement avec l'utilisation des minerais menus au haut-fourneau, est fourni par l'usine

de la « Lackawanna Coal and Iron Company », à Scranton en Pensylvanie.

Le fourneau (*fig.* 18) avait 22^m,20 de hauteur, avec un diamètre de 3^m,30 au gueulard, de 6^m,00 au ventre, et de 3^m,60 au creuset. Le profil était formé de lignes courbes. Les étales avaient une pente de 75°. Les tuyères, au nombre de 7, avaient 125 millimètres de diamètre.

L'appareil de chargement était du type Coingt, dont on a donné la description plus haut.

Les minerais traités provenaient de la région du lac Champlain et de la Nouvelle-Angleterre, et se composaient d'hématites et de magnétites, concentrées ou non. Le tableau de la p. 181 donne l'analyse des principaux minerais employés, ainsi que des calcaires employés comme castine.

On repassait aussi au haut-fourneau des battitures tenant 76,01 % de fer, 1,50 % de silice et 0,063 % de phosphore, et des scories de forge, tenant 43,47 % de fer, avec 37,75 % de silice et 0,077 de phosphore.

Le combustible se composait en partie de coke de Connelsville, de composition identique à celle qui a été indiquée plus haut, et

Produits	Mineral da Tilly Foster	Mineral de Chateauguy	Mineral da Chateauguy concentre	Mineral da Republie	Mineral de Minnesota	Mineral da Crown Point	Mineral de Fisher	Calcaire de Vass Gap	Calcaire de la Susquehanna
SiO ₂ . . .	13,60	19,52	5,50	1,14	0,910	23,22	2,22	23,02	9,46
CO ₂ . . .	2,31	"	"	"	"	0,11	"	34,42	30,63
FeO } Fe ₂ O ₃ }	66,82	69,68	67,76	97,52	68,31	71,12	71,95	"	"
Al ₂ O ₃ . . .	1,88	3,02	0,91	0,30	0,49	1,28	2,2	2,107	3,20
CaO . . .	2,70	5,06	2,40	0,28	0,35	2,30	1,06	47,40	39,20
MgO . . .	12,42	3,18	1,08	0,36	0,10	1,02	1,15	2,81	7,85
MnO ₂ . . .	0,15	0,70	0,15	0,10	0,08	0,40	0,10	"	0,08
S	0,07	0,028	0,008	0,007	0,006	0,025	0,01	0,220	0,219
Ph ₂ O ₅ . . .	0,05	0,038	0,024	0,122	0,110	0,060	0,064	0,040	0,038
TiO ₂ . . .	"	0,250	"	"	"	"	"	"	"
Fe	48,38	50,46	67,72	68,22	68,82	51,50	51,88	"	"

d'anhracite, dont voici l'analyse élémentaire moyenne :

Humidité.	1,02
Matières volatiles	6,78
Carbone fixe.	80,39
Soufre.	0,49
Phosphore	0,013
Cendres	11,32
Total	<u>100,013.</u>

Le vent était soufflé à une pression qui parfois dépassait une atmosphère aux tuyères, et à une température relativement basse, puisqu'on se servait encore d'appareils en fonte. On soufflait dans le fourneau 300 mètres cubes de vent par minute (pris à 13° C).

La production de fonte variait de 70 à 80 tonnes par 24 heures. La consommation de combustible variait de 1 250 à 1 430 kilogrammes par tonne de fonte produite : ce combustible se composait, pour $\frac{1}{6}$ de coke, et pour le reste, d'anhracite.

Les laitiers produits tenaient 36 à 38 % de silice, et 11 % d'alumine.

Le métal produit était de la bonne fonte Bessemer, tenant en moyenne 2 % de silicium.

Le lit de fusion se composait d'un mélange des divers minerais ci-dessus énumérés, tenant en moyenne 54 à 55 % de fer, additionné de

39 à 42 % de castine (mélange par parties égales des deux calcaires). En marche normale, il entrait dans l'ensemble des minerais employés environ $\frac{1}{6}$ de concentrés menus, savoir :

Concentrés de Tilly Foster	dimension	6 ^{mm}
" Chateauguay	"	18 ^{mm} .

On a réussi, dans une campagne expérimentale, à forcer jusqu'à 50 % la proportion de menus concentrés. Mais la marche devenait alors fort irrégulière.

Les charges étaient considérables, et se composaient en moyenne de 3^t,53 de minerai, 1^t,35 de castine et 2^t,7 de combustible. On faisait 36 à 38 charges par 24 heures. Voici d'ailleurs la composition d'une charge, relevée sur le livre de fabrication :

Anthracite	2 17 ⁴ / ₈ kg
Coke	5 ⁴ / ₃
Minerai	3 560
Calcaire	1 399
Battitures	90, 6
Scories de forge	90, 6

On obtient un bon minerai en mélangeant, par exemple :

1	vagonnet de Crown Point
3	" Chateauguay
4	" Tilly Foster
3	" Minnesota
1	" Fisher

Autres exemples de marche à l'anhracite. — Aux usines de la « Warwick Iron Company », à Pottstown (Pensylvanie), on est arrivé à des résultats meilleurs, avec du vent chauffé à 700° C. Le fourneau a 21 mètres de haut, 4^m,80 de diamètre au ventre, 2^m,60 de diamètre au creuset, et 226 mètres cubes de capacité. Le minerai a une teneur moyenne en fer de 55 %₀. On souffle 378 mètres cubes de vent par minute ; et on produit en 24 heures près de 120 tonnes de fonte grise d'affinage, tenant 0,6 %₀ de silicium, avec une consommation de combustible qui varie de 1 000 à 1 100 kilogrammes par tonne de fonte, dont $\frac{1}{4}$ de coke et $\frac{3}{4}$ d'anhracite.

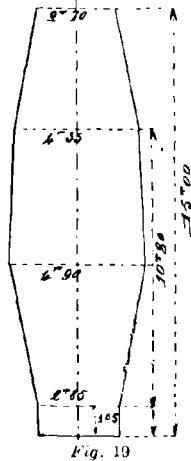
Emploi des houilles sèches à longue flamme. — L'usine de Gartsherrie, située à Sunnyside, près de Glasgow, traite au haut-fourneau sans aucun mélange d'autres combustibles, des charbons purs, très durs, tenant en moyenne :

Matières volatiles	41,2
Carbone fixe	54,8
Cendres	4
	<hr/>
Total	100,0

Ce combustible, chargé en gros morceaux, est exclusivement employé pour réduire le minerai.

Les fourneaux les plus récents (*fig. 19*) ont

une hauteur de 15 mètres, un diamètre de 2^m,70 au gueulard, de 4^m,80 au ventre, et de 2^m,85 au creuset. Le creuset a 1^m,05 de hauteur; les étalages ont une pente de $\frac{13}{4}$; le ventre est à 6 mètres au-dessus du fond du creuset; la cuve est presque cylindrique, puisqu'elle a encore 4^m,35 de diamètre à 4^m,20 au-dessous du gueulard; sa capacité est de 71 mètres cubes. Les tuyères, au nombre de 6, ont 68 millimètres de diamètre. Le gueulard est fermé par un cône en maçonnerie au sommet duquel se trouve la prise de gaz; percé de 4 portes, ouvrant sur des trémies à double fond par où se fait le chargement.



Fourneau de Gartsberrie

La castine est du calcaire très pur des environs d'Édimbourg.

Le minerai se compose de carbonate des houillères et en majorité de black-band, qui contient, après calcination, 60 % de fer métallique; on traite aussi des hématites de Bilbao et du Cumberland.

Le vent est soufflé sous une pression de 18^{cm} de mercure, à une température voisine de 450° C. Les appareils à vent chaud sont en fonte.

La production de fonte ne dépasse guère 30 tonnes par 24 heures. Lorsqu'il s'agit de fabriquer de la fonte Bessemer, on ne passe que de l'hématite. Pour la fonte de moulage, on passe du black-band, additionné de 10 % d'hématite. Les charges se composent :

Pour fonte d'hématite, de 840 kilogrammes de charbon, 880 kilogrammes de minerai, et 147 kilogrammes de castine ;

Pour fonte de moulage, de 855 kilogrammes de charbon, 920 kilogrammes de minerai, et 190 kilogrammes de castine.

La coulée se fait toutes les 12 heures. Dans cet intervalle, le laitier est coulé 4 fois.

Au sortir du gueulard, les gaz passent dans un jeu d'orgue, puis dans des appareils à circulation d'eau où ils se refroidissent, puis dans des tours de condensation, où achèvent de se déposer les eaux ammoniacales et les goudrons. Le tirage est assuré par des ventilateurs centrifuges, branchés sur les conduites avant les tours de condensation. Au sortir de ces appareils, les gaz sont dirigés aux chaudières, et aux appareils à vent chaud.

Fabrication de la fonte au charbon de bois. — Cette fabrication, comme il a été dit plus haut, est celle qui consomme le moindre poids de combustible, et qui s'effectue le plus rapidement, avec le moindre volume du haut-fourneau. La consommation de combustible par tonne de fonte produite est, en effet, descendue à 600 ou 625 kilogrammes aux hauts-fourneaux de Treibach, à 660 kilogrammes aux fourneaux de Hieslau. Et les fourneaux styriens marchent couramment avec une capacité de moins de 2 mètres cubes par tonne de fonte produite en 24 heures. En Corse, un fourneau construit par Ponsard, marchant avec du minerai de l'île d'Elbe, donnait avec 16 mètres cubes de capacité 17 tonnes de fonte par 24 heures, consommant 800 kilogrammes de charbon de bois par tonne de fonte produite.

Les hauts-fourneaux au bois sont en général des appareils à faible production. Aux États-Unis, on les a poussés, dans certaines régions, jusqu'à leur faire produire 1 000 tonnes de fonte de moulage par semaine. Le fourneau d'Ashland a 18 mètres de haut, 3^m.60 de diamètre au ventre, et 1^m.95 au creuset : ce creuset a 1^m.50 de profondeur. Le vent est soufflé par 6 tuyères, de 125 millimètres de diamètre, à la

température de 720° C, sous la pression de 30 centimètres de mercure. Le minerai traité tient 54 % de fer. La consommation de charbon de bois par tonne de fonte produite s'élève à 28 hectolitres, soit environ 670 kilogrammes.

Hauts-fourneaux au bois des Alpes Autrichiennes. — En Styrie et en Carinthie, les four-

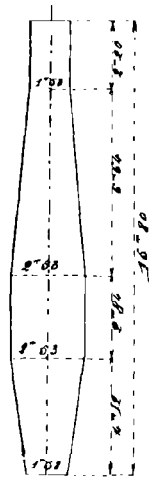


Fig. 70

Fourneau de Trofayach

capacité, avec $14^{\text{m}},75$ de hauteur. Mais ce ne fut qu'une exception. Pour donner un exemple qui caractérise la fabrication de la fonte dans ces contrées, et qui résume les

fourneaux au bois n'ont pas atteint de pareilles dimensions. Après avoir réalisé de notables progrès dans la fabrication de la fonte, par l'augmentation progressive du volume des appareils, et l'élévation de la température du vent, on avait hardiment entrepris à Frideau l'établissement d'un fourneau de 175 mètres cubes, haut de 19 mètres, lorsque survint la crise de 1873, à la suite de laquelle la construction fut arrêtée. Le plus grand fourneau construit avait 101 mètres cubes de

meilleurs résultats obtenus, on peut citer le haut-fourneau de Trofayach (*fig. 20*) qui cubait 58 mètres, avec 15^m,80 de hauteur.

