

LA MÉTALLURGIE

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

OUVRAGES PARUS

A. Badoureau. — LES SCIENCES EXPÉRIMENTALES (nouvelle édition entièrement refondue).

O. Chemin et F. Verdier. — LA HOUILLE ET SES DÉRIVÉS.

P. Lefèvre et G. Cerbelaud. — LES CHEMINS DE FER.

E. Lisbonne. — LA NAVIGATION MARITIME.

H. Deutsch (de la Meurthe). — LE PÉTROLE.

Badoureau et Grangier. — LES MINES, LES MINIÈRES ET LES CARRIÈRES.

Guy Le Bris. — LES CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES.

E. Estauinié. — LES SOURCES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

F. Bère. — LES TABACS.

D^r Brocchi. — LA PISCICULTURE DANS LES EAUX DOUCES.

J. Sageret. — LES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ (transformations de l'énergie électrique).

Banet-Rivet. — L'AÉRONAUTIQUE.

BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

De M. J. PICHOT, ancien élève de l'École polytechnique.

LA MÉTALLURGIE

PAR

M. LE VERRIER

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS
INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES

PARIS

SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ÉDITIONS D'ART

9, RUE BONAPARTE, 9

LA MÉTALLURGIE

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

PRODUCTION INDUSTRIELLE DE LA CHALEUR

Combustibles. — Fours à cuve. — Fours à réverbère. — Fours à gaz.
Production des hautes températures.

Les chimistes distinguent deux manières de traiter les corps complexes pour en isoler les éléments constitutifs. L'une, que l'on appelle la voie humide, consiste à dissoudre les corps dans l'eau ou dans des acides; puis, à traiter ce liquide par des réactifs appropriés qui précipitent tel ou tel corps en laissant les autres solubles. L'autre, que l'on appelle la voie sèche, consiste à chauffer un corps avec des réactifs solides; les réactions se produisent alors à haute température, et l'on obtient en général des produits fondus.

La plupart des opérations métallurgiques se font par voie sèche; c'est avec l'aide du feu que l'homme est parvenu à extraire tous les métaux usuels, et les progrès de la métallurgie sont intimement liés à ceux que l'on a faits dans l'art de produire et

d'utiliser la chaleur. Les perfectionnements successifs apportés aux fours primitifs, en permettant de chauffer de plus grandes masses et de consommer moins de combustible, ont produit l'abaissement progressif du prix des métaux et ont donné le moyen de les extraire en plus grande quantité. Certaines fabrications qui exigent de très hautes températures étaient restées impossibles jusqu'à nos jours; l'invention de nouveaux procédés de chauffage plus énergiques a livré à l'industrie moderne des métaux inconnus des anciens.

Un coup d'œil sur les conditions de production industrielle de la chaleur est donc l'introduction naturelle à l'étude de la métallurgie.

Le problème qui se pose pour toutes les industries qui emploient le feu est double; il s'agit dans tous les cas de chauffer des masses relativement considérables avec la moindre dépense possible; dans certaines opérations il faut en outre chercher à réaliser des températures très élevées. Nous avons donc à examiner les fours métallurgiques au point de vue de l'utilisation économique, d'une part, et, de l'autre, au point de vue de leur énergie spécifique, c'est-à-dire de leur capacité de produire des températures plus ou moins hautes.

COMBUSTIBLES

Les combustibles naturels que l'on peut utiliser sont le bois et la houille ou charbon minéral. Le principal élément actif qu'ils contiennent est le carbone; mais il s'y trouve aussi des éléments combustibles volatils, des hydrocarbures, qui peuvent brûler au contact de l'air ou distiller lorsqu'on les chauffe en vase clos.

Quand on chauffe la houille dans une cornue, comme on le fait pour la fabrication du gaz d'éclairage, elle dégage différentes matières volatiles; les gaz qui s'en échappent laissent déposer, lorsqu'on les refroidit, des eaux ammoniacales, du goudron, des huiles minérales. Ces derniers corps brûlent facilement et c'est à

leur présence que la houille doit de donner des flammes plus ou moins abondantes, suivant qu'elle est plus ou moins riche en hydrocarbures. Le résidu qui reste dans la cornue et qu'on appelle *coke* est du carbone presque pur, mélangé seulement avec les cendres de la houille. Il brûle plus difficilement, sans donner de flamme, et sa combustion exige un fort tirage.

Classification des houilles. — On distingue plusieurs variétés de houilles, suivant la nature et la proportion des matières volatiles qu'elles contiennent.

Les houilles grasses sont celles qui se prêtent aux applications les plus nombreuses; elles contiennent des hydrocarbures goudronneux qui les font s'agglomérer et coller au feu; elles donnent à la carbonisation un coke dur et solide. Les houilles maigres ou anthracites contiennent peu de matières volatiles, elles brûlent presque sans flamme et le résidu de la carbonisation ne s'agglomère pas et reste pulvérulent; elles sont donc impropres à la fabrication du coke.

Les houilles sèches ou flambantes sont au contraire riches en matières volatiles, elles brûlent avec une longue flamme et conviennent au chauffage des grands fours; mais elles ne donnent qu'un coke mal aggloméré et manquant de cohésion.

La valeur des houilles dépend aussi beaucoup des proportions de cendres qu'elles contiennent. Ces cendres agissent comme une matière inerte et les houilles impures ou très cendreuses n'ont qu'un pouvoir calorifique relativement faible.

Bois. — Le bois est plus riche en matière volatile que la houille; il contient, même lorsqu'on l'a bien desséché, beaucoup d'eau qui fait partie de sa constitution. Cette eau se dégage en vapeur lorsqu'on le brûle, et absorbe une grande quantité de chaleur; aussi ne convient-il pas pour chauffer des fours à température élevée. Mais, lorsqu'on le carbonise, on obtient un charbon qui se rapproche plus que tous les autres combustibles du car-

bone pur ; il ne contient que très peu de cendres ; ces cendres sont alcalines et fusibles, tandis que celles du coke, se composant surtout d'argile, sont infusibles, et contiennent souvent des matières sulfureuses de nature à nuire à la qualité des métaux.

Le charbon de bois a été pendant longtemps le principal combustible employé en métallurgie ; mais dans notre siècle, lorsque les usines ont développé leur production, elles ont rapidement épuisé les forêts situées dans le voisinage ; le charbon de bois est devenu trop coûteux et a été remplacé par le coke dans tous les pays de grande industrie.

Produits de la combustion. — Lorsque le carbone brûle à l'air, il peut donner deux produits différents ; s'il y a un excès d'air, une molécule de carbone se combine avec deux molécules d'oxygène pour faire du gaz acide carbonique ; mais, s'il y a défaut d'air, ce qui arrive lorsque le charbon incandescent est entassé en grandes masses, le carbone ne se combine alors qu'à une seule molécule d'oxygène et forme de l'oxyde de carbone, gaz qui est lui-même susceptible de brûler avec une flamme bleue ; aussi des gaz qui s'échappent des fours métallurgiques sont souvent incomplètement brûlés, et encore plus ou moins combustibles suivant la proportion d'oxyde de carbone qu'ils contiennent. On peut souvent les utiliser en les envoyant brûler dans d'autres appareils qui exigent des températures moindres.

Chaleur de combustion. — Le carbone est donc susceptible de deux degrés de combustion : quand il brûle complètement à l'acide carbonique, il dégage plus de 8000 calories (1) par kilogramme. Quand il ne brûle qu'à moitié à l'état d'oxyde de carbone, il n'en dégage que 2400.

Dans la combustion des houilles, les hydrocarbures brûlent

(1) On entend par calorie la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau.

aussi en donnant de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau due à la combustion de l'hydrogène; elles peuvent dégager, suivant leur qualité et leur pureté, entre 6000 et 8500 calories par kilogramme.

Utilisation de la chaleur. — Lorsqu'un combustible brûle, chaque kilogramme produit toujours, si la combustion est complète, la même quantité de chaleur, et le problème économique revient à faire passer autant que possible toute cette chaleur dans les matières qu'on se propose de chauffer; il faut donc éviter les déperditions inutiles, qui proviennent surtout de la chaleur dissipée par le rayonnement des parois du fond et de celle qu'emportent les fumées, c'est-à-dire les gaz qui s'échappent encore chauds dans la cheminée. Les fours qui utiliseront le mieux la chaleur seront en général ceux dont la surface extérieure sera le moins développée par rapport à leur volume, et d'autre part ceux où les flammes auront à effectuer un assez grand parcours pour que les gaz se refroidissent avant de s'échapper.

Cette dernière condition n'est pas toujours réalisable; notamment lorsqu'il s'agit de produire des températures très élevées, il faut bien que les gaz aient encore à leur sortie une température au moins égale à celle du four lui-même, et dans ce cas on ne peut bien utiliser la chaleur qu'avec des fours composés, c'est-à-dire en employant les flammes perdues à chauffer d'autres fours ou des parties accessoires du même appareil.

Pour obtenir des températures locales très fortes, la principale condition est de concentrer dans un espace relativement restreint la production du plus de chaleur possible: c'est ce qu'on réalise dans les foyers ordinaires, en activant la combustion par l'air soufflé ou par un fort tirage.

Nous allons voir par quels moyens variés on a cherché progressivement à se rapprocher, dans les fours métallurgiques, des différentes conditions que nous venons de définir.

FOURS MÉTALLURGIQUES

Les opérations métallurgiques peuvent se diviser en deux catégories principales: 1° les opérations réductrices où le charbon intervient comme moyen de chauffage et comme réactif chimique ; elles consistent en général à fondre un minerai oxydé au contact

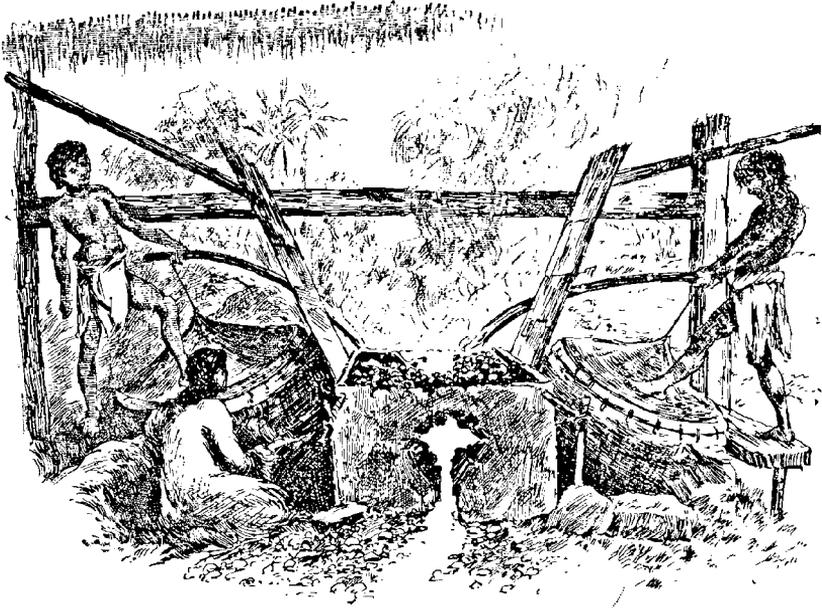


FIG. 1. — Fabrication du fer en Afrique.

du charbon, qui s'empare de l'oxygène et met le métal en liberté ; 2° les opérations oxydantes où le contact du charbon devient inutile et parfois nuisible, car il s'agit de chauffer des matières en présence de l'air pour les oxyder. Ce genre d'opérations se présente dans deux cas principaux : le grillage des minerais sulfureux, où l'on se propose d'éliminer le soufre en le brûlant pour amener le métal à l'état d'oxyde, et l'affinage des métaux bruts que l'on fond

et que l'on surchauffe de manière à brûler et scorifier lentement les matières étrangères.

Foyers primitifs. — Dans les temps primitifs toutes ces opérations se faisaient dans le même foyer, qui n'était sans doute qu'une cavité creusée dans le sol, remplie de bois ou de charbon dont on activait la combustion avec des soufflets à main placés sur le bord. On peut voir encore ce mode de travail chez les peuplades sauvages.