Les minerais traités étaient des carbonates de diverses provenances, qu'on mélangeait, et qu'on chargeait, le minerai en roche grillé, le menu non grillé.

Voici l'analyse moyenne de ces deux minerais :

Produits	Minerai menu cru	Minerai en roche grillé
Fe ² O ³	28,36	67,78
FeO	22,87	2,00
Mn ² O ³	1,67	"
MnO	1,36	3,86
CaO	4,65	7,15
MgO	2,60	2,90
Al ² O ³	4,29	1,79
SiO ²	9,26	7,05
CaO	faibles traces	traces
Ph ³ O ⁵	0,06	0,057
SO ³	0,10	0,11
CO ²	21,20	"
Humidité	3,72	7,60
	100,14	100,297
Fe	37,64	49 00
Mn	2,21	2,78

Comme orbue, on se servait d'un schiste argileux, dont la composition était :

SiO ²	77,86
Al ² O ³	14,01
FeO	1,66
CaO	0,75
MgO	1,51
Humidité	2,15
Alcalis et pertes	2,06
Total.	<u>100,00</u>

Les laitiers produits étaient très fusibles. Voici une analyse moyenne :

SiO ²	46,49
Al ² O ³	5,32
FeO	3,17
MnO	8,21
CaO	29,54
MgO	6,30
Alcalis et pertes	1,37
Total.	<u>100,00</u>

Les fourneaux constitués sur ce modèle, traitant les matières dont il vient d'être question, produisaient environ 20 tonnes de fonte par 24 heures, consommant 5 à 6 mètres cubes de charbon de bois (1) par tonne de fonte. Les deux tableaux suivants, empruntés à l'important Mémoire de M. Ed. Grüner, suffisent à donner sur la marche de ces fourneaux des indications assez complètes :

(1) Ce sont des charbons très légers, pesant 115 à 118 kilogrammes au mètre cube.

Température du vent soufflé	Fontes blanches		Eiseneiz			
	Hieflau					
	1861	1874				
		Fonte douce (weicht)	Fonte dure (hart)	4 % de schiste (dans le lit de fusion)	2 1/2 % de schiste (dans le lit de fusion)	
		17,5 à 200° C	17,5 à 200° C	4,50 à 500° C	4,50 à 500° C	
C	3,30	2,95	3,43	3,237	3,009	
Si	0,10	0,093	0,110	0,372	0,265	
Ph	0,025	0,063	0,065	0,067	0,073	
S	0,014	0,036	0,016	0,013	0,011	
Cu	traces	traces	traces	traces	traces	
Mn	0,519	0,923	1,010	0,632	0,453	
Fe	95,072	95,935	95,368	95,709	96,189	
Total. . .	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	

TABLEAU INDIQUANT LA MARCHÉ DE DEUX HAUTS-FOURNEAUX DE VORDENBERG

Fourneau Franz Mayer Résultats complets d'un fondage du 15 juin 1871 au 13 mai 1874		Fourneau Radwerk n° 3, 1875	
Minerai grillé	28 645 tonnes	Minerai grillé	1 374 tonnes
Scories de four à réchauffer.	575 "	Charbon de bois } dur	27 m ³
Fonte produite	13 664 "	Charbon de bois } tendre	3 330 m ³
Rendement	47 0/0	Fonte	728 tonnes
Charbon de bois	75 650 m ³	Rendement du minerai	53 0
Consommation par tonne	5 m ³ ,38	Consommation par tonne	5 m ³ ,08
Température du vent	2700 C	Température du vent	4500 C
			Mars
			1 438 tonnes
			486 m ³
			2 978 m ³
			722 tonnes
			50 1/2 0
			4 m ³ ,70
			4500 C

Suivant la proportion d'erbue, et surtout suivant la température du vent, on obtenait des fontes plus ou moins siliceuses : c'est ce qui résulte du tableau de la p. 191.

Le tableau de la p. 192 résume la marche de deux fourneaux de Vorderberg.

L'expérience démontra qu'on n'obtenait qu'une faible économie à chauffer le vent au-delà de 350 à 400° C. Les charges séjournaient en moyenne 8 heures dans le haut-fourneau.

Cette fabrication correspondait à un volume de 1^m³,9 par tonne de fonte produite en 24 heures.

La température des gaz au gueulard était souvent élevée, et atteignait 500° C, avec des fourneaux de 13 mètres à cause de l'introduction du minerai sortant du four de grillage à la température du rouge sombre. Mais le rapport $\frac{CO^2}{CO}$ était toujours élevé et dépassait 0,9.

CHAPITRE VIII

—

PRIX DE REVIENT. STATISTIQUE

Le prix de revient de la tonne de fonte se compose de trois éléments : le prix des matières premières, les frais de fabrication proprement dits ; enfin l'amortissement et l'intérêt du capital de premier établissement.

Ce dernier chapitre est le moins important : les frais d'installation d'un haut-fourneau de 80 à 100 tonnes de production journalière, avec ses divers accessoires, s'élèvent à un million environ : si l'on fixe le taux de l'intérêt et de l'amortissement réunis à 10 $\frac{0}{10}$, la dépense correspondante ne dépasse pas 3 francs par tonne. Il faut ajouter à cela l'intérêt du fonds de roulement, et divers frais accessoires.

Les frais de fabrication, grâce à la puissance de production du haut-fourneau, sont relativement peu élevés. Dans ce chapitre rentrent : 1^o les frais de main-d'œuvre ; 2^o les frais généraux de direction et d'administration ; 3^o les objets divers de consommation (lubrifiants pour les machines, outils divers, etc.) ; 4^o enfin, les réserves pour grosses réparations. Les frais de main-d'œuvre s'élèvent, dans les usines bien installées, à une journée d'ouvrier par tonne de fonte, et souvent à moins, comme on l'a vu au Chap. VI. Or, le personnel d'une usine à fonte comprend une très forte proportion de manœuvres, dont le salaire est relativement bas. Le prix moyen de la journée, qui s'élève en Amérique à 6^{fr},50 dans les États du Nord, et à 8^{fr},50 dans les États du Sud, varie en Europe de 3 francs à 3^{fr},50, atteignant en Angleterre, dans le Cleveland, 5^{fr},60 à 6 francs : de sorte que la part de la main-d'œuvre dans le prix de revient varie dans nos pays au-dessous d'un maximum de 4 francs : s'abaissant à 3 francs en Angleterre, à 2^{fr},50 en Belgique.

Le tableau suivant donne le détail des frais de fabrication de la tonne de fonte en Belgique, où ils sont réduits au minimum, dans l'État

d'Alabama, où ils sont actuellement le plus élevés, et dans le Cleveland :

Frais de fabrication	Belgique	Cleveland	Alabama
<i>Frais accessoires :</i>			
Frais généraux	0 ^{fr} ,50	//	1 ^{fr} ,50
Objets divers de consommation . .	0, 60	//	2, 25
Réserves pour grosses réparations .	0, 35	//	1, 25
Total	1 ^{fr} ,45	2 ^{fr} ,50	5 ^{fr}
Frais de main-d'œuvre	2, 57	3	8, 50
TOTAL	4 ^{fr} ,02	5 ^{fr} ,50	13 ^{fr} ,50

En France, on peut compter sur une moyenne de 6 francs par tonne.

Reste le prix à l'usine des matières premières : coke, minerai et castine. C'est là le principal chapitre du prix de revient, celui sur lequel s'établissent presque entièrement les différences qui existent d'une région à l'autre ; et, dans une même région, d'une usine à l'autre. Aussi la situation des usines, par rapport aux lieux de production du coke ou du minerai, et par rapport aux voies de transport, est-elle au point de vue des prix de revient une question primordiale, à laquelle est étroitement liée celle des débouchés, c'est-à-dire de la situation des usines

par rapport aux lieux d'expédition des produits finis.

D'une façon générale, les minerais pauvres ne supportent pas de transports : c'est ainsi que les minerais de la Lorraine et du Luxembourg sont traités sur place : à chaque tonne de fonte produite correspond une dépense d'une tonne de coke, et de 3 tonnes environ de minerai ; on trouve donc un avantage réel à établir les hauts-fourneaux au voisinage des mines, et à faire supporter au coke seul de longs transports. Il y a pourtant des circonstances où la règle précédente se trouve en défaut : grâce au faible fret des canaux, et aux tarifs auxquels ont pu consentir les Compagnies de Chemins de fer, par suite des expéditions en sens inverse des charbons et des cokes, les minerais de Meurthe et-Moselle peuvent alimenter avec avantage certains hauts-fourneaux du Nord et de la Belgique.

Lorsque l'on a affaire à des minerais riches, il y a presque toujours avantage à leur faire subir des transports, et à établir les usines à fonte, soit à proximité du charbon, soit dans un grand centre industriel. Tel est le cas des minerais de Carthagène et de ceux de Bilbao et de l'Algérie, des minerais de Cuba, qui commencent à faire à ces derniers, aux États-Unis, une redoutable

concurrence, enfin des minerais du lac Supérieur, qui ont à effectuer un voyage de près de 1 200 kilomètres pour parvenir à leur principal centre d'élaboration, Pittsburg en Pensylvanie.

L'avantage qu'il y a, dans le cas de minerais à haute teneur en fer, à placer les hauts-fourneaux à proximité des mines de houille, tient à deux causes : en premier lieu, les transports brisent le coke et le détériorent ; en second lieu, la dénaturation de la fonte consomme de fortes quantités de combustible, dont le transport grèverait lourdement, sinon le prix de revient de la fonte, du moins celui des produits dérivés, fer et acier, et compenserait, et au-delà, l'économie qu'on pourrait réaliser sur le transport du minerai. Pour ces raisons, les principaux districts houillers sont aussi des pays producteurs de fonte ; tels sont : la Westphalie, où l'on traite, avec les minerais de la Lahn et de la Sieg et les minerais carbonatés des houillères, des minerais de Bilbao, transportés par bateau sur le Rhin ; la Belgique, où les hauts-fourneaux traitent presque exclusivement des minerais importés ; enfin le Pays de Galles, qui traite principalement des hématites de provenance étrangère.

Néanmoins, dans le cas de minerais riches, il peut y avoir avantage, lorsque les transports se

présentent dans des conditions particulières, à placer les fourneaux sur le minerai. C'est alors une question de débouchés. Bien que ce dernier cas soit rare, on peut en citer plusieurs exemples : il existe à Bilbao et près de Bayonne, en France, des hauts-fourneaux qui fonctionnent dans de bonnes conditions, grâce au bas fret des bateaux qui se chargent de coke à l'aller et de minerai au retour. En Angleterre même, les hauts-fourneaux du Cumberland sont exclusivement alimentés par les cokes du Durham et du Northumberland.

Des considérations d'un autre ordre ont déterminé l'établissement des usines à fonte, non au voisinage immédiat des houillères, mais dans de grands centres industriels, peu éloignés des gisements de combustible, où l'on eût toutes facilités pour les expéditions des produits et pour le recrutement d'un personnel ouvrier exercé. C'est ainsi que les hauts-fourneaux de Pittsburg emploient du coke qui supporte 3^{fr},50 de transport pour une distance de 105 à 110 kilomètres. Parfois même, on a été conduit par des raisons commerciales à établir des usines à fonte loin du coke et du minerai : c'est le cas de Chicago, située à moitié distance à peu près des mines du lac Supérieur et de celles de la Pensylvanie, qui

par sa situation de métropole de l'Ouest Américain a pu devenir un centre métallurgique de premier ordre.

Il existe enfin des districts, admirablement favorisés de la nature, où le minerai et le combustible se trouvent pour ainsi dire côte à côte. Tel est le cas du Cleveland, où les hauts-fourneaux sont distants de moins de 30 kilomètres des mines de fer, de 25 à 40 kilomètres des fours à coke du Durham, de 30 à 60 kilomètres des carrières de castine. Le bassin de Glasgow, où les mêmes exploitations fournissent le combustible et le minerai, est plus richement doté encore. Enfin, il ne faut pas oublier, dans cette rapide énumération, les districts récemment ouverts dans les États-Unis du Sud, dans le Tennessee et l'Alabama, où de beaux gisements de minerai de fer et de houille sont en certains points distants de moins d'un kilomètre les uns des autres, et où se développent depuis quelques années des centres industriels qui compteront un jour parmi les plus productifs du monde.

Il est assez malaisé de donner sur les prix de revient dans les divers districts autre chose que des indications peu précises, si l'on veut éviter des détails incompatibles avec le cadre de cet

Aide-Mémoire. Le prix de revient des minerais n'est jamais fort élevé au lieu de production, mais il est souvent doublé et triplé par les frais de transport : c'est ainsi qu'en 1888, tandis qu'on pouvait admettre un prix de revient moyen de 4 francs sur le carreau de la mine, les minerais d'Espagne et d'Afrique valaient 20 à 30 francs dans le centre de la France. Pour les minerais spathiques qu'il faut soumettre à un grillage préalable, le prix de revient se trouve grevé : 1° du déchet au grillage, correspondant à la teneur en CO_2 ; 2° des frais de grillage qui varient de 0^{fr},50 à 0^{fr},75 par tonne. Les fondants valent rarement plus de 1 franc au haut-fourneau, à moins qu'on n'ait à leur faire subir des transports excessifs. A Middlesborough, la castine revient à l'usine à 1^{fr},75 la tonne. Quant aux combustibles, leur valeur est extrêmement variable. Le charbon de bois valait, il y a quelques années, en Autriche, 20 à 25 francs par tonne, en forêt : ce prix était majoré de $\frac{1}{2}$ à $\frac{1}{3}$ par les transports et les déchets. En Angleterre, le charbon de bois vaut aux usines de 60 à 100 francs. En Norwège, il vaut de 37 à 50 francs. Pour le coke, le prix de revient dépend principalement de la valeur de la houille et de son rendement : car les frais de fabrication (entretien

des appareils et fours, et main-d'œuvre), n'atteignent, en général, pas 1 franc par tonne. La valeur de ces diverses matières premières est d'ailleurs essentiellement variable, et dépend des conditions industrielles ou commerciales qui se transforment d'année en année. A titre d'indication, nous allons brièvement passer en revue les principaux centres de production de la fonte, en disant quelques mots de la valeur des éléments les plus importants du prix de revient.

En Meurthe-et-Moselle, le minerai et la castine reviennent aux usines à moins de 4 francs. Dans certaines régions, ce prix s'abaisse même entre 2^{fr},50 et 3 francs. Le coke valait, au début de 1893, 21 à 22 francs dans les environs de Longwy. En admettant une consommation de 3 tonnes de minerai et de 1 100 kilog. de coke par tonne de fonte, on voit que le prix de revient des fontes de moulage était voisin de 40 francs, non compris les frais d'amortissement et d'intérêt du capital de premier établissement.

En Belgique, les conditions sont plus avantageuses au point de vue du coke, qui revient actuellement aux usines à raison de 13 francs, et dont le prix s'était, depuis 2 ou 3 ans, abaissé

à 11 francs : elles sont, au contraire, moins avantageuses au point de vue du minerai, qui provient du Luxembourg, de Meurthe-et-Moselle, ou d'Espagne et d'Afrique. Il y a 6 ans environ, M. Wolters indiquait un prix de revient moyen de 36^{fr},25 par tonne de fonte.

Dans le Cleveland, le minerai cru vaut 5 francs aux fourneaux (y compris 1^{fr},50 de transport). La perte de 25 % à la calcination porte son prix à 6^{fr},25. Les frais de grillage s'élèvent à 0^{fr},60. La tonne de minerai grillé, tenant 42 % de fer, revient donc à 6^{fr},85 à l'usine. Au point de vue du coke, ce district est admirablement situé : les charbons du Durham, situés à faible distance, donnent sans lavage un excellent coke, tenant 6,5 % de cendres, qui valait, au printemps 1892, 16^{fr},25 à l'usine (y compris 2^{fr},50 de transport), prix qui s'est depuis lors relevé de plus de 2 francs. Le prix de revient de la fonte de moulage s'établissait donc de la façon suivante, pour la fonte de moulage n° 3 :

Minerai : 2 400 ^k s à 6 ^{fr} ,85 . . .	16 ^{fr} ,44
Castine : 525 à 1,75. . .	0,92
Coke . : 1 050 à 16,25. . .	17,06
Frais de fabrication.	5,50
Total (non compris les frais d'amortissement et d'inté- rêt du capital de 1 ^{er} éta- blissement)	39 ^{fr} ,92.

Les fontes d'hématite reviennent plus cher. A l'époque dont il s'agit, le rubio 1^{re} qualité valait environ 10 francs chargé en p. rt de Bilbao. En y ajoutant un fret de 7 francs environ, on arrivait à un prix de 17 francs par tonne aux usines du Cleveland.

Dans le Cumberland et le Lancashire, les hauts-fourneaux traitent des hématites extraites d'amas irréguliers, qui valaient, au printemps 1892, 11 francs pour le tout-venant, 13^{fr},55 pour le criblé. Le coke, qui provient du Durham et du Northumberland, a à subir 7 à 8 francs de frais de transport : ce qui portait sa valeur à 21 ou 22 francs.

Les matières premières entraînent donc, dans le prix de revient de la fonte, pour 45 francs environ.

Dans le bassin de Glasgow, on emploie comme combustible de la houille sèche, à 40 % de matières volatiles, tenant 3 % de cendres, dont le prix aux usines ne dépasse pas 10 à 12 francs. Le minerai des houillères vaut aux puits, après grillage, 16^{fr},25 pour le *blackband*, 12^{fr},50 pour le *clayband* : prix qui doivent être majorés de 1^{fr},85 environ pour frais de transport. La consommation de combustible s'élève à 2 100 kilog. par tonne de fonte de moulage.

Dans la Westphalie et la Prusse Rhénane, les conditions économiques de la fabrication de la fonte sont fort avantageuses : aux bords du Rhin les minerais du Luxembourg valaient, au printemps 1894, la minette rouge, 40 francs environ, la minette jaune, 30 francs et la minette grise, 31 à 32 francs. Au moyen des hématites brunes de la Lahn et de la Sieg, dont la haute teneur en manganèse (8 %) a porté la valeur, en 1888, jusqu'à 25 francs, des minerais houillers de Dortmund, qui valaient 11 à 13 francs sur le marché d'Essen, et des minerais de Bilbao et d'Afrique, qui, grâce à la navigation du Rhin revenaient à 29 francs environ aux usines, on constitue un lit de fusion tenant en moyenne 37 % de fer. Le coke de Sarrebrück tient 11 à 12 % de cendres. Le coke de Westphalie, très dur et peu cendreux, mais qui a l'inconvénient d'être plus sulfureux que celui du nord de la France, constitue un excellent combustible, dont la valeur sur le carreau des mines, après être tombée à 6 francs en 1886, s'est relevée récemment à 13^{fr},75, et qui n'a à subir qu'un transport de 20 kilomètres au maximum jusqu'aux hauts-fourneaux.

Dans l'Alabama, le prix de revient de la

fonte Thomas s'établissait, en 1891, comme suit :

Minerai (à 40 $\frac{0}{100}$)	24,5 à 5 ^{fr}	12 ^{fr} ,50
Coke	1,15 à 14,50	14,35
Castine	0,25 à 2	0,50
Frais de fabrication		13,50
Total (non compris l'intérêt et l'amortissement)		<u>40,85.</u>

Dans le nord des États-Unis, en Pensylvanie, par exemple, les conditions économiques sont moins avantageuses. Le minerai du lac Supérieur — tenant 62 à 65 $\frac{0}{100}$ — valait, en 1891, 30 francs par tonne aux ports du lac Érié (Cleveland) et avait à supporter par voie de terre un fret de 5^{fr},25 jusqu'à Pittsburg. Aussi, bien que le coke revint aux usines à moins de 10 francs, le prix de revient total n'était-il pas inférieur à 75 francs pour la fonte grise d'affinage, et à 77^{fr},50 pour la fonte Bessemer, non compris les frais d'intérêt et d'amortissement du capital de premier établissement; et il ne paraît pas possible que ces prix s'abaissent jamais au-dessous de 60 francs.

La revue rapide qui précède ne peut évidemment donner que des indications très générales. Les prix de revient présentent d'ailleurs dans un même district, et dans une même usine, des écarts considérables, suivant que des fabrications particulières exigent l'emploi de mine-

rais spéciaux, — par exemple de minerais manganésés — et des consommations plus fortes de combustible.

Nous terminons ces indications en donnant, d'après la *Statistique de l'Industrie minière*, quelques chiffres relatifs à la production de la fonte en 1891 :

Pays de production	Tonnes
France	1 897 000
Grande-Bretagne et Irlande . . .	7 525 000
Prusse.	3 288 000
Saxe	34 000
Bavière	77 000
Autres Pays d'Allemagne	731 000
Grand-Duché de Luxembourg . . .	545 000
Belgique	684 000
Autriche.	617 000
Hongrie et Croatie-Slavonie. . . .	285 000
Italie	14 000
Russie.	926 000
Suède	491 000
Norvège	800
Espagne	165 000
États-Unis	8 411 000
Canada	20 000
Australie.	3 500
Total	25 714 000

BIBLIOGRAPHIE

- HASSENFRATZ. — *La Sidérotechnie*. Paris, Firmin-Didot, 1812.
- KARSTEN. — *Handbuch der Eisenhüttenkunde*. Berlin, Fr. LONE, 1827. G. Reimer, 1841.
- *Manuel de la métallurgie du fer*. Trad. Culmann. Metz, Thiel, 1830.
- VALERIUS. — *Traité théorique et pratique de la fabrication de la fonte*. Paris, Liège, Mathias, 1851.
- BRUNO KERL. — *Handbuch der metallurgischen Hüttenkunde*. Freiberg, J.-G. Engelhardt, 1861.
- JULLIEN. — *Traité théorique et pratique de la métallurgie du fer*. Paris, Liège, Noblet, 1861.
- PERCY. — *Metallurgy*. Londres, J. Murray, 1864.
- *Traité complet de métallurgie*. Trad. Petigrand et Ronna, Paris, Baudry, 1864.
- HAUER (RITTER VON). — *Die Hüttenwesens-Maschinen*. Vienne, Tandler et C^{ie}, 1867.
- AKERMANN. — *Studien über die Wärme-Verhältnisse des Eisenhohofen-Prozesses*. Trad. Tunner. Leipzig, A. Felix, 1872.
- JORDAN (S.). — *Album du cours de métallurgie professé à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures*. Paris, Baudry, 1874-75.
- GRÜNER (L.). — *Traité de métallurgie*. Paris, Dunod, 1875.