Le bas foyer, très employé dans nos usines jusqu'au milieu de ce siècle, ne différait guère de ce four primitif que par des dimensions un peu plus grandes, une construction plus stable et l'emploi de soufflerie mécanique. La cavité en forme de bassin destinée à recevoir le combustible est creusée dans un mas-

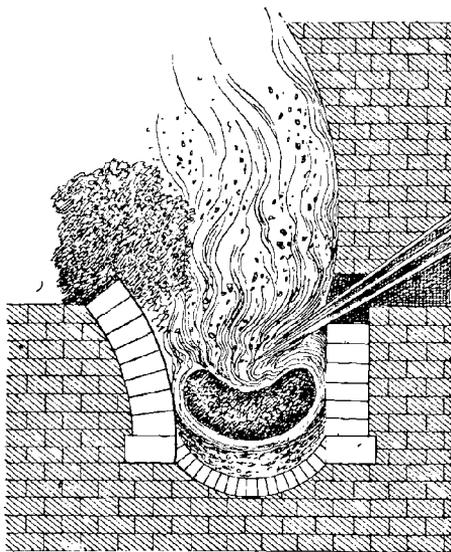


FIG. 2. — Bas foyer.

sif de maçonnerie assez élevé pour faciliter le travail; sur l'un des côtés, où se place l'ouvrier, se trouve une plate-forme où l'on peut tirer les matières qui ont été élaborées dans le foyer; les autres côtés sont entourés de murettes, à travers lesquelles passent les tuyères soufflantes.

Après avoir rempli le foyer de charbon allumé, on charge au-dessus le minerai ou le métal; lorsque la matière est fusible, elle se liquéfie sous le feu des tuyères et tombe au fond du bassin, elle y prend la place du charbon, dont il ne reste qu'une couche

plus ou moins épaisse au-dessus. Si l'on a chargé du minerai mélangé de charbon en poudre, il se réduit naturellement, le métal se rassemble au fond du bassin. S'il s'agit au contraire d'affiner un métal, on peut l'oxyder en s'arrangeant pour qu'il soit exposé aux feux des tuyères. S'il s'agit de griller un minerai sans le

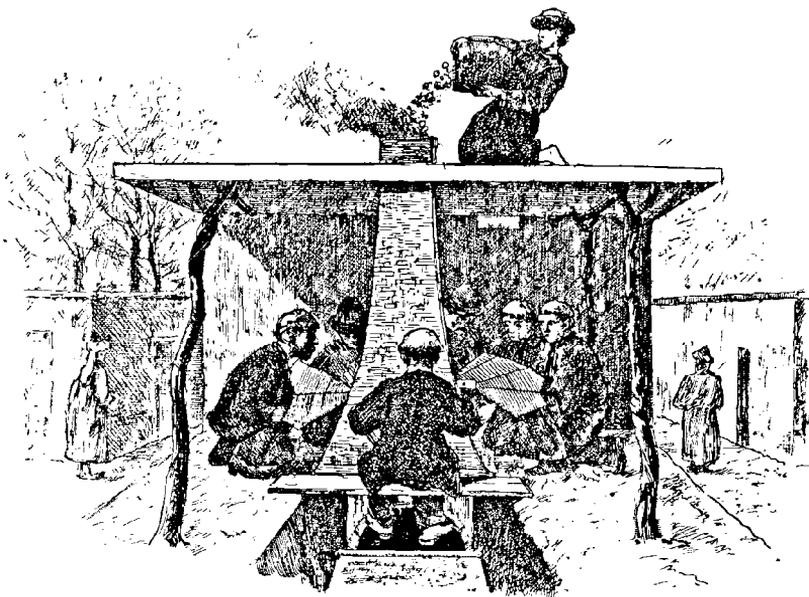


FIG. 3. — Fabrication du fer chez les Tartares.

fondre, on peut, après l'avoir chauffé, le tirer et l'étaler sur la plate-forme de devant.

Perfectionnements du bas foyer. — Cet appareil à tout faire s'est peu à peu perfectionné, agrandi et diversifié : par une série de transformations, il a donné naissance à des types variés, adaptés à chaque opération spéciale.

Le premier perfectionnement a consisté à entourer le foyer de murs, à le recouvrir de voûtes de manière à éviter les déperditions de chaleur par rayonnement: en effet, les foyers primitifs chauffaient l'atmosphère tout autour, et il n'y avait qu'une très faible partie de la chaleur employée réellement à échauffer la charge. Un second pas plus important fut fait lorsqu'on imagina de charger les minerais non plus en bas, mais au sommet de l'espèce de tour formée par les murs qui entouraient le foyer. On peut voir chez certaines peuplades demi civilisées des exemples de ce mode de travail. Le foyer est alors surmonté d'une espèce de cuve ou cheminée que l'on maintient pleine de minerai; celui-ci descend et s'échauffe progressivement, tandis que les gaz qui s'élèvent lui cèdent leur chaleur et peuvent arriver presque froids au sommet si la cuve est assez haute. On réalise ainsi le *chauffage méthodique*, c'est-à-dire qu'il y a circulation en sens inverse de la charge, d'une part, et des gaz produits par la combustion, de l'autre.

Les gaz peuvent alors céder toute leur chaleur et sortir froids du four, bien qu'il règne une température très élevée dans la région des tuyères d'où les charges s'approchent peu à peu.

Fours à cuve. — Cet appareil encore rudimentaire est l'ancêtre des fours à cuve qui sont les plus employés aujourd'hui pour la réduction des minerais. Pour passer de ce type primitif à nos hauts fourneaux modernes, il n'y avait qu'à amplifier peu à peu les dimensions, à perfectionner la construction, à remplacer les soufflets par des machines de plus en plus puissantes. Les grands fours à cuve, grâce à leur forme cylindrique, ont une capacité considérable et n'offrent au rayonnement qu'une surface extérieure relativement modérée. Ils remplissent donc les conditions théoriques les plus favorables pour bien utiliser la chaleur.

En les alimentant avec du vent chaud, on a encore augmenté de nos jours leur puissance, car on apporte ainsi dans la région inférieure un supplément de chaleur sans augmenter le volume

de l'appareil, de sorte que sa marche devient plus active, et, comme la surface offerte au refroidissement reste la même, plus on accélère l'allure du four de manière à lui faire produire davantage, plus on réalise d'économie de toute sorte.

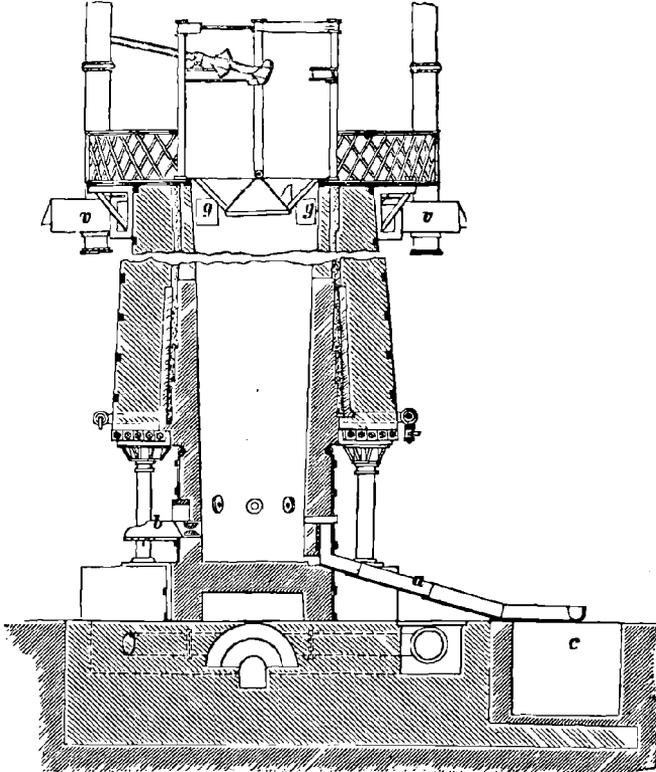


FIG. 4. — Demi-haut fourneau du Mansfeld pour cuivre.

Il faut remarquer que dans ces fours on ne peut pas employer de combustible collant; comme le charbon est chargé au sommet avec le minerai, il ne pourrait pas descendre s'il s'agglutinait en masse sous l'action de la chaleur, et la cuve serait obstruée. On

ne peut donc alimenter ces fours qu'avec du charbon de bois, du coke ou de l'anthracite.

Les fours à cuve conviennent essentiellement pour la réduction des minerais, car les charges y sont mélangées avec le charbon incandescent, l'atmosphère y est réductrice parce que la masse de

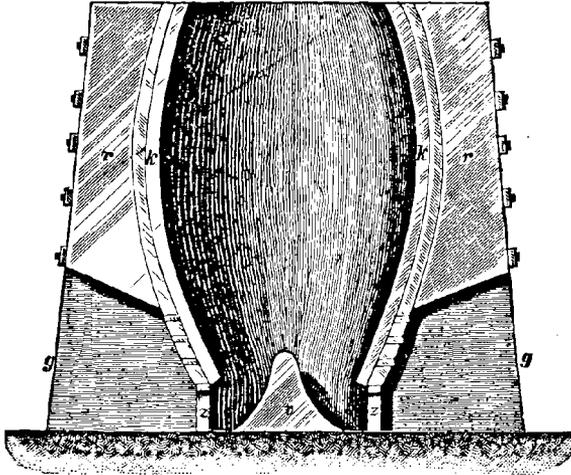


FIG. 5. — Four coulant pour la calcination de la calamine.

Les charges sont introduites au gueulard avec des couches de charbon intercalées. Les matières calcinées sont retirées par les orifices *x*, à la base du four : ces orifices servent aussi à l'entrée de l'air. La descente ne se fait qu'à mesure qu'on retire en *x* les résidus qui y forment un talus obstruant l'orifice.

charbons rouges ne permet que la formation de l'oxyde de carbone. Nous en reparlerons au chapitre où nous étudierons spécialement cette opération métallurgique. On les emploie aussi à la fusion des métaux, surtout de la fonte de fer, sous le nom de *cubilots*.

Fours de calcination. — Les fours à cuve peuvent fonctionner

aussi avec le tirage naturel. Dans ce cas, la base reste ouverte par de larges orifices qui servent au déchargement, et l'air s'y engouffre, appelé par l'effet de la colonne de gaz chauds remplissant le

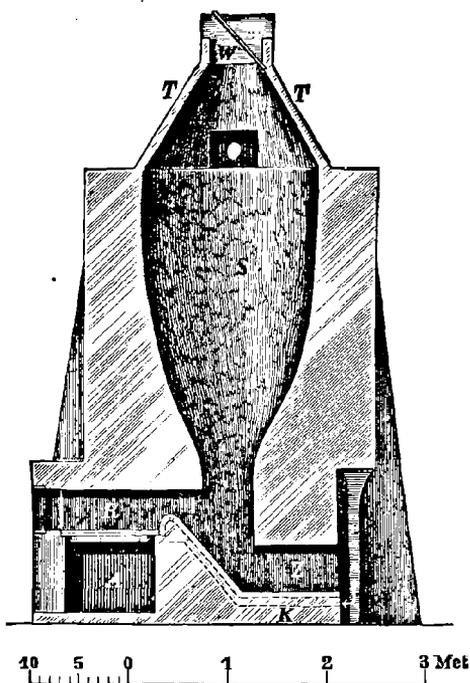


FIG. 6. — Four à foyer latéral pour la calcination de la calamine.

Les flammes, venant du foyer R, traversent la cuve : la hotte T, avec le registre W, assure et règle le tirage. Les charges introduites par l'ouverture O sont retirées à la base en Z.

four, qui fait l'office de cheminée. Toutefois, comme les matières qui remplissent la cuve obstruent le passage et contrarient le tirage, la combustion est beaucoup moins vive et la température moins élevée que dans les fours soufflés. Ce système s'emploie pour les fours de calcination, quand il s'agit, par exemple, de chauffer un minerai pour éliminer l'eau et les matières volatiles, mais sans vouloir le fondre ni provoquer aucune réaction chimique importante.