- GRÜNER. — *Etudes sur les hauts-fourneaux*. Paris, Dunod, 1873.
- GRÜNER (E.). — *Mémoire sur la situation de la métallurgie du fer en Styrie et en Carinthie*. Paris, Dunod, 1876.
- GUETTIER. — *La Fonderie en France*. Paris, Bernard, 1882.
- KERPELY (RITTER VON). — *Die Anlage und Einrichtung der Eisenschmelzwerke (Hohofen Anlagen)*. Leipzig, Arthur Felix, 1884.
- LEDEBUR. — *Handbuch der Eisenhüttenkunde*. Leipzig, A. Felix, 1884.
- BELL (SIR I. LOWTHIAN). — *Principles of the Manufacture of Iron and Steel*. Londres, Geo. Routledge, 1884.
- *Trad. Hallopeau*. Paris, Baudry, 1888.
- VATHAIRE (de). — *Construction et conduite des hauts-fourneaux*. Paris, Baudry, 1885.
- BALLING. — *Die Metallhüttenkunde*. Berlin, J. Springer, 1885.
- BRESSON. — *Métallurgie de la fonte et du fer. Encyclopédie Chimique*. Paris, Dunod, 1888.
- OSMOND. — *Études métallurgiques*. Paris, Dunod, 1888.
- *Transformations du fer et du carbone dans les fers, les aciers et les fontes blanches*. Paris, Baudoin, 1888.
- DÜRRE. — *Allgemeine Hüttenkunde*. Leipzig, J. Weber, 1877.
- *Die Anlage und der Betrieb der Eisenhütten*. Leipzig, Baumgartner, 1882, 1884, 1892.
- HELSON (CYRIAQUE). — *La Sidérurgie en France et à l'Étranger*. Paris, Bernard, 1891-1893.

LE VERRIER (U.). — *Cours de Métallurgie professé à l'École des Mines de St-Étienne*. St-Étienne, Chevalier, 1^{re} partie, 1887, 3^e partie, 1894.

Outre les ouvrages mentionnés ci-dessus, il faut citer les publications périodiques suivantes, où ont paru d'importants mémoires sur la métallurgie de la fonte :

Annales des Mines. Dunod, Paris.

Le Génie Civil. Paris.

Bulletin de la Société de l'Industrie Minérale. Saint-Étienne.

Comptes Rendus Mensuels de la Société de l'Industrie Minérale. Saint-Étienne.

Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils. Paris.

Revue Universelle des Mines et de la Métallurgie. Liège.

Journal of the Iron and Steel Institute. Londres.

Engineering. — Londres.

The Engineering Review. Londres.

The Iron Age. Londres.

Stahl und Eisen. Schröder, Düsseldorf.

Zeitschrift für das Berg-Hütten-u. Salinenwesen im Preussischen Staate. W. Ernst u. Sohn, Berlin.

Berg- u. Hüttenmännisches Jahrbuch. Vienne.

Berg- u. Hüttenmännische Zeitung. A. Felix, Leipzig.

Engineering and Mining Journal. Scientific Publishing Company. New-York.

Transactions of the American Institute of Mining Engineers. New-York.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

PARTIE THÉORIQUE

	Pages.
CHAP. I. <i>Réactions du haut-fourneau . . .</i>	5
CHAP. II. <i>Bilan calorifique du haut-four- neau</i>	39
CHAP. III. <i>Profil et allure des hauts-four- neaux</i>	53
CHAP. IV. <i>Roulement des hauts-fourneaux . . .</i>	74

DEUXIÈME PARTIE

PARTIE PRATIQUE

CHAP. V. <i>Le haut-fourneau et ses accessoires.</i>	105
CHAP. VI. <i>Conduite du haut-fourneau . . .</i>	151
CHAP. VII. <i>Exemples d'applications</i>	170
CHAP. VIII. <i>Prix de revient. Statistique . . .</i>	194
BIBLIOGRAPHIE	209

~~SPAMAND~~ (CHER). IMPRIMERIE DESTENAY, BUSSIÈRE FRÈRES

LIBRAIRIE G. MASSON, 120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS.

CLINIQUE MÉDICALE DE LA CHARITÉ

LEÇONS & MÉMOIRES

Par le professeur **POTAIN**
et ses collaborateurs

Ch. A. François-Franck
Professeur suppléant au Collège de France

E. Suchard
Chef de laboratoire d'anatomie pathologique

H. Vaquez
Chef de clinique à la Faculté de Médecine

P. J. Teissier
Interne des Hôpitaux de Paris

1 fort vol. in-8° de 1,060 p. avec nombreuses fig. dans le texte. 30 fr.

Ce volume contient tout d'abord des *leçons* du professeur, recueillies par M. VAQUEZ. Celles qui ont été choisies se rapportent toutes aux maladies du cœur. Voici les titres des principales : *Séméiologie cardiaque* (9 leçons, palpation, percussion, auscultation, signes fonctionnels). *Endocardite rhumatismale aiguë*; *Rythme mitral*. *Le cœur des tuberculeux*. *Les cardiopathies réflexes*. *Néuropathies d'origine cardiaque*. *Symphixie cardiaque*. *Pronostic*. *Traitement* (3 leçons).

Le reste du livre est composé de travaux et de recherches poursuivis dans le service : deux mémoires de M. POTAIN (*des souffles cardio-pulmonaires et du choc de la pointe du cœur*), sont la démonstration complète de certains points de la séméiologie cardiaque, qui sont également tranchés dans les leçons.

M. VAQUEZ a donné un mémoire sur la *Phlébite des membres*; M. TEISSIER a rédigé les *Rapports du rétrécissement mitral pur avec la tuberculose*; M. SUCHARD a fourni un intéressant travail sur la *Technique des autopsies cliniques*.

Enfin, M. FRANÇOIS-FRANCK a rédigé pour ce volume un très important mémoire, *l'Analyse de l'action expérimentale de la digitaline*, qui est le développement d'une leçon faite par lui aux élèves de la Charité.

L'ensemble de ce volume forme donc un tout traitant tout spécialement des maladies du système circulatoire.

TRAITÉ DES MALADIES DES YEUX

Par Ph. PANAS

Professeur de clinique ophtalmologique à la Faculté de Médecine
Chirurgien de l'Hotel-Dieu — Membre de l'Académie de Médecine

2 vol. gr. in-8° avec 453 fig. et 7 pl. coloriées, cartonnés. . . 40 fr.

Dans cet ouvrage, l'auteur s'est attaché à donner d'une façon concise l'état actuel de la science ophtalmologique en prenant pour base la clinique sans négliger l'enseignement et les recherches de laboratoire. — Le premier volume comprend l'anatomie, la physiologie, l'embryologie, l'optique et la pathologie du globe de l'œil. Il se termine par l'instruction ministérielle sur l'aptitude au service militaire. — Le second contient ce qui a trait à la musculature, aux paupières, aux voies lacrymales, à l'orbite et aux sinus cranio-faciaux; le tout envisagé au point de vue de l'anatomie, de la physiologie et de la pathologie. Vu l'intérêt qui s'y rattache, les articles consacrés à la cataracte, au glaucome et à l'ophtalmie sympathique constituent autant de monographies. En un mot, essentiellement pratique, ce livre s'adresse autant aux étudiants qu'aux ophtalmologues de profession.

TRAITÉ DE MÉDECINE

Publié sous la direction de MM. CHARCOT et BOUCHARD, membres de l'Institut et professeurs à la Faculté de médecine de Paris, et BRISSAUD, professeur agrégé, par MM. BABINSKI, BALLEZ, BLOCH, BRAULT, CHATELAIN, CHARRIN, CHAUFFARD, COURTOIS-SUFFIT, GILBERT, GEORGES GUINON, L. GUINON, HALLION, LAMY, LE GENDRE, MARFAN, MARIE, MATHIU, NETTER, OËTINGER, ANDRÉ PETIT, RICHARDIÈRE, ROGER, RUAULT, THIBIERGE, THOINOT, FERNAND VIDAL. 6 vol. in-8. avec figures (5 vol. publiés au 1^{er} août 1893).
Prix de ces 5 vol. 102 fr.

Cet ouvrage sera complété par la publication d'un tome sixième et dernier.

TRAITÉ DE CHIRURGIE

Publié sous la direction de MM. Simon DUPLAY, professeur de clinique chirurgicale à la Faculté de médecine de Paris, et Paul RECLUS, professeur agrégé, par MM. BERGER, BROCA, Pierre DELBET, DELENS, GÉRARD-MARCHANT, FORGUE, HARTMANN, HEYDENREICH, JALAGUIER, KIRMISSON, LAGRANGE, LEJARS, MICHAUX, NÉLATON, PEYROT, PONCET, POTHEBAT, QUÉNU, RICARD, SEGOND, TUFFIER, WALTHER. 8 forts volumes in-8, avec nombreuses figures 150 fr.

LEÇONS DE THÉRAPEUTIQUE

Par le Dr Georges HAYEM, professeur à la Faculté de médecine de Paris, Membre de l'Académie de médecine.

Les 4 premiers volumes des leçons de thérapeutique comprennent l'ensemble des *Médications* et sont ainsi divisés :

Première série. — Médications. — Médication désinfectante. — Médication sténique. — Médication antipyrétique. — Médication antiphlogistique. 8 fr.

Deuxième série. — De l'action médicamenteuse. — Médication antihydro-pique. — Médication hémostatique. — Médication reconstituante. — Médication de l'anémie. — Médication du diabète sucré. — Médication de l'obésité — Médication de la douleur 8 fr.

Troisième série. — Médication de la douleur (suite). — Médication hypno-tique. — Médication stupefiante. — Médication antispasmodique. — Médication excitatrice de la sensibilité. — Médication hypercinétique. — Médication de la kinésiraxie cardiaque. — Médication de l'asthénie. — Médication de l'ataxie et de la neurasthénie cardiaque. 8 fr.

Quatrième série. — Médication antidyspeptique. — Médication antidyspnéique. — Médication de la toux. — Médication expectorante. — Médication de l'albuminurie. — Médication de l'urémie. — Médication antisadorale. . . . 12 fr.

Les Agents physiques : agents thermiques, électricité, modifications de la pression atmosphérique, climats et eaux minérales, 1 vol. in-8^o avec nombreuses fig. dans le texte et une carte des eaux minérales et des stations climatériques. 12 fr.

BIBLIOTHÈQUE DE CRIMINOLOGIE

(Collection grand in-8°).

La Philosophie pénale par G. Tarde, Chef de Bureau de la Statistique au Ministère de la Justice. **Troisième Edition.** Revue et corrigée. 1 vol. . . . 7 fr. 50

Ce volume renferme les chapitres suivants : Considérations générales. — L'École positiviste. — Théorie de la responsabilité. — Théorie de l'irresponsabilité. — Le criminel. — Le crime. — Le jugement. — La peine. — La peine de mort.

Études Pénales et Sociales par G. Tarde, Chef de Bureau de la Statistique au Ministère de la Justice. 1 volume 6 fr. »

Ce volume renferme les divisions suivantes : Le duel. — Le délit politique. — L'atavisme moral. — L'amour morbide. — Quatre crimes passionnels. — L'archéologie criminelle en Périgord. — La crise de droit moral et la crise de droit pénal. — Études criminelles et pénales. — L'idée de culpabilité. — Les lois de l'imitation. — Dépopulation et civilisation. — Les idées sociologiques de Guyau. — Le suffrage dit universel.

Les Palimpsestes des Prisons recueillis par le professeur **Cesar Lombroso.** 1 gros volume orné de 33 dessins et d'une planche graphique statistique 6 fr. »

Ce volume renferme les divisions suivantes : Les Camarades. — La Justice. — Le Détenu. — Céramique et épigraphes criminelles. — Le délit. — La Prison. — Passions. — Religion et morale. — Le livre. — Politique. — Lyriques. — Agonie. — Femmes. — Palimpsestes étrangers.

Les Habités des Prisons de Paris Étude d'Anthropologie et de Psychologie criminelles par le Dr **Emile Laurent,** ancien interne à l'Infirmerie centrale des Prisons de Paris. 1 volume avec 70 figures dans le texte et 14 portraits en phototypie 10 fr. »

Ce volume renferme les chapitres suivants : La population des Prisons de Paris. — Héritéité des criminels. — Criminels d'accidents et criminels d'occasion. — Mendiants et Vagabonds. — Criminels d'habitude. — Faux moraux et criminels nés. — Histoire d'un criminel. — Les dégénérés dans les prisons. — Les Épileptiques. — Les Hystériques. — Les Intoxiqués. — Les Aliénés. — L'âme des criminels. — Croyances et religion. — L'Argot. — L'Écriture. — La Littérature. — Les Beaux-Arts. — Les Tatouages. — Les Criminels dans la Société. — Du Suicide. — Les Simulateurs. — Différents genres de délits. — Influence des milieux. — Les Châtiments peines.

Le Crime à Deux Essai de psychologie morbide par **Scipio Sighele,** traduit sur la 2e édition italienne par Vincent Palmet. 5 fr. »

Divisions de l'ouvrage : La Suggestion dans le Crime. — Le couple saint le couple suicide et le couple fou. — Le couple criminel. — Les couples dégénérés. — Les libéricides. — L'évolution du suicide au meurtre dans le, drames d'amour.