Les fours de calcination peuvent aussi être chauffés par des foyers séparés, distribués autour de la cuve

où ils envoient leur flamme par des carneaux débouchant dans la partie inférieure au-dessus des orifices de déchargement. Ces flammes s'élèvent à travers la cuve, où l'on charge les matières sans mélange de charbon. Ce genre d'appareils s'emploie quand on doit faire la calcination à l'abri du contact du charbon.

Le four à cuve utilise très bien la chaleur, mais plusieurs circonstances l'empêchent de se plier à tous les besoins. Il y a beaucoup d'opérations métallurgiques qui doivent se faire dans une atmosphère oxydante et où le contact du charbon est inadmissible. Il y en a aussi qui exigent l'intervention continuelle de l'ouvrier, pour régler la température, mélanger certaines parties de la charge ensemble, surveiller l'opération, la prolonger ou l'arrêter à temps. Rien de tout cela ne peut se faire avec le four à cuve, dont la marche est presque automatique.

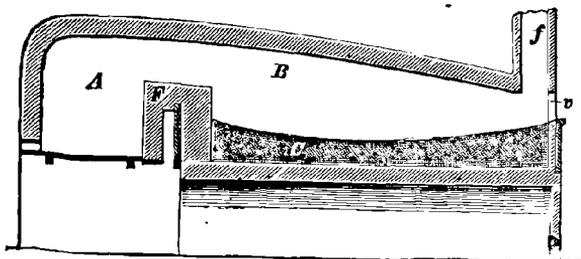


FIG. 7. — Four d'affinage du cuivre.

Fours à réverbère. — Pour s'adapter aux opérations de ce genre, le bas foyer primitif s'est transformé d'une tout autre manière et a donné naissance à la série des *fours à réverbère*, qui forment, à côté des fours à cuve, une partie non moins importante de l'outillage métallurgique.

Nous avons dit que l'on pouvait étaler sur la plate-forme devant le foyer les matières qu'on veut exposer largement à l'air. Si nous imaginons l'ensemble recouvert par une voûte, nous aurons l'embryon du four à réverbère.

Dans sa forme actuelle ce four comprend deux compartiments recouverts par une voûte commune. L'un est le *laboratoire* où l'on étend la charge sur une sole plate; des portes de travail sont ouvertes dans ses parois latérales pour introduire la charge, la

retirer, ou la brasser au besoin avec des outils; l'autre est le *foyer*, où le combustible est chargé sur une grille.

Les flammes passent du foyer dans le laboratoire par-dessus une sorte de digue, séparant les deux parties, qu'on appelle le *pont* ou l'*autel*. Puis, après avoir chauffé le laboratoire, elles se rendent à la cheminée par un conduit nommé *rampant*. Le foyer

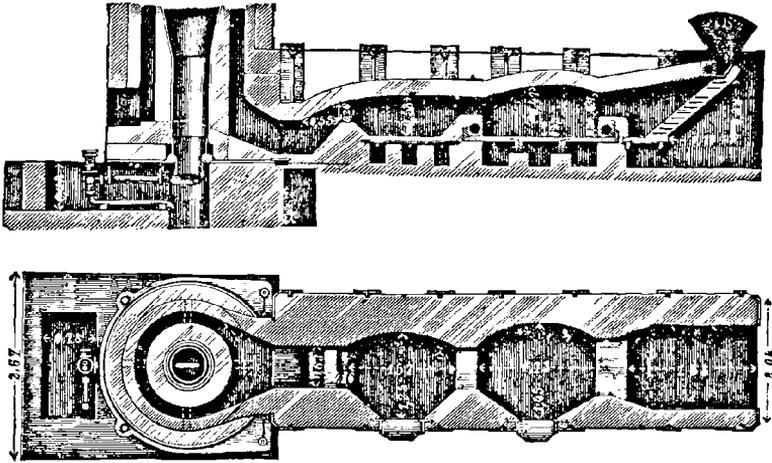


FIG. 8. — Four de puddlage à cassin (plan).

Les flammes passent d'abord sur la première sole, où se fait le puddlage, ensuite sur la deuxième sole, appelée *cassin*, où les saumons de fonte se chauffent au rouge avant d'être chargés sur la première; enfin, elles chauffent une chaudière verticale.

peut être alimenté par de l'air soufflé, mais le plus souvent on se contente d'activer le tirage par une cheminée de hauteur convenable.

Dans ce genre d'appareils, les charges sont entièrement séparées du charbon, et l'atmosphère y est oxydante, parce que l'air extérieur y rentre facilement par les portes de travail. Ils se prêtent donc bien aux grillages et aux affinages. Mais ils utilisent mal la chaleur et ne développent pas des températures aussi élevées que les fours à cuve, car les causes de refroidissement y

sont nombreuses; les flammes perdent de leur chaleur avant d'arriver dans le laboratoire; les rentrées d'air refroidissent l'atmosphère intérieure; enfin les charges y sont sous forme de couche peu épaisse, l'ensemble du laboratoire est large et plat, c'est-à-dire qu'il offre une surface relativement grande au rayonnement.

Cette dernière cause de pertes diminue d'importance à mesure qu'on augmente les dimensions et la capacité des fours. Le combustible est donc mieux utilisé dans les fours de grand volume; mais on ne peut y faire que les opérations auxquelles il suffit de chauffer modérément. Au contraire, si l'on veut obtenir de hautes températures, il faut faire le laboratoire petit par rapport au foyer. L'utilisation est alors très mauvaise, parce que les gaz sortent très chauds du rampant.

Pour économiser le combustible, on peut envoyer les flammes perdues dans un second laboratoire qu'elles chauffent à moins haute température. Ce compartiment supplémentaire peut servir soit à faire d'autres opérations, soit à commencer le chauffage des charges, que l'on achève en les faisant passer dans le premier laboratoire, où elles reçoivent le coup de feu final. Le foyer peut chauffer ainsi une série de laboratoires successifs, ou bien un seul laboratoire très allongé muni d'un grand nombre de portes, où l'on introduit les charges au bout le plus froid, pour les pousser peu à peu jusqu'à côté de l'autel. Ce sont les fours à *plusieurs portes* qui contiennent à la fois une série de plusieurs charges à des degrés divers d'avancement, et qui réalisent dans une certaine mesure le chauffage méthodique; les flammes y circulent en sens inverse de la charge et peuvent se refroidir avant d'être évacuées par le rampant, si le parcours est assez long (voir fig. 9).

Ces fours, relativement économiques, le sont cependant moins que les fours à cuve; ils ne se prêtent qu'à certaines opérations, surtout aux grillages.

On peut considérer les longs fours à réverbère comme dérivés du foyer primitif, par un développement progressif dans le

sens horizontal, tandis que les fours à cuve en dérivent par un développement en hauteur.

Fours à creusets. — On peut rapprocher des fours à réverbère plusieurs autres types qui en diffèrent par la forme du labo-

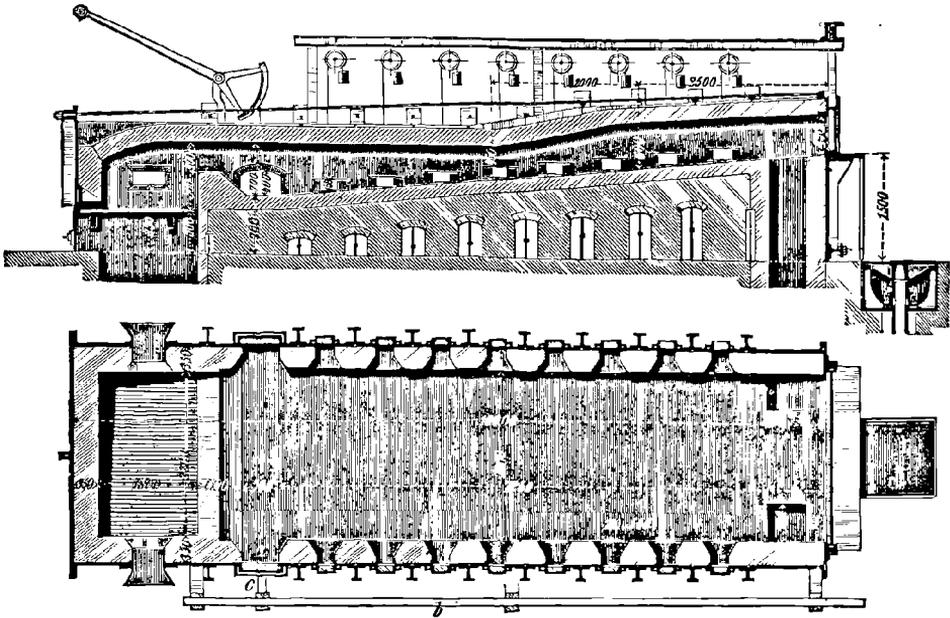


FIG. 9. — Four à plusieurs portes.

Les charges sont introduites à l'extrémité de droite et transportées progressivement jusqu'auprès du four à gauche.

ratoire, mais qui sont aussi alimentés par des foyers séparés. Tels sont, par exemple, les *fours à banquettes* qu'on emploie lorsqu'il s'agit de chauffer des matières en vase clos, à l'abri du contact des flammes, dans des creusets ou dans des caisses fermées. Ces vases sont posés sur des banquettes entre lesquelles se trouve la grille, placée au fond d'une sorte de fosse centrale.

Ce mode de chauffage indirect est le plus onéreux de tous; il faut échauffer les parois des creusets avant que la chaleur pénètre jusqu'à la charge. On brûle donc une grande quantité de combustible inutilement. Les récipients doivent être assez petits, sans quoi il faudrait trop longtemps pour faire pénétrer la chaleur

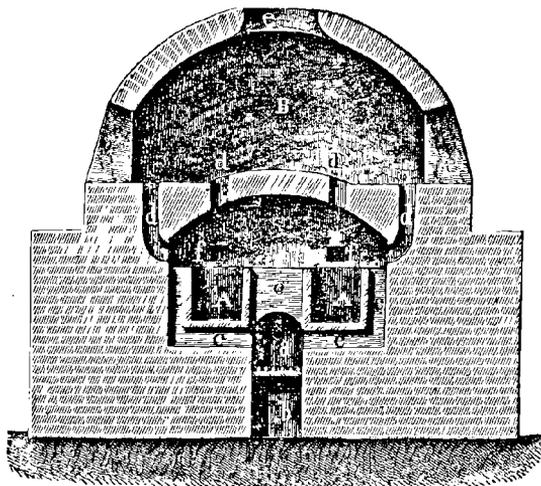


FIG. 10. — Four de cimentation.

Le foyer *a b* est placé entre deux banquettes sur lesquelles se trouvent les caisses contenant le fer à cimenter. Les flammes font le tour de ces caisses et sortent par la voûte.

jusqu'au centre, leur charge est donc faible, et les manipulations pour mettre en place les creusets, les sortir, etc., représentent des frais relativement considérables. On n'emploie les creusets qu'en cas de nécessité, pour la fusion des métaux ayant une certaine valeur.

Si le chauffage en vase clos doit se faire à température modérée, les récipients peuvent recevoir des dimensions plus grandes et, au lieu d'être mobiles, se trouver constitués par un compartiment fixe du four, inaccessible aux flammes. Tel est le

cas du four à *moufle*; c'est un four à réverbère, dont le laboratoire, au lieu d'être traversé par les flammes, est seulement entouré par elles; ce laboratoire a la forme d'une longue voûte large et peu élevée; il communique avec l'extérieur par une porte de travail placée sur le devant et avec une cheminée de tirage

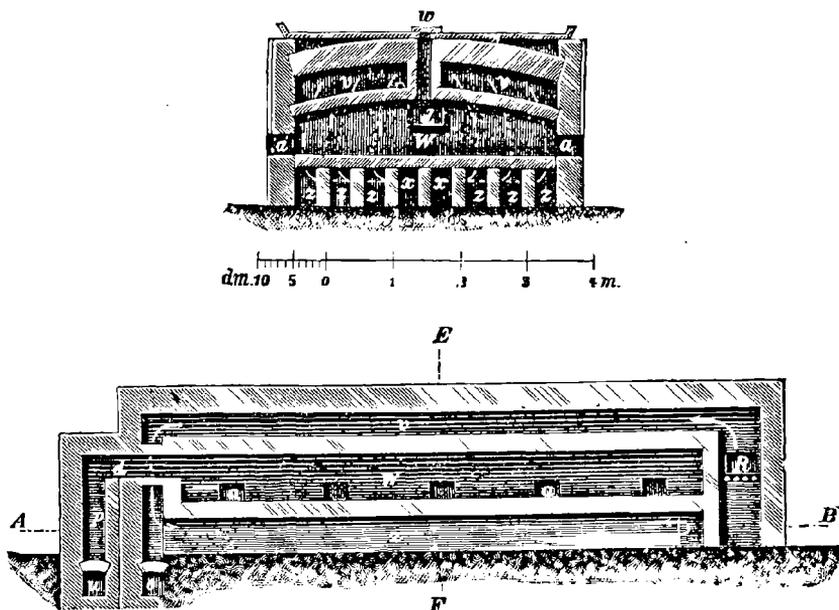


FIG. 11. — Four à moufle.

Les flammes circulent d'abord au-dessus de la voûte en *v*, puis sous la sole dans les conduits *x*.
— Les charges sont chauffées dans le moufle *W*, desservi par les portes latérales *a*. Le chargement se fait par l'orifice *W*.

par des carneaux ménagés à l'autre extrémité. Le foyer en est entièrement séparé : les flammes circulent sous la sole et au-dessus de la voûte. Ce genre de four est souvent usité dans les fabriques de produits chimiques, pour la fabrication de certains acides, lorsque l'opération dégage des gaz qu'on veut condenser sans les mélanger à ceux du foyer. C'est dans le même but qu'on

le substitue au four à réverbère pour certaines opérations métallurgiques.

Fours soufflés. — Dans tous les fours à foyers séparés, le tirage est en général activé par une cheminée, mais on peut aussi fermer le foyer et injecter de l'air sous la grille au moyen d'une soufflerie quelconque. Ce système permet d'activer la combustion à volonté : on peut brûler le charbon sous une épaisseur plus forte. Cette circonstance modifie l'allure du four, parce que la pression à l'intérieur du laboratoire devient supérieure à la pression atmosphérique : les flammes tendent à sortir par toutes les issues, tandis que dans les fours à tirage naturel c'est l'air extérieur qui est attiré et rentre par les fissures, par les portes de travail. Les rentrées d'air refroidissent le laboratoire et y établissent une atmosphère oxydante ; les fours soufflés évitent cette cause de refroidissement, et si la couche de charbon est assez épaisse sur la grille, l'atmosphère intérieure n'est pas oxydante, parce qu'il n'y pénètre pas d'air en excès. Cette dernière circonstance est utile pour certaines opérations métallurgiques.

Une transformation plus importante a été réalisée par l'invention du chauffage au gaz, qui a commencé à se répandre dans l'industrie vers le milieu de notre siècle. Dans ce genre de fours, le foyer, qui peut être placé à grande distance, n'a plus du tout le même rôle que dans les fours ordinaires : il n'est pas destiné à engendrer directement de la chaleur ; ce n'est plus qu'un appareil producteur de gaz combustibles destinés à venir se brûler dans le laboratoire ; la combustion et la production de la chaleur se font donc dans l'enceinte même qu'on veut chauffer.

FOURS A GAZ

Le chauffage au gaz est souvent employé en métallurgie. Il permet d'utiliser beaucoup de combustibles de qualité inférieure

et aussi de réaliser des températures plus fortes que dans les fours à réverbère ordinaires, ou de chauffer de plus grandes enceintes.

Production du gaz. — Dans les laboratoires on peut utiliser comme combustible le gaz d'éclairage obtenu par la distillation de la houille en vase clos. Ce gaz se compose presque uniquement d'hydrocarbure, qui a un pouvoir calorifique considérable. Pour l'industrie, ce serait en général un combustible beaucoup trop cher. On emploie des gaz moins riches en matières combustibles et où l'élément utile est surtout l'oxyde de carbone.

Pour les obtenir, on brûle le charbon dans des foyers spéciaux appelés *gazogènes*, où il est entassé sur une assez grande hauteur. L'acide carbonique que produirait la combustion complète se décompose alors au contact du charbon rouge, suivant la formule $\text{CO}_2 + \text{C} = 2 \text{CO}$; il donne un composé qui contient moins d'oxygène et plus de carbone et qui est lui-même susceptible de brûler en présence d'un afflux d'air nouveau; c'est l'oxyde de carbone, le gaz que l'on voit brûler avec une flamme bleue au-dessus des feux de coke ou de charbon de bois. Cette combustion, qui se produit tout de suite dans les foyers ordinaires parce que l'oxyde de carbone en se dégagant du charbon rencontre immédiatement de l'air en excès, n'aura lieu que plus tard si on recueille le gaz dans des conduits fermés pour l'amener aux fours où il rencontrera seulement l'air capable de le brûler.

Dans les produits des gazogènes, l'oxyde de carbone est naturellement mélangé à l'azote provenant de l'air; il est en outre accompagné d'autres éléments combustibles: ce sont les hydrocarbures produits par la distillation.

Gazogènes. — Les gazogènes à tirage naturel sont des chambres voûtées dont le fond est formé par une grille inclinée; le charbon est chargé régulièrement par une ouverture pratiquée dans la voûte de manière que la chambre en reste toujours pleine. Il descend

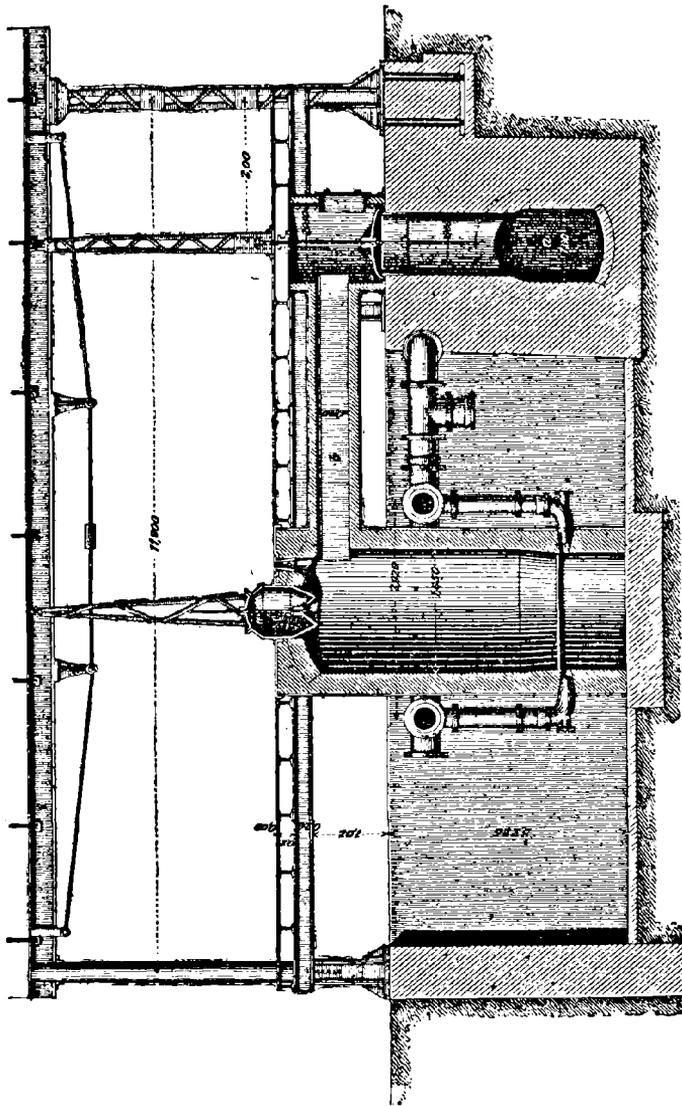


FIG. 12. — Gazogène à cuve soufflée.

La cuve est fermée en haut par une trémie permettant l'introduction du charbon. En bas, se trouvent deux tuyères soufflantes. Les gaz se rendent par le conduit *b* dans un collecteur conduisant aux fours, d'où chaque cuve peut être isolée par une valve à cloche.

et vient s'étaler sur la grille à mesure que la combustion lui fait de la place.

Avant de pénétrer jusqu'à la grille et dans les régions les plus chaudes du foyer, le charbon dans les couches supérieures s'échauffe peu à peu et se distille à peu près comme en vase clos; il perd la plus grande partie de ses éléments volatils qui se dégagent et vont se mélanger plus loin aux gaz produits par la combustion. Il se transforme ainsi en coke, qui vient s'accumuler sur la partie basse de la grille et y brûle dans une forte épaisseur, de manière à donner de l'oxyde de carbone.

Le gazogène doit être conduit assez lentement pour que l'air soit entièrement désoxydé par la combustion dans la partie inférieure, et qu'il n'arrive pas jusqu'au sommet de la couche, où il pourrait brûler les hydrocarbures et l'oxyde de carbone.

Quand on brûle dans ces foyers de la houille, on obtient des gaz très riches en hydrocarbures et qui ont un assez grand pouvoir calorifique. Avec les combustibles maigres, comme l'an-thracite, on obtient des gaz moins riches qui ne contiennent guère que de l'oxyde de carbone. Avec les combustibles humides, comme les tourbes et les lignites, on obtiendrait un gaz chargé de vapeur d'eau et qui brûlerait mal. En ce cas, on emploie des gazogènes spéciaux à flamme renversée où les gaz, au lieu de sortir par le haut du foyer, s'échappent vers le bas et sont obligés de traverser la couche de charbon incandescent; la vapeur d'eau s'y décompose en donnant de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène libre, c'est-à-dire deux éléments combustibles.

Quand on emploie des charbons maigres, on injecte parfois de la vapeur d'eau exprès pour enrichir le gaz en hydrogène. Si l'on force la proportion de vapeur d'eau, on obtiendra ce qu'on appelle le gaz à l'eau (ou gaz pauvre, par opposition au gaz d'éclairage ordinaire). Ce gaz, contenant beaucoup d'hydrogène, donne beaucoup de chaleur, mais sa flamme n'est pas éclairante. On l'emploie dans les machines à gaz, ou parfois à l'éclairage, en l'enrichissant par des additions d'hydrocarbure.

Les gazogènes sont parfois alimentés avec de l'air soufflé; on leur donne alors la forme d'une tour où l'on entasse le charbon sur une grande hauteur. La pression de l'air lui permet de traverser une couche plus épaisse et l'on peut activer la combustion à volonté.

Les charbons impurs, cendreux ou humides, qui ne donneraient que peu de chaleur dans un foyer ordinaire, peuvent servir

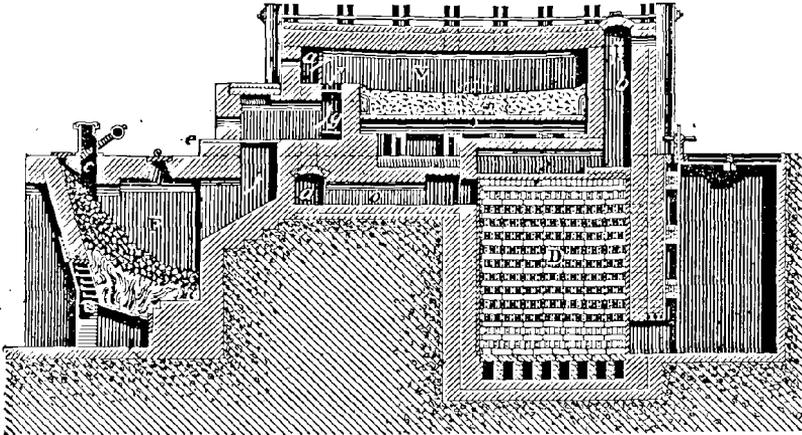


FIG. 13. — Four Ponsard.