REVUE DES SCIENCES

Et de leurs Applications aux Arts et à l'Industrie

*

Journal Hebdomadaire Illustré

RÉDACTEUR EN CHEF

Gaston TISSANDIER



Recettes et Procédés Utiles

Récréations Scientifiques

Actualités Scientifiques

Boîte aux Lettres



VINGT-ET-UNIÈME ANNÉE

~~~~~

42 VOLUMES

Publiés



*Les Abonnements et Renouvellements sont reçus*

à la Librairie G. MASSON

120, BOULEVARD ST-GERMAIN, PARIS

Un an : Paris, 20 fr, Départements, 25 fr. Union postale, 26 fr.

Six mois — 10 fr. — 12 fr. 50 — 13 fr.

Le Numéro : 50 Centimes

PRIX

d'Abonnements :

\*

Renouvellement d'Abonnement au 1<sup>er</sup> Juin 1894

LE  
**CONSTRUCTEUR**

PRINCIPES, FORMULES, TRACÉS, TABLES ET RENSEIGNEMENTS  
POUR L'ÉTABLISSEMENT

**DES PROJETS DE MACHINES**

A l'usage des Ingénieurs, Constructeurs, Architectes, Mécaniciens, etc.

**Par F. REULEAUX**

TROISIÈME ÉDITION FRANÇAISE

**Par A. DEBIZE**

Ingénieur en chef des Manufactures de l'Etat

1 vol. in-8 de 12 pages avec 1184 grav. dans le texte. 30 fr.

Deux éditions successivement épuisées prouvent l'accueil qu'a reçu cet ouvrage et les services qu'il a rendus.

La première partie qui comprend la **Résistance des Matériaux** donne, sous une forme très simple, toutes les formules dont l'emploi peut présenter quelque utilité dans la pratique. Ces formules se trouvent du reste accompagnées de figures et d'observations indiquant clairement les conditions dans lesquelles elles sont applicables; leur usage se trouve, en outre, facilité par une série d'exemples, convenablement choisis.

La seconde partie est consacrée à l'exposé des principes de la **Graphostatique** avec des exemples de son application à la construction des bâtiments et à celle des machines.

La troisième partie est relative à la **Construction des éléments de machines**. Elle est de beaucoup la plus développée, puisque chaque organe tel que les bielles, les traverses, les roues dentées, les transmissions, etc., etc., est l'objet d'un chapitre.

Enfin la quatrième partie renferme une **Série de tables** reproduisant sous une forme commode, divers éléments de calculs, dont le constructeur a constamment besoin, tels que tracés de courbes, surfaces, volumes, moments d'inertie, racines, etc.

LIBRAIRIE G. MASSON. 120, BOULEVARD ST-GERMAIN, PARIS

WAGNER, FISCHER et L. GAUTIER

TRAITÉ  
DE CHIMIE INDUSTRIELLE

*A l'usage des Chimistes, des Ingénieurs, des Industriels, des Fabricants de produits chimiques, des Agriculteurs, des Écoles d'arts et manufactures et d'arts et métiers, etc., etc.* Troisième édition française entièrement retouchée, publiée d'après la treizième édition allemande. Deux beaux volumes grand in-8° formant ensemble 1760 pages avec 736 gravures dans le texte. 30 fr.

S'il est un livre qui s'impose aux fabricants, aux ingénieurs, aux chimistes et à tous ceux qui étudient, c'est certainement celui qui peut non seulement les initier aux difficultés de leur art, mais encore les tenir au courant des progrès de la science et de l'industrie.

Faire l'histoire de ces industries, les grouper méthodiquement, en donner les secrets et les procédés, décrire en un mot l'ensemble de toutes les industries chimiques, tel est le but de cet ouvrage.

Le *Tome premier* comprend la métallurgie chimique, les matières et produits inorganiques, les matières et produits organiques.

Le *Tome second* comprend la fabrication du verre, des substances alimentaires, la technologie chimique des fibres textiles, les industries du erases, les combustibles et appareils de chauffage, les matières éclairantes et l'éclairage.

TRAITÉ COMPLET  
D'ANALYSE CHIMIQUE  
APPLIQUÉE AUX ESSAIS INDUSTRIELS

Par **J. Post**, Professeur à l'Université de Göttingue, avec la collaboration de plusieurs chimistes, traduit de l'allemand, par **L. Gautier** et **P. Kienlen**, 1 fort vol. grand in-8 avec 274 fig. dans le texte . . . . . 28 fr.

Divisions de l'Ouvrage :

I. Essai de l'eau. — II et III. Détermination de la composition chimique et calorifique des combustibles. — IV. Pyrométrie. — V. Gaz d'éclairage. — VI. — Hydrocarbures solides et liquides du règne minéral. — VII. Métaux. — VIII. Acides inorganiques, sels alcalins, chlorure de chaux. — IX. Engrais commerciaux. — X. Matières exposibles et allumettes. — XI. Chaux et ciments. — XII. Matières grasses (graisses et huiles, stéarine, glycérine, savons, matières grasses lubrifiantes). — XIII. Amidon et fécule. Dextrine. Sucre. — XIV. Bière. — XV. Vin. — XVI. Alcool et levure pressés. — XVII. Vinaigre, acide acétique, acétates et esprit de bois. — XVIII. Cuir et colle. — XIX. Sels métalliques. — XX. Matières colorantes. — XXI. Poteries. — XXII. Verre.

---

**Traité de Botanique** par PH. VAN TIEGHEM, membre de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire Naturelle. **Deuxième Edition** revue et augmentée. Tome I. Botanique générale. Tome II. Botanique spéciale. 2 volumes grand in-8°, de 1856 pages, avec 1213 gravures dans le texte. . . . . 30 fr. »

---

**Éléments de Botanique** par PH. VAN TIEGHEM, membre de l'Institut, professeur au Muséum d'Histoire Naturelle. **Deuxième Edition.** 2 volumes in-18 jésus de 1050 pages avec 550 gravures dans le texte. . . . . 10 fr. »

---

**Traité de Géologie** par A. DE LAPPARENT, ancien ingénieur au corps des mines, professeur à l'Institut catholique de Paris. **Troisième Edition** entièrement revue. 2 volumes grand in-8° de 1660 pages avec 700 gravures dans le texte . . . . . 24 fr. »  
*Ouvrage couronné par l'Institut de France.*

**DIVISIONS DE L'OUVRAGE :** Phénomènes actuels. — Morphologie terrestre. Géodynamique externe. Géodynamique interne. — Géologie proprement dite. Notions fondamentales sur la composition de l'écorce terrestre. Description des formations stratifiées. Formation d'origine interne et éruptives. Orogénie et théories géogéniques.

---

**Abrégé de Géologie** par A. DE LAPPARENT, ancien ingénieur au corps des mines, professeur à l'Institut catholique de Paris. **Deuxième Edition** entièrement refondue. 1 vol. in-18 de 280 pages avec 134 gravures et 1 carte géologique de la France chromolithographiée . . . . . 3 fr. 25

---

**Cours élémentaire de Géologie Stratigraphique** par CH. VÉLAIN. **Quatrième Edition** entièrement refondue. 1 vol. in-18 de 576 pages avec 435 gravures dans le texte et une carte géologique de la France imprimée en couleur. 4 fr. 50

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS  
Envoi franco contre mandat-poste ou valeur sur Paris

# COURS DE PHYSIQUE

DE  
L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

PAR M. J. JAMIN

QUATRIÈME ÉDITION

AUGMENTÉE ET ENTIÈREMENT REFOUNDUE,

PAR

M. BOUTY,

Professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

Quatre Tomes in-8, de plus de 4000 pages, avec 1587 figures et  
14 plaques sur acier, dont 2 en couleur; 1885-1891. (OUVRAGE  
COMPLET) . . . . . 72 fr.

On vend séparément :

TOME I. — 9 fr.

- (\*) 1<sup>er</sup> fascicule. — *Instruments de mesure. Hydrostatique*; avec 150 fig.  
et 1 planche . . . . . 5 fr.  
2<sup>e</sup> fascicule. — *Physique moléculaire*; avec 93 figures . . . . . 4 fr.

TOME II. — CHALEUR. — 15 fr.

- (\*) 1<sup>er</sup> fascicule. — *Thermométrie. Dilatations*; avec 98 fig. . . . . 5 fr.  
(\*) 2<sup>e</sup> fascicule. — *Calorimétrie*; avec 48 fig. et 2 planches . . . . . 5 fr.  
3<sup>e</sup> fascicule. — *Thermodynamique. Propagation de la chaleur*;  
avec 47 figures . . . . . 5 fr.

TOME III. — ACOUSTIQUE; OPTIQUE. — 22 fr.

- 1<sup>er</sup> fascicule. — *Acoustique*; avec 123 figures. . . . . 4 fr.  
(\*) 2<sup>e</sup> fascicule. — *Optique géométrique*; avec 139 figures et 3 plan-  
ches . . . . . 4 fr.  
3<sup>e</sup> fascicule. — *Étude des radiations lumineuses, chimiques et*  
*colorifiques; Optique physique*; avec 249 fig. et 5 planches, dont  
2 plaques de spectres en couleur . . . . . 14 fr.

(\*) Les matières du programme d'admission à l'École Polytechnique sont comprises dans  
les parties suivantes de l'Ouvrage : Tome I, 1<sup>er</sup> fascicule; Tome II, 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> fascicules;  
Tome III, 2<sup>e</sup> fascicule.

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS**

**TOME IV (1<sup>re</sup> Partie). — ÉLECTRICITÉ STATIQUE ET DYNAMIQUE. — 13 fr.**

- 1<sup>er</sup> fascicule. — *Gravitation universelle. Électricité statique; avec 155 fig. et 1 planche* . . . . . 7 fr.
- 2<sup>e</sup> fascicule. — *La pile. Phénomènes électrothermiques et électrochimiques; avec 161 fig. et 1 planche* . . . . . 6 fr.

**TOME IV. — (2<sup>e</sup> Partie). — MAGNÉTISME; APPLICATIONS. — 13 fr.**

- 3<sup>e</sup> fascicule. — *Les aimants. Magnétisme. Electromagnétisme. Induction; avec 240 figures.* . . . . . 8 fr.
- 4<sup>e</sup> fascicule. — *Météorologie électrique; applications de l'électricité. Théories générales; avec 84 fig. et 1 pl.* . . . . . 5 fr.

**TABLES GÉNÉRALES.**

*Tables générales, par ordre de matières et par noms d'auteurs, des quatre volumes du Cours de Physique. In-8; 1891* . . . . . 60 c.

*Tous les trois ans, un supplément, destiné à exposer les progrès accomplis pendant cette période, viendra compléter ce grand Traité et le maintenir au courant des derniers travaux.*

Pour ne pas trop grossir un ouvrage déjà bien volumineux, il a fallu dans cette nouvelle édition en soumettre tous les détails à une révision sévère, supprimer ce qui avait quelque peu vieilli, sacrifier la description d'appareils ou d'expériences qui, tout en ayant fait époque, ont été rendus inutiles par des travaux plus parfaits; en un mot, poursuivre dans ses dernières conséquences la transformation entreprise non sans quelque timidité dans l'édition précédente. Au reste, pour tenir un livre au courant d'une Science dont le développement est d'une rapidité si surprenante, et dans laquelle un seul résultat nouveau peut modifier jusqu'aux idées même qui servent de base à l'enseignement, il ne suffit pas d'ajouter des faits à d'autres faits: c'est l'ordre, l'enchaînement, la contexture même de l'ouvrage qu'il faut renouveler. On se ferait donc une idée inexacte de cette quatrième édition du *Cours de Physique de l'École Polytechnique* en se bornant à constater que ces quatre Volumes se sont accrus de près de 500 pages et de 150 figures, soit de un septième environ; les modifications touchent, pour ainsi dire, à chaque page et c'est en réalité au moins le tiers du texte qui a été écrit à nouveau d'une manière complète.

**HERZBERG (Wilhelm)**, Directeur du Bureau Royal d'Analyse des papiers à Berlin. — **Analyse et essais des papiers**, suivis d'une *Etude sur les papiers destinés à l'usage administratif en Prusse (Normal-Papier)*, par *Carl Hoffmann*, Ingénieur civil, Directeur de la *Papier Zeitung*. Ouvrage avec figures et 2 planches; 1894. . . . . 5 fr.

Ce livre intéresse non seulement le fabricant, mais encore et surtout le consommateur qui y trouvera le moyen de se rendre compte, sans intervention étrangère, des qualités du papier qu'il aura choisi. Chaque industrie tributaire du papier a besoin de produits qui lui sont spéciaux; et si habile qu'on soit devenu à apprécier à l'apparence, il est difficile de pouvoir affirmer *a priori* si un papier convient ou non à un emploi déterminé. Les procédés décrits permettent de remédier à cet inconvénient et pourront être appliqués par tout manufacturier ayant quelques notions scientifiques élémentaires. On pourra donc contrôler soi-même la solidité d'un papier, sa teneur en cendres, la composition de la pâte, etc.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS

ENCYCLOPÉDIE

# DES TRAVAUX PUBLICS

FONDÉE PAR

M. M.-C. LECHALAS

Inspecteur général des Ponts et Chaussées

**BRICKA C.**), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Ingénieur en chef de la voie et des bâtiments aux Chemins de fer de l'Etat. — **Cours de Chemins de fer, professé à l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.** 2 beaux volumes grand in-8, se vendant séparément.

TOME I : *Etudes. — Construction. — Voie et appareils de voie.* Avec 326 figures, 1894 . . . . . 20 fr.

TOME II : *Matériel roulant. — Traction. — Exploitation technique. — Exploitation commerciale. — Tarifs. — Régime des concessions. — Dépenses de construction et d'exploitation. — Appendice : Chemins de fer de systèmes divers ;* 1834 Paraitra à la fin de 1894 .