Les gaz produits en *A* viennent se brûler en *f* au contact de l'air chaud des flammes, sortent en *h* et circulent dans la chambre *c*, autour de briques creuses formant une série de conduits; l'air traverse ces conduits et s'y chauffe avant de se rendre par *d*, *e*, à l'avant du four.

aussi bien que les autres au chauffage des fours à gaz. La quantité de cendres devient ici indifférente (1); le gaz que l'on obtient est toujours à peu près le même, quelle que soit la qualité du char-

(1) Si le charbon contient beaucoup de cendres, il faudra naturellement en brûler davantage pour obtenir une quantité donnée de gaz combustible. On devra employer plus de gazogènes pour alimenter un four : mais celui-ci se trouvera dans les mêmes conditions que s'il était desservi par moins de gazogènes brûlant du charbon pur.

bon. Les charbons maigres qui brûlent sans flamme ne pourraient chauffer un four à réverbère ordinaire; une fois transformés en gaz, celui-ci pourra servir à obtenir des flammes longues aussi bien que s'il provenait d'un charbon flambant.

Combustion des gaz. — Les gaz provenant des gazogènes peuvent être dirigés dans des fours quelconques; ils y débouchent par des orifices étroits à côté desquels sont ménagés d'autres orifices par où est appelé l'air qui doit servir à la combustion. Cet air doit se mélanger intimement au gaz, et il faut que le mélange s'allume instantanément, sans quoi il constituerait un gaz explosif. La haute température du four suffit en général à assurer cet allumage; dans le cas contraire il faut disposer au-dessous du point où l'air se réunit au gaz une petite grille sur laquelle on entretient un feu. C'est ce qu'il faut toujours faire lorsqu'on met les fours en train.

Les gaz se mélangeant progressivement à l'air viennent brûler dans le four lui-même et peuvent donner des flammes très longues si les deux jets sont à peu près parallèles et ne se pénètrent que peu à peu. C'est ce qui permet de chauffer de grandes enceintes.

Lorsqu'on veut obtenir des températures élevées, il faut activer la combustion du gaz et la localiser dans un espace plus faible. On peut obtenir ce résultat en employant de l'air soufflé, de manière que le jet d'air pénètre au travers du jet de gaz et s'y mélange rapidement. La flamme devient alors plus courte et plus chaude.

Ce procédé peut servir pour chauffer à haute température des fours de petit volume, mais le plus souvent, pour obtenir plus de chaleur, on réalise la combustion avec de l'air chaud, et au besoin même on surchauffe aussi les gaz avant de les brûler.

Chauffage de l'air. — La combustion d'un poids donné de gaz développera toujours la même quantité de chaleur et donnera

la même élévation de température. La température finale de la flamme sera donc plus élevée si les gaz au début étaient chauds au lieu d'être froids. Supposons, par exemple, que des gaz et de l'air froid se trouvent portés à 1500 degrés par la combustion, leur température devra atteindre 2000 degrés si, avant de se brûler, ils étaient déjà chauffés à 500 degrés, car la chaleur produite par la combustion élèvera toujours la température de 1500 degrés.

La température que l'on peut réaliser ainsi a une limite qui

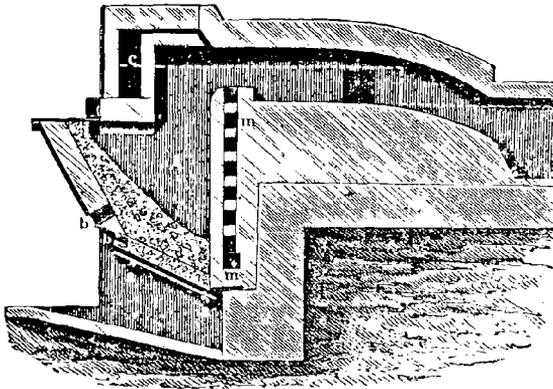


FIG. 14. — Four Boëtius.

L'air se chauffe dans les parois creuses tout autour du gazogène en m m, avant de déboucher dans la voute et par le pont pour brûler les gaz.

est déterminée surtout par le rayonnement à l'extérieur. Cette déperdition de chaleur devient d'autant plus active que la température est plus forte, et l'on arrive bientôt à un état d'équilibre où l'on ne peut pas produire plus de chaleur que le four n'en dissipe naturellement ; la température devient alors stationnaire. Cette limite pratique est atteinte vers 1500 à 1600 degrés.

Pour la plupart des opérations métallurgiques on pourrait se contenter de chauffer l'air de combustion. Le gaz arrive déjà chaud du gazogène, si l'on dispose celui-ci tout près du four. Quand on

n'a pas besoin de températures très élevées, on peut chauffer l'air en le faisant circuler dans les parois des fours ou sous la sole (fours Boëtius, Bicheroux, etc.) (Voir fig. 14 et 16).

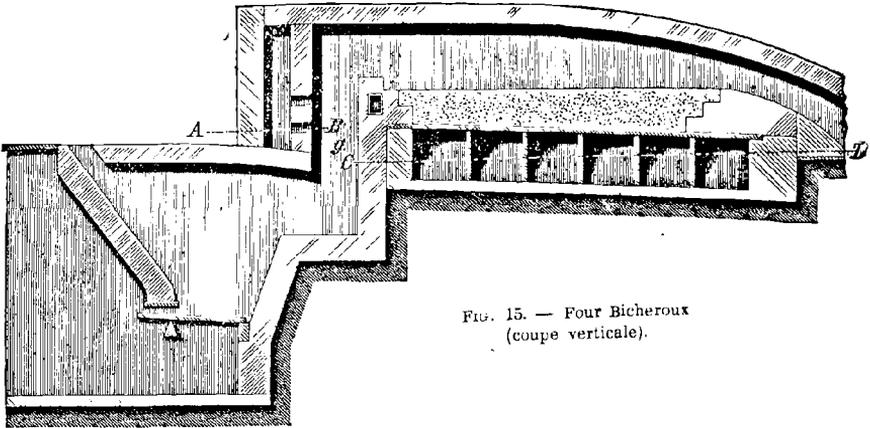


FIG. 15. — Four Bicheroux
(coupe verticale).

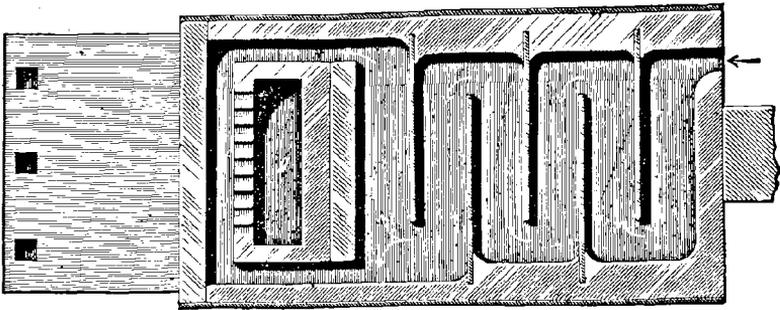


FIG. 16. — Four Bicheroux (plan).

L'air se chauffe dans les compartiments cloisonnés sous la tôle avant de se rendre en *f* où il pénètre par une série de petits orifices dans la nappe de gaz arrivant par *g*.

Pour avoir un chauffage plus énergique, on emploiera des récupérateurs spéciaux; on fera, par exemple, circuler les flammes, au sortir du four, dans une chambre placée au-dessous du four,

où se trouvent une série de tuyaux de poterie par lesquels passe l'air (récupérateurs Ponsard, Lencauchez, etc.) (Voir fig. 13).

Ces derniers systèmes sont plus compliqués de construction que les précédents, mais ils permettront d'obtenir des températures plus élevées.

Fours Siemens. — Pour aller plus loin il faut surchauffer à la fois l'air et les gaz : tel est le but des régénérateurs Siemens, dont l'emploi a été pour la métallurgie l'origine des progrès les plus importants. Au-dessous ou à côté du four sont disposées quatre chambres remplies de briques empilées à claire-voie. On fait passer l'air et les gaz séparément par deux de ces chambres, qui ont été préalablement chauffées au rouge blanc. Par suite de leur contact multiplié avec les briques, ils s'échauffent très fortement et atteignent une température voisine de 1000 degrés, qu'il serait impossible de leur donner par tous les autres moyens de chauffage indirect. Au bout d'un certain temps, les briques se trouveront refroidies. C'est pour cela qu'il y a quatre chambres.

Pendant que deux d'entre elles servent à la circulation des gaz et de l'air, les deux autres sont en chauffage et se préparent à remplacer les premières pendant la période suivante. Le chauffage s'effectue en faisant passer dans ces deux chambres les flammes qui sortent du four avant de les envoyer à la cheminée, où les produits de la combustion arrivent ainsi complètement refroidis.

Ce roulement pourra donc s'obtenir à condition de renverser d'une manière périodique le courant qui traverse le four. Pendant que les gaz et l'air arrivent séparément par les deux chambres de gauche, les flammes sortent par les deux chambres de droite qui s'échauffent. Quand les premières auront perdu leur chaleur, les secondes seront portées à l'incandescence; on renversera le courant, les gaz et l'air entreront par la droite, les flammes sortiront par la gauche. Ainsi, à chaque instant, les gaz et l'air rapportent

dans le four la chaleur perdue pendant les périodes précédentes et que les récupérateurs avaient emmagasinée (1).

Ce système réalise à la fois une grande économie de combustible, parce qu'on utilise dans les récupérateurs toute la chaleur produite par la combustion, et il donne le maximum de tempéra-

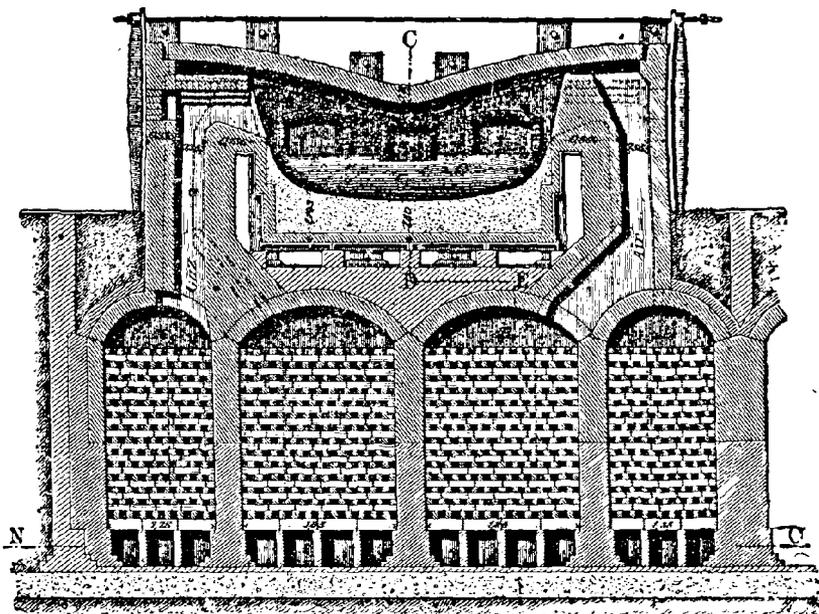


FIG. 17. — Four Siemens.

ture que les fours industriels puissent atteindre; seul il permet de fondre les métaux très réfractaires, comme le fer et l'acier

(1) Avec ce procédé, le chauffage de l'air est plus direct et plus énergique que dans les récupérateurs ordinaires. Dans ceux-ci l'air circule dans des tuyaux chauffés à l'extérieur par des flammes : la transmission de la chaleur est donc *indirecte*, elle se fait à travers la paroi des tuyaux, et l'air n'est en contact qu'avec la face la moins chaude. Dans les régénérateurs Siemens l'air est *directement* en contact avec les surfaces qui ont été léchées précédemment par les flammes et portées à la plus haute température possible.

doux. Il permet aussi de chauffer des enceintes d'un volume exceptionnel. C'est ainsi qu'en verrerie on est arrivé à fondre le verre en grande masse dans de vastes bassins, au lieu de le fondre dans de petits creusets comme autrefois.