L'émment ingénieur Sévèns, qui a longtemps professé le Cours de Chemins de fer à l'Ecole des Ponts et Chaussées, avait fait autographier ses Leçons ; mais cet Ouvrage est épuisé depuis longtemps, — et d'ailleurs, si grande qu'ait été sa valeur, il ne serait plus au courant des progrès réalisés depuis cette époque. Aussi M. Bricka a-t-il rendu un service signalé à tous ceux qui s'intéressent à l'art de l'ingénieur en publiant l'Ouvrage considérable que nous annonçons et qui contient non seulement les matières du cours oral, mais beaucoup de questions et bien des détails que les Leçons ne peuvent donner.

Cette œuvre émane d'un homme qui a beaucoup fait, beaucoup vu faire, et qui maintenant dirige l'un des grands services des Chemins de fer de l'Etat, en même temps qu'il enseigne à nos futurs ingénieurs la plus difficile des parties de leur art. C'est dire qu'elle apporte une puissante contribution à toutes les questions relatives aux Chemins de fer.

**Titres des Chapitres :** Etudes préalables. Etudes définitives. Construction. Bâtiments. Présentation des projets. Voie proprement dite. Appareils de voie. Signaux et enclenchements. Prix des principaux appareils de voie. Entretien et surveillance. Annexes. Lois, décrets et ordonnances. Cahier des charges. Conditions d'épreuves. Note sur les procédés d'injection des traverses.

**DENFER J.**), Architecte, Professeur à l'École Centrale. — **Architecture et constructions civiles. — Couvertures des édifices.** — *Ardoises, tuiles, métaux, matières diverses, cheneaux et descentes.* Grand in-8 de 468 pages, avec 423 figures ; 1893 . . . . . 20 fr.

M. Denfer est connu par les grands travaux qu'il a exécutés à Paris et en province et par le succès de ses ouvrages précédents : *Maçonnerie ; Charpente en bois et menuiserie.*

La *Couverture des édifices* est une de ces monographies de spécialités destinées à rester longtemps classiques, tant elles sont complètes, claires, bien illustrées de dessins exacts pouvant servir dans les applications. Elle se divise en huit chapitres dont voici les titres :

CHAP. I : *Considérations générales.* — CHAP. II : *Couvertures en ardoises.* — CHAP. III : *Couvertures en pierres, ciments et asphaltes.* — CHAP. IV : *Couvertures*



## LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS

en tuiles. — CHAP. V : Couvertures en verre. — CHAP. VI : Couvertures métalliques. — CHAP. VII : Couvertures en matériaux ligneux. — CHAP. VIII : Gouttières, chéneaux et accessoires de couverture.

Pour donner une idée du soin apporté à la division méthodique de chaque sujet nous donnons ici les titres des paragraphes en lesquels se divise le Chapitre VI :

*Couvertures en feuilles de zinc. — Couvertures en zinc des bandeaux et corniches. — Ardoises et tuiles métalliques. — Feuilles métalliques ondulées. — Couvertures en cuivre. — Couvertures en plomb.*

La couverture des maisons est certainement la partie qui, généralement, laisse le plus à désirer, en même temps que celle dont les défauts influent le plus sur les frais d'entretien des immeubles. On peut dire, à ce double point de vue, que l'ouvrage de M. Denfer rendra les plus grands services aux propriétaires et aux architectes, en même temps qu'aux entrepreneurs et ouvriers des spécialités diverses se rattachant au sujet.

**LECHALAS (Georges)**, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées. — **Manuel de droit administratif. Service des Ponts et Chaussées et des chemins vicinaux.** 2 volumes grand in-8, se vendant séparément.

**TOME I : Notions sur les trois pouvoirs. Personnel des Ponts et Chaussées. Principe d'ordre financier. Travaux intéressant plusieurs services. Expropriations. Dommages et occupations temporaires ; 1889. . . . . 20 fr.**

**TOME II (1<sup>re</sup> PARTIE) : Participation des tiers aux dépenses des travaux publics. Adjudications. Fournitures. Régie. Entreprises. Concessions ; 1893. . . . . 10 fr.**

**DENFER (J.)**, Architecte, professeur à l'École Centrale. — **Architecture et Constructions civiles. — Charpenterie métallique. Menuiserie en fer et serrurerie.** — 2 beaux volumes se vendront séparément. (*Encyclopédie des Travaux publics*, publiée par M.-C. Lechalas, Inspecteur général des Ponts et Chaussées).

**TOME I : Généralités sur la fonte, le fer et l'acier. — Résistance de ces matériaux. — Assemblages des éléments métalliques. — Chainages, linteaux et poutres. — Planchers en fer. — Supports verticaux. Colonnes en fonte. Poteaux et piliers en fer.** Grand in-8 de 584 pages, avec 479 figures ; 1894, 20 fr.

**TOME II : Paraîtra à la fin de 1894.**

### POUR PARAÎTRE FIN JUIN 1894

**CRONEAU (A.)**, Ingénieur de la Marine, Professeur à l'École d'application de Génie maritime. — **Architecture navale. — Construction pratique des navires de guerre.** — (*Encyclopédie Industrielle*, fondée par M.-C. Lechalas, Inspecteur général des Ponts et Chaussées).

**TOME I : Plans et devis. — Matériaux. — Assemblages. — Différents types de navires. — Charpente. — Revêtement de la coque et des ponts.** Gr. in-8, avec 305 fig. et un Atlas de 11 pl. ; 1894, . . . . . 18 fr.

**TOME II : Cloisonnement. — Cuirassement. — Ouvertures percées dans la coque, les ponts et les cloisons. — Ventilation. — Services d'eau. — Gouvernails. — Poids et résistance des coques. — Préservatifs des corrosions.** Grand in-8, avec nombreuses figures ; 1894. . . . . 12 fr.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS  
Envoi franco contre mandat-poste ou valeur sur Paris

# BIBLIOTHÈQUE PHOTOGRAPHIQUE

La Bibliothèque photographique se compose d'environ 150 volumes et embrasse l'ensemble de la Photographie considérée au point de vue de la science, de l'art et des applications pratiques.

A côté d'ouvrages d'une certaine étendue, comme le *Traité* de M. Davanne, le *Traité encyclopédique* de M. Fabre, le *Dictionnaire de Chimie photographique* de M. Fourtner, la *Photographie médicale* de M. Loude, etc., elle comprend une série de monographies nécessaires à celui qui veut étudier à fond un procédé et apprendre les tours de main indispensables pour le mettre en pratique. Elle s'adresse donc aussi bien à l'amateur qu'au professionnel, au savant qu'au praticien.

## EXTRAIT DU CATALOGUE.

**Aide-Mémoire de Photographie** pour 1894, publié depuis 1876 sous les auspices de la Société photographique de Toulouse, par C. FABRE. In-18, avec figures et spécimens. Broché... 1 fr. 75 c, cart. 2 fr. 25.

**Colson (R.).** — *La perspective en Photographie*. In-18 jésus, avec figures; 1894 . . . . . 1 fr. 25

**Conférences publiques sur la Photographie théorique et technique**, organisées en 1891-1892, par le Directeur du Conservatoire national des Arts et Métiers. In-8, avec 198 figures, et 9 planches; 1893 . . . . . 7 fr. 50

Conférences de MM. le Colonel Laussedat, Davanne, Demény, Lippmann, Janssen, le Capitaine Colson, Fabre, Cornu, Loude, le Commandant Fribourg, Vidal, Wallon, Trutat, Duchesne, le Commandant Moëssard, Becquerel, Gravier, Balagny, Buguet.

**Courrèges (A.),** Praticien. — *Ce qu'il faut savoir pour réussir en Photographie*. Petit in-8; 1894 . . . . . 2 fr. 50

**Davanne.** — *La Photographie. Traité théorique et pratique*. 2 beaux volumes grand in-8, avec 234 figures et 4 planches spécimens. 32 fr.  
*Chaque volume se vend séparément 16 francs*

**Donnadieu (A. L.),** Docteur ès sciences. — *Traité de Photographie stéréoscopique. Théorie et pratique*. Grand in-8 avec figures et atlas de 20 planches stéréoscopiques en photocollographie; 1892.. . . 9 fr.

**Dumoulin.** — *Les couleurs reproduites en Photographie*. Historique. Théorie et pratique. 2<sup>e</sup> édit., in-18 jésus; 1894 . . . . . 1 fr. 50

**Fabre (C.),** Docteur ès sciences. — *Traité encyclopédique de Photographie*. 4 beaux volumes gr. in-8, avec plus de 700 figures et 2 planches; 1889-1891 . . . . . 48 fr. »  
*Chaque volume se vend séparément 14 fr.*

Tous les trois ans, un Supplément, destiné à exposer les progrès accomplis pendant cette période, viendra compléter ce Traité et le maintenir au courant des dernières découvertes.

**Premier Supplément triennal (A).** Un beau volume grand in-8 de 400 pages, avec 176 figures; 1892. . . . . 14 fr.

*Les 5 volumes se vendent ensemble 60 fr.*

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS

- Ferret (l'abbé).** — *La Photogravure sans Photographie.* In-18 jésus; 1894. . . . . 1 fr. 25
- Fourtier (H.).** — *Dictionnaire pratique de Chimie photographique,* contenant une *Etude méthodique des divers corps usités en Photographie,* précédé de *Notions usuelles de Chimie* et suivi d'une Description détaillée des *Manipulations photographiques.* Grand in-8, avec figures; 1892 . . . . . 8 fr. »
- Fourtier (H.) et Molteni (A.)** — *Les projections scientifiques.* Etude des appareils, accessoires et manipulations diverses pour l'enseignement scientifique par les projections. In-18 jésus de 300 pages avec 113 figures; 1894. Broché, 3 fr. 50. Cartonné. . . . . 4 fr. 50
- Geymet.** — *Traité pratique de Photographie.* Eléments complets, méthodes nouvelles. Perfectionnements. 4<sup>e</sup> édition revue et augmentée par *Eugène Dumoulin.* In-18 jésus; 1894 . . . . . 4 fr.
- Houdaille (le Capitaine).** — *Sur une méthode d'essai scientifique et pratique des objectifs photographiques et des instruments d'optique.* (Mémoires du Laboratoire d'essais de la Société française de Photographie). Grand in-8, avec figures et 1 planche en photocollographie; 1894. . . . . 2 fr. 50
- Karl (Van).** — *La Miniature photographique.* Procédé supprimant le ponçage, le collage, le transparent, les verres bombés et tout le matériel ordinaire de la Photominature, donnant sans aucune connaissance de la peinture les miniatures les plus artistiques. In-18 jésus . . . . . 0 fr. 75
- Koehler (D<sup>r</sup> R.).** — *Applications de la Photographie aux Sciences naturelles.* Petit in-8, avec figures; 1893. Broché, 2 fr. 50. Cartonné toile anglaise . . . . . 3 fr.
- Londe (A),** Chef du service photographique à la Salpêtrière. — *La Photographie instantanée.* 2<sup>e</sup> édit. In-18 jés. avec fig.; 1890. . . . . 2 fr. 75  
 — *Traité pratique du développement.* Etude raisonnée des divers révélateurs et de leur mode d'emploi. 2<sup>e</sup> édition. In-18 jésus, avec figures et 4 doubles planches en photocollographie; 1892 . . . . . 2 fr. 75  
 — *La photographie médicale. Applications aux sciences médicales et physiologiques.* Grand in-8, avec 80 figures et 19 planches; 1893 9 fr.
- Martin (Ad.).** — *Méthode directe pour la détermination des courbures des objectifs de Photographie.* Grand in-8 avec figures; 1894 . . . . . 2 fr.
- Vidal (Léon).** — *Traité de Photolithographie. Photolithographie directe et par voie de transfert. Photozincographie. Photocollographie. Autographie. Photographie sur bois et sur métal à graver.— Tours de main et formules diverses.* In-18 jésus, avec 25 figures, 2 planches et spécimens de papiers autographiques; 1893. . . . . 6 fr. 50
- Vleuille.** — *Nouveau guide pratique du photographe amateur.* 3<sup>e</sup> édit. refondue et beaucoup augmentée. In-18 jésus avec fig.; 1892. 2 fr. 75
- Wallon (E.).** — *Choix et usage des objectifs photographiques.* Petit in-8 avec 25 fig.; 1893. Broché, 2 fr. 50. Cartonné toile angl. . . . . 3 fr.

**LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS**

*Envoi franco contre mandat-poste ou valeur sur Paris*

- Appell (Paul)**, Membre de l'Institut. — **Traité de Mécanique rationnelle.** (Cours de Mécanique de la Faculté des Sciences). 3 volumes grand in-8, se vendant séparément.  
**TOME I : Statique. Dynamique du point**, avec 178 fig. ; 1893. **TOME II** et **TOME III : (sous presse)**. . . . . 46 fr.
- Appell (Paul)**, Membre de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences, et **Goursat (Edouard)**, Maître de Conférences à l'École Normale supérieure. — **Théorie des fonctions algébriques et de leurs intégrales. Etude des fonctions analytiques sur une surface de Riemann.** Grand in-8, avec figures; Prix pour les **souscripteurs** . . . . . 14 fr.  
 Le **premier fascicule** (x-256 pages) a paru.