En métallurgie, il a permis d'accroître beaucoup la capacité et la puissance de production des fours; nous verrons notamment ces applications dans le traitement des minerais de zinc et dans la métallurgie du fer. Enfin ces résultats remarquables, que l'on ne pouvait obtenir autrefois avec les meilleurs charbons, on peut

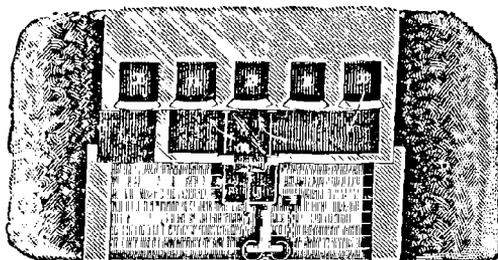


FIG. 18. — Valves du four Siemens.

Les conduits *u u* communiquent avec les chambres à gaz; les conduits *x x* avec les chambres à air. La conduite *x* mène à la cheminée. Dans la situation représentée, les deux chambres de gauche communiquent avec la cheminée. La chambre *u* de droite communique seule avec les gazogènes. En tournant la valve de 90 degrés, ce serait l'inverse. Il y a une autre valve analogue pour l'air.

aujourd'hui les réaliser avec les combustibles les plus misérables, même avec des rebuts. C'est ainsi qu'en Suède on est arrivé à fondre l'acier en brûlant dans les gazogènes de la sciure de bois.

Dans les foyers ordinaires, la sciure de bois donnerait une flamme à basse température, refroidie par des torrents de vapeur d'eau. Il suffit de condenser cette vapeur en refroidissant les produits de la combustion, pour que le gaz obtenu dans un gazogène à bois soit aussi riche que s'il avait été fait avec du charbon.

Production des températures extrêmes. — On peut considérer 1600 degrés comme la limite extrême des températures que peut

réaliser le four Siemens, et quand il s'agit d'en approcher, quand par exemple on veut fondre le fer pur, il suffit de la moindre circonstance perturbatrice, telle que des rentrées d'air par les fissures ou une forme de four mal choisie, pour que l'opération ne réussisse pas complètement, que le métal ne devienne pas assez liquide.

Pour aller au delà, il faut concentrer une plus grande production de chaleur dans un plus faible espace. On peut y arriver en brûlant des gaz riches, comme le gaz d'éclairage ou l'hydrogène, avec de l'oxygène pur. L'air ne contient pas plus de 21 pour 100 d'oxygène, le reste est formé par l'azote, gaz inerte dont la présence ralentit la combustion et absorbe inutilement une grande partie de la chaleur dégagée. Avec l'oxygène pur, la combustion est beaucoup plus vive et rapide; la masse de gaz produite étant plus faible se trouve portée à une température plus élevée.

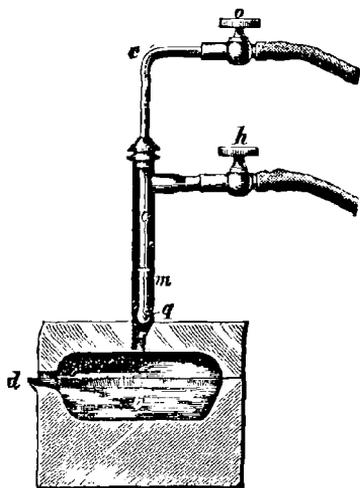


FIG. 19. — Four de fusion du platine.
L'oxygène arrive par le tuyau central, l'hydrogène par l'espace annulaire : ils viennent se réunir et brûler à la base du chalumeau.

Fours à chalumeau. — Les deux gaz produits séparément et emmagasinés dans des gazomètres sous une pression constante, sont envoyés dans un chalumeau composé de deux tubes concentriques; ils se rejoignent à l'extrémité et brûlent avec une flamme très courte, à peine lumi-

neuse, mais extrêmement chaude.

La flamme ne peut remonter dans le chalumeau parce que les deux gaz y sont séparés; mais, si une différence de pression entre les gazomètres permettait à l'oxygène de rentrer dans le tube à hydrogène, ou bien si les deux gaz se mélangaient dans le

four froid sans s'allumer immédiatement, il pourrait y avoir des explosions terribles.

La flamme étant très courte, on ne peut chauffer que de très petites enceintes. Le procédé est du reste coûteux; on ne s'en sert guère que pour fondre les métaux tels que le platine, qui sont très réfractaires et ont une grande valeur. On utilise aussi le chalumeau pour chauffer un point d'une masse métallique, quand il s'agit de faire des soudures autogènes, comme de souder ensemble par fusion des feuilles de plomb.

Nous verrons plus loin comment on emploie l'électricité dans certains cas, pour produire des températures exceptionnellement élevées.



CHAPITRE II

RÉDUCTION DES MINÉRAIS OXYDÉS

Principes généraux. — Réduction au four à cuve : plomb, cuivre, étain. — Réduction au réverbère. — Réduction au creuset.

THÉORIE DE LA RÉDUCTION

La plupart des oxydes métalliques sont réduits par le charbon, c'est-à-dire que, si on les chauffe en mélange avec du charbon, le métal se sépare à l'état libre; l'oxygène se combine au carbone, se dégage sous forme de gaz. Le charbon se brûle en quelque sorte aux dépens de l'oxygène du composé métallique; cette réaction est la base de la plupart des traitements métallurgiques usuels.

Les métaux sont plus ou moins faciles à réduire suivant leur affinité pour l'oxygène. On peut les ranger à ce point de vue en quatre grandes classes :

1° Les métaux alcalins ou alcalino-terreux comme le sodium, le magnésium, l'aluminium, qui sont les plus répandus à l'état d'oxydes dans les roches terrestres, sont à peu près impossibles à réduire par le charbon dans les fours ordinaires; il y faut les températures extrêmes du four électrique.

2° Les métaux comme le zinc, le fer, le nickel se réduisent sans peine par le charbon. Néanmoins, pour décomposer complètement leurs minerais, il faut des températures assez élevées.

3° Les métaux usuels fusibles, comme le cuivre, le plomb, se séparent plus facilement par réduction et à plus basse température.

4° Enfin les métaux précieux, comme l'argent, l'or, le platine, ne forment que des oxydes très peu stables; la chaleur suffit à les décomposer, le plus souvent même la réduction se trouve toute

faite dans la nature. L'or et le platine se rencontrent en général à l'état natif dans les roches, c'est-à-dire sous forme de métal libre. Ce cas se présente aussi quelquefois pour l'argent, le mercure et même pour le cuivre.

Fusion des métaux natifs. — Les minerais qui contiennent des métaux natifs représentent le cas le plus simple du traitement métallurgique. Il suffit de les chauffer n'importe comment à une température élevée, le métal fusible se sépare des gangues, il coule et peut être recueilli en lingots; la seule condition est d'avoir une température assez élevée pour que le métal fonde. Ce phénomène peut se produire assez facilement pour l'argent, le cuivre, l'or, et c'est probablement à un fait fortuit de cette nature que les premiers hommes ont dû de découvrir ces métaux.

Fusion réductive. — Si les métaux sont à l'état d'oxydes, il faut ajouter à la chaleur l'action du charbon en contact intime avec le minerai; mais les choses ne se passent pas toujours aussi simplement, et, si le minerai est relativement pauvre, il peut arriver que le métal ne se sépare pas. Il se trouve mélangé à des gangues, c'est-à-dire à des matières terreuses indécomposables, infusibles par elles-mêmes, comme la silice, l'argile, quelquefois le calcaire, et les gouttelettes de métal perdues au milieu de cette masse ne se rassemblent pas. Pour amener la séparation, il faut arriver à fondre les gangues; on obtient alors ce que l'on appelle un laitier ou une scorie: c'est un composé fusible, contenant tous les éléments stériles du minerai.

Lorsque tout est ainsi fondu, le métal se sépare facilement; par suite de son poids, il se liquate et se rassemble au-dessous de la scorie qui surnage. Avec certains minerais riches, ce phénomène se produit spontanément, parce que les oxydes métalliques jouissent de la propriété de se combiner avec de la silice et de former avec elle des composés fusibles; c'est ce que l'on appelle la *scorification des métaux*. Par exemple, si l'on chauffe dans un

foyer soufflé, comme on le faisait dans les anciennes forges, des minerais de fer riches avec du charbon de bois, on obtiendra une certaine quantité de fer métallique et une scorie noire fondue où le reste de l'oxyde de fer, non décomposé par le charbon, est combiné à la silice; on n'extrait donc qu'une partie du métal, le reste se scorifie et ne se réduit plus, parce que les silicates sont beaucoup plus difficiles à décomposer par le charbon que les oxydes libres. On comprend que la quantité d'oxyde de fer qui reste dans la scorie est en relation avec la quantité de silice qu'il y a à saturer, de sorte que, si le minerai était pauvre, on n'obtiendrait plus de métal, tout serait scorifié, on n'aboutirait qu'à fondre la masse sans la réduire.

Rôle des fondants. — Dans ce cas, qui est le plus général, il faut ajouter d'autres oxydes qui jouent le rôle de *fondants*, c'est-à-dire qui se combinent à la silice en formant avec elle une scorie liquide et qui se substituent en quelque sorte à l'oxyde métallique dont on veut empêcher la scorification.

Ainsi, dans le traitement métallurgique des minerais oxydés, en même temps qu'on fait agir le charbon pour les réduire, on ajoute des fondants pour liquéfier les gangues. Ces matières additionnelles devront être dosées exactement suivant la nature du minerai, afin que la scorie soit assez fusible et qu'elle ne retienne pas l'oxyde que l'on veut réduire, ce qui arriverait si la silice n'était pas suffisamment saturée par d'autres bases.

Le mélange du minerai et des additions nécessaires est ce que l'on appelle le *lit de fusion*. Le calcul du lit de fusion est un des points les plus importants pour la réussite du traitement.

Les fondants doivent être, en général, des oxydes plus stables, plus résistants à l'action du charbon que celui qu'on veut réduire, puisqu'ils doivent prendre la place de ce dernier dans la scorie et ne pas se décomposer. Il se présente deux cas principaux: s'il s'agit, par exemple, d'extraire un métal fusible et facile à réduire, comme le plomb, le fondant peut être de l'oxyde de fer; on obtien-

dra une scorie ferrugineuse très fusible à une température modérée et avec une quantité de charbon limitée, on pourra réduire la totalité du plomb sans décomposer les oxydes de fer.

Si, au contraire, c'est un métal réfractaire comme le fer que l'on veut fabriquer, les fondants devront être des bases encore plus stables, c'est-à-dire des oxydes alcalins ou terreux.

Les alcalis, comme la potasse et la soude, sont d'excellents fondants, mais ils seraient trop coûteux pour le traitement des métaux usuels. La chaux et la magnésie sont à peu près les seules bases que l'on puisse employer pratiquement; il faut alors calculer très exactement les proportions; ce n'est que dans des limites de composition assez étroites que les silicates à base terreuse deviennent fusibles. Les scories ainsi formées diffèrent des scories métalliques ordinaires parce qu'elles sont blanches, de structure pierreuse: on les appelle des *laitiers*; ces composés ne fondent qu'à des températures très hautes. C'est cette circonstance surtout qui oblige à chauffer à blanc, pour obtenir la réduction du fer et des métaux analogues, car au laboratoire, lorsqu'on agit sur l'oxyde pur, on arrive à le réduire presque au rouge faible.