- Chappuis (J.)**, Professeur de Physique générale à l'École Centrale, et **Berget (A.)**, Docteur ès sciences, attaché au laboratoire des Recherches physiques de la Sorbonne. — **Leçons de Physique générale. Cours professé à l'École Centrale des Arts et Manufactures et complète suivant le programme de la Licence ès sciences physiques.** 3 volumes grand in-8 se vendant séparément : **TOME I : Instruments de mesure. Chaleur.** Avec 175 figures; 1891 . . . . . 13 fr.  
**TOME II : Electricité et Magnétisme.** Avec 305 figures; 1891. . . . . 13 fr.  
**TOME III : Acoustique. Optique; Electro-optique.** Avec 193 figures; 1892 . . . . . 40 fr.
- Chevrot (René)**, Ancien Directeur d'Agence de la Société Générale et du Crédit Lyonnais. — **Pour devenir financier. Traité théorique et pratique de Banque et de Bourse.** In-8; 1893 . . . . . 6 fr.
- Cundill (J.-P.)**, Lieutenant-Colonel de l'Artillerie royale anglaise, Inspecteur des Explosifs. — **Dictionnaire de explosifs.** Édition française remaniée et mise à jour avec le concours de l'Auteur par E. Désortiaux, Ingén. des Poudres et S. Grand in-8; 1893. . . . . 6 fr.
- Garçon (Jules)**. — **La pratique du teinturier.** 3 volumes in-8, se vendant séparément.  
**TOME I : Les méthodes et les essais de teinture. Le succès en teinture** ; 1893 . . . . . 3 fr. 50  
**TOME II : Le matériel de teinture.** (Sous presse.)  
**TOME III : Les recettes et procédés spéciaux de teintures.** (S. P.).
- Janet (Paul)**, Professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble. — **Premiers principes d'électricité industrielle. Piles. Accumulateurs. Dynamos. Transformateurs.** In-8, avec 173 fig. ; 1893. . . . . 6 fr.
- Miquel**. — **Manuel pratique d'Analyse bactériologique des eaux.** In-18 Jésus, avec figures; 1891 . . . . . 2 fr. 75
- Rodet et Busquet**, Ingénieurs des Arts et Manufactures. — **Les courants polyphasés.** Grand in-8, avec 71 figures; 1893 . . . . . 3 fr. 50
- Thomson (Sir William) [Lord Kelvin]**, — **Conférences scientifiques et allocutions. Constitution de la matière.** Ouvrage traduit et annoté sur la 2<sup>e</sup> édition, par P. LECOL, Agrégé des Sciences physiques, professeur; avec des *Extraits de Mémoires récents de Sir W. Thomson et quelques Notes* par M. BRILLOUIN, Maître de Conférences à l'École Normale. In-8, avec 76 figures; 1893 . . . . . 7 fr. 50
- Witz (Aimé)**. — **Problèmes et calculs pratiques d'électricité.** — (L'ÉCOLE PRATIQUE DE PHYSIQUE). In-8, avec 51 figures; 1893. . . . . 7 fr. 50

# TRAITEMENT DE LA TUBERCULOSE PULMONAIRE

DE LA PLEURÉSIE D'ORIGINE TUBERCULEUSE  
ET DES BRONCHITES AIGUES ET CHRONIQUES  
par le

## GAIACOL IODOFORMÉ SÉRAFON

Et le Gaïacol-Eucalyptol iodoformé Sérafon

En solutions pour injections hypodermiques  
et en capsules pour l'usage interne

PRÉPARATION ET VENTE EN GROS : Société Française de Produits Pharmaceutiques, 9 et 11, rue de la Perle, Paris.

### ALIMENTATION

DES

### MALADES

PAR LES

### POUDRES

DE

*Viande*

### ADRIAN

La **POUDRE de BIFTECK ADRIAN** (garantie pure viande de bœuf français) est aussi inodore et insipide qu'il est possible de l'obtenir en lui conservant les principes nutritifs de la viande. C'est exactement de la chair musculaire privée de son eau, gardant sous un volume très réduit et sous un poids quatre fois moindre, toutes ses propriétés nutritives, et chose importante, n'ayant rien perdu des principes nécessaires à l'assimilation de l'aliment.

*Se vend en flacons de 250, 500 gr.  
et 1 kil.*

La **POUDRE DE VIANDE ADRIAN**, d'un prix moins élevé que la poudre de bifteck, ce qui en permet l'emploi aux malades peu fortunés est garantie pure viande de bœuf d'Amérique.

*boîtes de 250, 500 gr. et 1 kil.*

LA

## QUASSINE ADRIAN

essentiellement différente de toutes celles du commerce, est la SEULE dont les effets réguliers aient été constatés. Elle excite l'APPÉTIT, développe les FORCES, combat efficacement les DYSPEPSIES ATONIQUES, les COLIQUES HÉPATIQUES et NÉPHRÉTIQUES. (Bulletin général de thérapeutique, 15 novembre 1882).

**Dragées** contenant 25 milligrammes de Quassine amorphe.

**Granules** — 2 — Quassine cristallisée.

## ANÉMIE

Dans les cas de CHLOROSE et d'ANÉMIE rebelles aux moyens thérapeutiques ordinaires les préparations à base

## CHLOROSE

## D'HÉMOGLOBINE SOLUBLE

DE V. DESCHIENS

Épuisement

ont donné les résultats les plus satisfaisants. Elles ne constipent pas, ne noircissent pas les dents et n'occasionnent jamais de maux d'estomac comme la plupart des autres ferrugineux.

Se vend sous la forme de

*Affaiblissement  
général*

**SIROP, VIN, DRAGÉES  
ET ÉLIXIR**

préparés par ADRIAN et Cie, 9 rue de la Perle, Paris.

---

## CAPSULES DE TERPINOL ADRIAN

Le TERPINOL a les propriétés de l'essence de Térébenthine dont il dérive, mais il est plus facilement absorbé et surtout *très bien toléré*, ce qui le rend préférable.

Il n'offre pas, comme l'essence de Térébenthine, l'inconvénient grave de provoquer chez les malades des nausées, souvent même des vomissements.

Le TERPINOL est un diurétique et un puissant modificateur des sécrétions catarrhales (bronches, reins, vessie).

Le TERPINOL ADRIAN s'emploie en capsules de 20 centigrammes (3 à 6 par jour).

---

## TRAITEMENT de la SYPHILIS par les PILULES DARDENNE

POLY-IODURÉES SOLUBLES

SOLUBLES dans tous les liquides servant de boisson (Eau, lait, café, vin, bière, etc.) elles peuvent être prises en pilules ou transformées par les malades, en solutions ou en sirops, au moment d'en faire usage.

**Premier type (type faible)**

(Syphilis ordinaire 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> année)

2 pilules par jour correspondent à une cuillerée à soupe de

Sirop de Gilbert.

**Quatrième type (type fort)**

(accidents tertiaires, viscéraux et cutanés)

8 pilules par jour correspondent à un centig. bi-iodure de mercure et à 4 grammes iodure de potassium.

Vente en Gros. Société Française de Produits Pharmaceutiques,  
9 et 11 rue de la Perle, PARIS.

# ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE DES AIDE-MÉMOIRE

DIRIGÉE PAR M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT

Collection de 300 volumes petit in-8 (30 à 49 volumes publiés par an)

CHAQUE VOLUME SE VEND SÉPARÉMENT : BROCHÉ, 2 FR. 50; CARTONNÉ, 3 FR.

## Ouvrages parus

### Section de l'Ingénieur

- R.-V. PICOU. — Distribution de l'électricité. Installations isolées.  
A. GOULLY. — Transmission de la force par air comprimé ou raréfié.  
DUQUESNAY. — Résistance des matériaux.  
DWELSHAUVERS-DEKRY. — Etude expérimentale calorimétrique de la machine à vapeur.  
A. MADAMET. — Tiroirs et distributeurs de vapeur.  
MAGNIER DE LA SOURCE. — Analyse des s.  
ALHEILIG. — Recette, conservation et travail des bois.  
R.-V. PICOU. — La distribution de l'électricité. Usines centrales.  
AIMÉ WITZ. — Thermodynamique à l'usage des Ingénieurs.  
LENDRET. — La bière.  
CH. SCHLÖSSING fils. — Notions de chimie agricole.  
SAUVAGE. — Divers types de moteurs à vapeur.  
CHATELIER. — Le Grison.  
MADAMET. — Détente variable de la vapeur. Dispositifs qui la produisent.  
BOUET. — Appareils d'essai des moteurs à vapeur.  
GILONBAU. — Canon, torpilles et cuirasse.  
L. GAUTIER. — Essais d'or et d'argent.  
BROMPTON. — Les textiles végétaux.  
ALHEILIG. — Corderie. Cordages en chanvre et en fils métalliques.  
DE LAUNAY. — Formation des gîtes métallifères.  
BERTIN. — Etat actuel de la marine de guerre.  
MERRINAND JEAN. — L'industrie des peaux et des cuirs.  
BERTHELOT. — Traité pratique de calorimétrie chimique.  
DE VYAKIS. — L'art de chiffrer et déchiffrer les dépêches secrètes.  
MADAMET. — Epures de régulation.  
GUILLEAUME. — Unités et étalons.  
WIDMANN. — Principes de la machine à vapeur.

### Section du Biologiste

- FAISANS. — Maladies des organes respiratoires. Méthodes d'exploration. Signes physiques.  
MAGNAN et SÉRIEUX. — Le délire chronique à évolution systématique.  
AUVARD. — Gynécologie. — Séméiologie génitale.  
G. WEISS. — Technique d'électrophysiologie.  
BAZY. — Maladies des voies urinaires. — Urètre. Vessie.  
WURTZ. — Technique bactériologique.  
TROUSSEAU. — Ophthalmologie. Hygiène de l'œil.  
FÈRE. — Epilepsie.  
LAVERAN. — Paludisme.  
POLIN et LABIT. — Examen des aliments suspects.  
BERGONIÉ. — Physique du physiologiste et de l'étudiant en médecine. Action moléculaires, Acoustique, Electricité.  
AUVARD. — Menstruation et fécondation.  
MÉGNIN. — Les acariens parasites.  
DEMELIN. — Anatomie obstétricale.  
CUGNOT. — Les moyens de défense dans la série animale.  
A. OLIVIER. — La pratique de l'accouchement normal.  
BERGÉ. — Guide de l'étudiant à l'hôpital.  
CHAERIN. — Les poisons de l'organisme. Poisons du Urine.  
ROGER. — Physiologie normale et pathologique du foie.  
BROCC et JACQUET. — Précis élémentaire de dermatologie. Pathologie générale cutanée.  
HANOT. — De l'endocardite aiguë.  
WEILL-MANTOU. — Guide du médecin d'assurances sur la vie.  
LANGLOIS. — Le lait.  
DE BRUN. — Maladies des pays chauds. — Maladies climatériques et infectieuses.  
BROCA. — Le traitement des ostéo-arthrites tuberculeuses des membres chez l'enfant.  
DU CAZAL et CATRIN. — Médecine légale militaire.

Ouvrages parus et en cours de publi

Section de l'Ingénieur

**MINEL (P.)** — Electricité Industrielle.  
**LAYBERGNE (Gérard)**. — Turbines.  
**HEBERT**. — Boissons falsifiées.  
**NAUDIN**. — Fabrication des vernis.  
**SINIGAGLIA**. — Accidents de chaudières  
**H. LAURENT**. — Théorie des jeux de  
 hasard.  
**GUREZ**. — Décoration au feu de moufle.  
**VERMAND**. — Moteurs à gaz et à pé-  
 trole.  
**MEYER (Ernest)**. — L'utilité publique  
 et la propriété privée.  
**WALLON**. — Objectifs photographiques.  
**BLOCH**. — Appareils producteurs d'eau  
 sous pression.  
**DE LAUNAY** — Statistique générale de  
 la production métallière.  
**CRONKAL**. — Construction du navire.  
**DR MARCHENA**. — Machines frigorifi-  
 ques.  
**PRUDHOMME**. — Teinture et impres-  
 sions.  
**ALHELIG**. — Construction et résistance  
 des machines à vapeur.  
**SOREL**. — La rectification de l'alcool.  
**P. AINSL**. — Electricité appliquée à  
 la marine.  
**DWILSHAUVERS-DERY**. — Etude expéri-  
 mentale dynamique de la machine à  
 vapeur.  
**AIMÉ WITZ**. — Les moteurs thermiques.  
**H. LEANTE et A. BEARD**. — Transmis-  
 sions par câbles métalliques.  
**P. MINEL**. — Regularisation des mo-  
 teurs des machines électriques.  
**CASPARI**. — Chronomètres de marine.  
**HENNEBERT (C)**. — La fortification.  
**DE LA BOUTTE PLUYER**. — La théorie  
 des procédés photographiques.  
**HENNEBERT**. — Les torilles sèches.  
**DE BILLY**. — Fabrication de la fonte.  
**STANISLAS MEUNIER**. — Les météorites.  
**MATT**. — Les marées.  
**LOUIS JACQUET**. — La fabrication des  
 eaux-de-vie.  
**GUYE (Ph. A.)**. — Matières colorantes.  
**HOSPITALIER (E.)** — Les compteurs  
 d'électricité.  
**EMILE BOIRE**. — La sucrerie.  
**MOISSAN et OUVRIARD**. — Le nickel.  
**ROCHE**. — La perspective.  
**LE VERRIER**. — La fonderie.  
**SEYRIG**. — Statique graphique.  
**C<sup>t</sup> BASSOT et C<sup>t</sup> DREFFORGES**. — Géo-  
 dosie.

Section

**LAPERSONNE** paupières  
 de l'œil.  
**KÖHLER**. —  
 graphie au  
**DE BRUN**. —  
 — Maladie  
 des lymph  
**BRAUPEGARD**  
 appl au no  
**BROCC ET JACQUET**  
 taire de Dér  
 en particu de  
**LESAGE**. — Le Chôtes  
**LANNELONGUE**. — La  
 rûngi a'e.  
**CORNÉVIN**. — Produc  
**J. CH. TIN**. — Anato  
**CASTRY**. — Hygiène  
 chantée.  
**MAGNAN ET CHÉRIEU**  
 générale.  
**CUENOT**. — L'influc  
 les animaux.  
**MERKLEN**. — Mala li.  
**G. ROCHE** — Les grande des ma  
 ritimes modernes de  
**OILLER**. — La ré c  
 les résections so  
**LETULIER**. — Pûs et s  
**CRITZMANN**. Le cancer.  
**AR** — La chimie de  
 cellule vivante.  
**MIGNON**. — La  
**SÉGLAS**. — Le di  
**OLLIER**. — Les grande  
**BAZY** — Les fonctio  
**ETARD**. — Les nouvelle  
**FALSAZ**. — Diagnosti  
**BUIN**. — Therapou  
**DASTRE**. — La  
**AIMÉ GIRARD**. — La  
**NAPIAS**. — Hygiène  
**GOMBAULT**. — Pathologie  
**LEGROUX**. — Pathologie  
**MARCHANT-GERARD**. — Chir  
**BERTHAULT**. — Les  
**BRault**. — Myocarde  
**GAMALEIA**. — Vaccinat  
**ARLOING**. — Maladies  
**NOCARD**. — Les Tuberc  
**EDM. PERRIER**. — Le  
**MATHIAS DUVAL**. — La  
**BRISSAUD**. — L'Hémisphère