Réduction partielle. — On voit que la réduction peut devenir un moyen de séparation des métaux, quand il y a entre eux une grande différence d'affinité pour l'oxygène. Par exemple, on peut extraire le plomb métallique de ses minerais, tout en laissant le fer dans la scorie. Parmi les métaux usuels, le cuivre et l'étain jouissent à ce point de vue de propriétés intermédiaires entre celles du fer et du plomb; ils se réduisent moins facilement que ce dernier, ils ont un peu moins de tendance à se scorifier que le fer. Dans un minerai qui contiendrait à la fois du fer et du cuivre, on peut réduire une partie notable du second métal en laissant presque tout le premier dans la scorie. Toutefois la différence n'est plus assez grande pour que les séparations soient nettes.

Réduction au four à cuve. — La réduction des minerais riches

peut se faire, comme nous l'avons vu, dans un bas foyer soufflé ; c'est le procédé primitif qui a suffi tant qu'on ne produisait les métaux qu'en petite quantité et qu'ils avaient assez de valeur pour supporter des frais de main-d'œuvre considérables. Depuis que le développement de l'industrie réclame des masses énormes de métal, on est obligé de traiter des minerais plus pauvres pour produire à bon marché ; il faut des appareils plus puissants et plus volumineux. La réduction se fait presque toujours au four à cuve.

Le minerai, chargé au gueulard avec les fondants et en couches qui alternent avec des couches de charbon, descend peu à peu dans la cuve, qui reste toujours pleine, il s'échauffe progressivement ; il arrive devant les tuyères, où le charbon brûle sous l'action de l'air soufflé, et là, toutes les matières se fondent. La scorie et le métal viennent se réunir au-dessous dans le creuset. On les fait écouler séparément par des trous de coulée percés à différentes hauteurs.

Conduite du four à cuve. — A mesure que le charbon brûle devant les tuyères, il se fait un vide qui détermine la descente des charges supérieures. C'est donc l'allure de la soufflerie qui réglera la vitesse de descente ; car, plus on injecte d'air, plus on brûle de charbon. L'allure ne doit pas cependant être trop rapide ; il faut que le minerai séjourne dans la cuve assez longtemps pour se bien préparer ; il y subit l'action des gaz qui s'échappent à travers le four et qui sont chargés d'oxyde de carbone.

Ce gaz peut réduire les oxydes métalliques en s'emparant de leur oxygène pour se transformer en acide carbonique.

La réduction commence donc dans la cuve : il faut qu'elle soit aussi avancée que possible au moment où les charges arrivent devant les tuyères. Si la fusion se produisait trop tôt, la scorie silicatée qui se formerait serait difficile à réduire. En outre, si la charge traversait le four trop vite, elle n'atteindrait pas une température aussi haute. Ainsi, la descente doit être d'autant plus lente que le lit de fusion est plus difficile à réduire et à fondre. Le

volume du fourneau doit être en rapport avec les quantités de matières qu'on y veut traiter et le temps qu'elles doivent y séjourner.

S'agit-il de réduire les minerais de fer, on emploiera des cuves très élevées et très volumineuses que l'on appelle *hauts fourneaux*, dont la hauteur va jusqu'à 25 mètres.

Pour le plomb, très fusible et très réductible, il suffira de petits *fourneaux à manche* (1), dont la hauteur se réduit parfois à 1 ou 2 mètres ; pour le cuivre, il faudra des conditions intermédiaires, on emploiera ce que l'on appelle des *demi-hauts fourneaux*, dont la cuve peut avoir de 6 à 10 mètres de hauteur.

Nous étudierons les hauts fourneaux dans un chapitre spécial ; nous allons donner ici quelques exemples des fours employés pour l'extraction des métaux relativement fusibles.

Fours à plomb. — Les minerais de plomb sont le plus souvent à l'état de sulfures ; on ne trouve le métal sous forme de composé oxydé que dans quelques gisements et surtout dans les parties supérieures, où le sulfure, s'altérant par l'action des eaux aérées, s'est transformé peu à peu en oxydes, en carbonates, en sulfates. Mais, comme nous le verrons plus loin, on peut transformer tous les sulfures métalliques en oxyde par une opération préalable, qu'on appelle le *grillage*.

Le plomb s'extrait le plus souvent par réduction des minerais grillés qui sont par conséquent à l'état d'oxyde.

Autrefois, cette réduction se faisait dans des fours peu élevés où la cuve était formée par quatre murs ; le bas du four étant ouvert d'un côté pour communiquer avec un bassin où se rassemble le plomb, l'air injecté par une ou deux tuyères sur la face opposée. On emploie encore quelquefois ces fours quand il s'agit de réduire

(1) Ce nom provient sans doute des manches en toile par lesquelles on réunissait les tuyères, du côté extérieur, avec les conduites de vent venant de la soufflerie. Aujourd'hui, on emploie pour faire cette jonction des tubulures en tôle dont la forme rappelle encore parfois celle d'une manche.

des oxydes très riches, comme par exemple les *litharges*, qui sont un produit accessoire de certaines opérations et qui sont de l'oxyde de plomb presque pur; mais, quand il y a beaucoup de gangues à fondre, la consommation de combustible devient plus considérable et il y a économie à employer des fours plus élevés, où la chaleur est mieux utilisée. En outre, les anciens fours ne pouvaient faire que des campagnes assez courtes, les parois de l'ouvrage étant rapidement rongées par les scories plombeuses qui agissent comme les fondants sur la silice des briques (1).

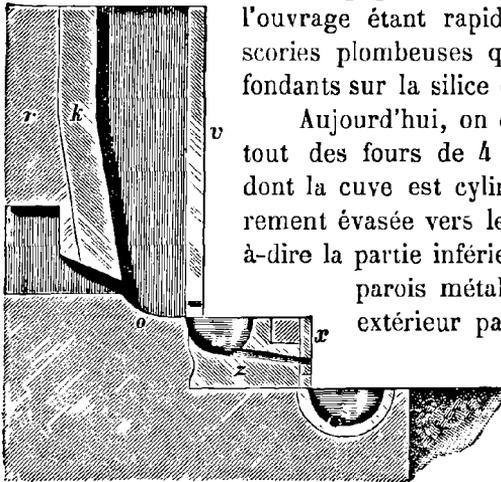


Fig. 20. — Anciens fours du Hartz.

Aujourd'hui, on emploie à peu près partout des fours de 4 à 6 mètres de hauteur dont la cuve est cylindrique et parfois légèrement évasée vers le haut. L'ouvrage, c'est-à-dire la partie inférieure, est formé avec des parois métalliques refroidies du côté extérieur par un courant d'eau, de manière que, par suite de la conductibilité du métal, les scories tendent à se figer à l'intérieur au contact de ces plaques refroidies et ne les attaquent pas. Ces fours marchent à poitrine fermée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas à la base de large ouverture; le plomb, à mesure qu'il s'accumule une quantité suffisante au fond du creuset, sort par un canal qui forme une sorte de siphon renversé. Les scories se déversent d'une manière continue par un orifice pratiqué un peu au-dessus des tuyères.

On charge dans ces fours le minerai grillé, mélangé ordinaire-

(1) L'argile ou silicate d'alumine qui forme les briques, est par lui-même infusible; il peut devenir fusible s'il se combine avec des oxygènes métalliques. Cette combinaison se produit au contact des scories. L'oxyde de plomb a une action fondante très énergique.

ment de scories de forge ou de minerais de fer riches, ou de pyrites grillées, pour fournir l'oxyde de fer nécessaire et former une scorie ferreuse avec la silice des gangues. Cette scorie étant assez fusible, on arrive, dans les fours bien conduits, à brûler moins de 200 kilogrammes de charbon par tonne de lit de fusion. Le plus souvent aujourd'hui, on marche au coke. Le gueulard est généralement fermé par des cloches qu'on soulève pour introduire les charges; les gaz sont recueillis dans des tuyaux et conduits dans de grandes chambres de condensation ou dans une série de canaux très allongés avant de se rendre à la cheminée. Ils y déposent les poussières métalliques entraînées par le courant, et qui ont dans ce cas une certaine valeur par suite de la présence presque constante de l'argent associé avec le plomb.

Un four circulaire de 6 à 7 mètres de hauteur avec 1^m20 à 1^m50 de diamètre peut passer 50 à 90 tonnes de lit de fusion par jour, suivant que les matières sont plus ou moins fusibles. Il occupe vingt à trente ouvriers; la consommation de coke peut descendre au-dessous de 100 kilogrammes par tonne de

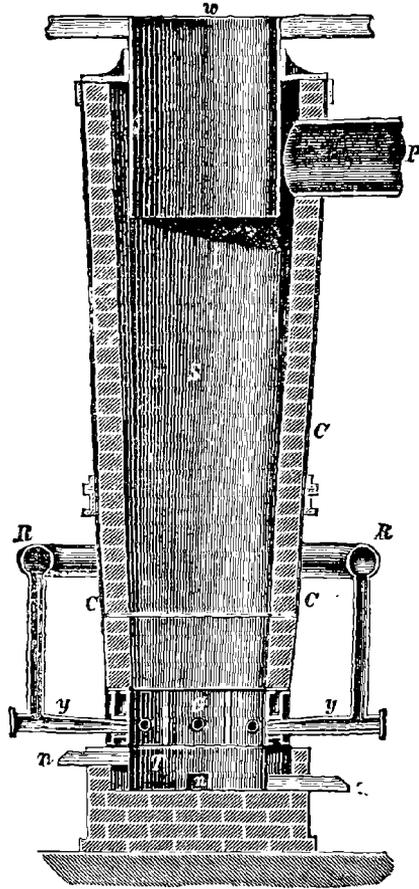


Fig. 21. — Four circulaire pour minerai de plomb.

matières traitées (1). Par suite de la hauteur faible du four, la

pression de l'air n'est pas considérable, et l'on peut souffler avec des ventilateurs tournants.

Les minerais subissent presque toujours la préparation mécanique avant d'être fondus et on les amène à une teneur de 30 à 40 pour 100. Toutefois, quand le minerai est très argentifère, il y a intérêt à ne pas pousser la préparation trop loin, car on perd beaucoup d'argent, dont les minéraux friables se pulvérisent et sont entraînés par l'eau. En Amérique, où les usines de fusion sont munies d'un outillage puissant et économique, on fond des minerais presque

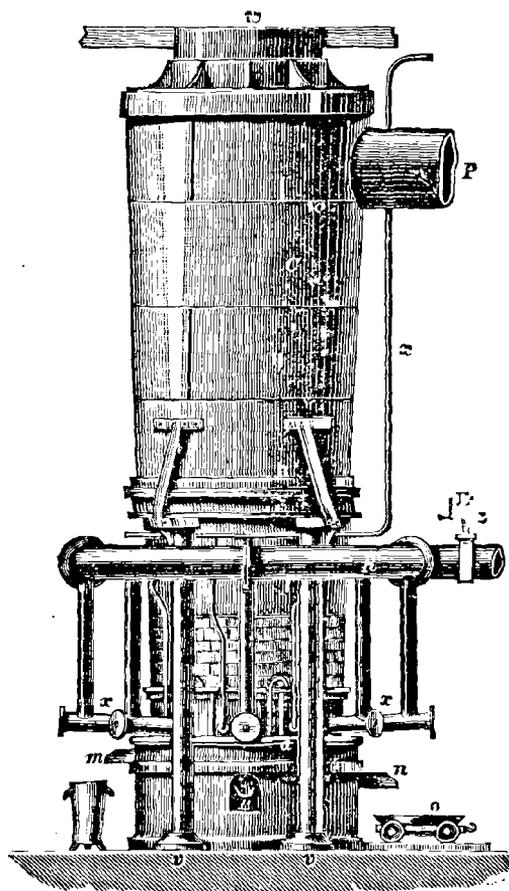


FIG. 22. — Four à cuve pour minerai de plomb.

x, tuyau distribuant l'eau aux tuyères et aux enveloppes refroidies; *P*, conduite de vent soufflé; *m*, trou de coulée des scories; *n*, trou de coulée du métal. - *w*, colonnes supportant la cuve garnie de tôle et indépendante du bas.

(1) Elle monte à près de 200 kilogrammes par tonne de minerai, parce que celui-ci ne forme souvent que la moitié du lit de fusion : entre les fondants on ajoute beaucoup de scories plombées à retraiter.

bruts dont la teneur descend souvent au-dessous de 20 pour 100. On y emploie souvent de grands fours rectangulaires, ayant jusqu'à 3 mètres de longueur sur 1 mètre de largeur, dont la production peut aller à 100 tonnes de minerai par jour.

Quand les minerais de plomb sont pauvres en argent, on pousse au contraire la préparation mécanique très loin, on les amène à des teneurs de 60 pour 100 et plus. Dans ce cas, il y a avantage à les traiter au réverbère, comme nous le verrons plus loin.

Comme le grillage n'élimine pas la totalité du soufre, on obtient souvent dans les fours à cuve, outre le plomb et la scorie, un troisième produit, les *mattes*, dont nous parlerons au chapitre suivant.

Fours à cuivre. — Le cuivre se trouve le plus souvent sous forme de minerai sulfuré dont la gangue est formée en grande partie par de la pyrite de fer fusible, et le traitement de ces minerais est plutôt une fusion qu'une véritable réduction. Nous en reparlerons plus loin. Cependant certains gisements donnent des carbonates et des silicates de cuivre.

Au Mansfeld on exploite des couches de schiste imprégnées de mouches de minerais cuivreux de toute nature. Ces schistes sont d'abord grillés, c'est-à-dire chauffés à l'air pour oxyder les sulfures et on les fond dans des demi-hauts fourneaux dont la hauteur peut aller à 10 et 12 mètres. (Voir fig. 4.)

Pour agrandir le volume, la cuve est alors évasée au centre; elle est portée sur des piliers isolés de façon à la rendre indépendante du creuset et de l'ouvrage, qui ont souvent besoin d'être réparés. Il y a ici une grande quantité de scories relativement réfractaires à fondre, car le minerai est très pauvre; on charge, en même temps que le minerai, de la chaux et de l'oxyde de fer comme fondants.

Extraction de l'étain. — L'étain se trouve dans la nature à

l'état d'oxyde, le plus souvent disséminé en très petite quantité dans des roches granitiques. On exploite soit les roches elles-mêmes, soit des sables d'alluvion qui proviennent de l'érosion de ces roches par les eaux. Si l'on cherchait à fondre de tels minerais, il serait impossible d'obtenir de l'étain pur, on aurait un volume de scories très considérable et, pour en extraire l'étain, il

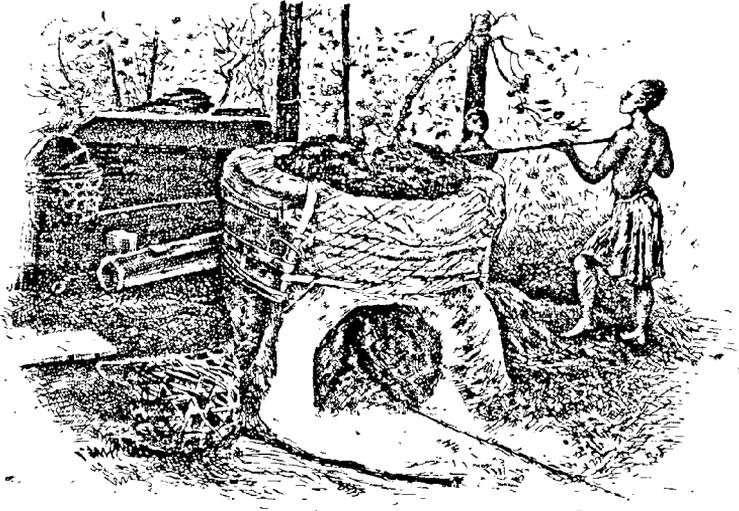


FIG. 23. — Four de fusion de l'étain à Malacca.

faudrait marcher à une température assez élevée. On réduirait en même temps le fer, dont l'oxyde se trouve toujours en proportion au moins égale, sinon supérieure à celle de l'étain.

Ces minerais sont broyés et soumis à une préparation mécanique très longue. On les lave dans des courants d'eau qui entraînent peu à peu toutes les matières légères jusqu'à ce que l'on arrive à ne laisser que des oxydes très riches qui peuvent contenir 50 à 60 pour 100 d'étain; alors, le lit de fusion étant très riche, on peut réduire à basse température, et,

comme il ne se forme que très peu de scories, celles-ci, malgré la réduction complète, n'entraînent qu'une faible partie de l'étain.

On opère alors dans de petits fours à manche de 1 mètre de hauteur. Le fond du four est incliné et, à mesure que l'étain se forme, il coule immédiatement dehors pour tomber dans des cuvettes en maçonnerie. Par suite du peu d'élévation du four, le fer n'a pas le temps de se réduire et reste tout entier dans les scories. On ne peut guère faire cette opération qu'au charbon de bois, combustible très pur, qui ne donne que très peu de cendres fusibles. Le coke donnerait une quantité de cendres beaucoup plus considérable; elles sont de nature plus réfractaire, elles augmenteraient beaucoup la masse des scories et il faudrait une température assez élevée pour la fondre.

Dans ces conditions on préfère, en général, opérer dans un four à réverbère, lequel permet de chauffer avec de la houille.

RÉDUCTION AU RÉVERBÈRE

Traitement des minerais d'étain. — Les fours à réverbère destinés à la réduction de l'étain sont de dimensions faibles; ils ont une sole creusée en forme de bassin.

On y étale le minerai mélangé de charbon en poudre. On le brasse avec des ringards; peu à peu l'étain coule sur la sole en pente et se rassemble dans le bassin ménagé sur le côté, d'où l'on peut l'extraire par un trou de coulée. La consommation de combustible devient ici beaucoup plus considérable que si l'on fait la réduction au four à cuve; l'action réductrice est moins énergique parce qu'il y a toujours excès d'air dans l'atmosphère du four, et l'on n'arriverait pas à réduire les oxydes relativement réfractaires comme celui du fer. Mais cet appareil peut être préférable quand on traite des matières très riches et des métaux fusibles; il donnera des produits plus purs, parce que les métaux les plus réductibles seront seuls à se séparer et que tous les autres resteront dans les scories.

Dans le cas particulier de l'étain, le four à réverbère devient même plus économique que le four à cuve, parce que, si l'on brûle plus de combustible, on emploie une variété de charbon beaucoup moins coûteuse.

Réduction des litharges. — La réduction au réverbère s'emploie aussi parfois pour revivifier les litharges, c'est-à-dire en extraire le plomb métallique. Ces produits sont de l'oxyde pur, fusible et très facile à réduire. On les étale sur une sole en pente, en mélange avec un peu de charbon, le plomb coule et va se réunir dans un bassin situé à l'extrémité de la sole.

Fusion des minerais de cuivre natifs. — Le four à réverbère sert encore à la fusion des minerais qui contiennent les métaux à l'état natif. Ce cas se présente pour le cuivre, au lac Supérieur. Ce district, qui a été longtemps le plus producteur de l'Amérique, donne un métal renommé pour sa pureté. On y exploite des couches qui contiennent le cuivre sous forme de manches disséminées dans une roche silicatée relativement fusible. Au début, on y trouvait même parfois de gros blocs de métal. Aujourd'hui, où l'on a poursuivi l'exploitation à de grandes profondeurs, le minerai est beaucoup plus pauvre, on en exploite qui contient moins de 2 pour 100 à l'état brut. On le soumet à une préparation mécanique très complète, on le broie sous d'immenses pilons à vapeur, et on le lave dans des cribles où les grains de cuivre se précipitent en couches au fond de l'eau, de manière à l'enrichir jusqu'à plus de 60 pour 100.

Il suffit alors de le fondre dans de grands fours à réverbère pour rassembler tout le cuivre fondu. Ces fours ont leur sole creusée en forme de bassin, qui se remplit de métal liquide; à travers la paroi, un trou de coulée, ménagé à la hauteur du fond du bassin, permet de soutirer le métal.

Fusion du platine. — Le platine se rencontre exclusivement

à l'état natif, sous forme de grains, au milieu de sables d'alluvions qu'on exploite dans l'Oural. Le lavage permet facilement d'isoler ces grains, qui sont très lourds et qui ne restent plus mélangés que d'une faible quantité de sables ferrugineux. Mais, pour fondre le platine, il faut une température supérieure à celle de tous les fours ordinaires. On emploie le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène. Le four, de très petites dimensions, est formé par une cavité taillée dans des blocs de chaux; des orifices permettent d'introduire à travers le couvercle un ou plusieurs chalumeaux.

RÉDUCTION AU CREUSET

La réduction peut encore se faire au creuset. Le mélange d'oxyde, de fondants et de charbon, plus ou moins pulvérisé, est chargé dans des creusets en terre réfractaire, qu'on couvre d'un couvercle et qu'on chauffe dans un four quelconque. Quand tout est bien fondu et que les matières ont eu bien le temps de réagir, on coule le contenu dans une lingotière. La scorie se fige au-dessus du métal, dont on la sépare sans peine en la brisant et la détachant au marteau.

C'est ainsi qu'on procède dans les laboratoires pour l'essai par voie sèche des minerais, quand on veut se rendre compte de leur teneur. Mais, dans l'industrie, ce mode de fusion est trop coûteux. On ne l'emploie que dans des cas exceptionnels, par exemple pour les matières riches en or ou argent, parce que la valeur du métal peut supporter des frais relativement considérables et qu'il importe surtout d'éviter les pertes, ou encore pour les métaux volatils, comme l'antimoine.

Réduction de l'antimoine. — L'oxyde d'antimoine se rencontre dans certains gisements à l'état de cristaux jaunâtres, ayant la forme d'un octaèdre, c'est-à-dire d'une double pyramide à base carrée; quand on le prépare par des procédés chimiques, c'est à l'état de poudre blanche ou jaune. Il se réduit facilement, mais le

métal émet des vapeurs abondantes au rouge vif, et ces vapeurs se réoxydent à l'air. Pour éviter des pertes, il faut fondre en vase clos sous une couche de scories qui empêche la volatilisation. On le mélange avec un peu de charbon en poudre et on le charge dans des creusets avec 10 pour 100 de fondants alcalins (carbonate de soude et chlorure de sodium (1) pour former une scorie fusible avec les matières stériles. Le creuset avec son couvercle est placé dans un four à banquettes où on le chauffe pendant deux ou trois heures au rouge. On peut alors le retirer et couler le métal.

Pour les métaux franchement volatils, comme le zinc, la réduction s'accompagne d'une distillation complète. Nous en parlerons plus loin.

Réduction du nickel. — La réduction en vase clos peut encore avoir sa raison d'être pour les métaux qui, comme le fer et le nickel, ont une tendance à se combiner au carbone. Ces métaux sont par eux-mêmes peu fusibles, mais ils peuvent former avec le carbone des composés beaucoup plus faciles à fondre. Cette combinaison se produit toujours quand on réduit l'oxyde au four à cuve à haute température, avec fusion complète; on n'obtient donc pas le métal, mais une *fonte* qui a des propriétés toutes différentes. Si au contraire on réduit l'oxyde à température modérée, en présence d'une quantité limitée de charbon, le produit reste solide, la combinaison avec le carbone ne se produit pas, et l'on obtient le métal pur, sous forme de masse spongieuse.

Ces conditions ne peuvent guère se réaliser qu'en vase clos. Le traitement est alors trop coûteux pour le fer, mais on l'applique aux oxydes de nickel, parce que ce métal a une grande valeur et qu'il y a intérêt à le préparer tout à fait pur.

L'oxyde, qu'on obtient sous forme de poudre verdâtre par des épurations préalables dont nous reparlerons plus loin, est

(1) La proportion de carbonate de soude devra être d'autant plus forte qu'il y aura plus de silice dans la gangue.

mélangé, aggloméré en gâteaux avec de la farine et du charbon de bois. On chauffe ces gâteaux au rouge cerise, dans des creusets ou dans des mouffles. Après dix heures au moins de calcination, on décharge les cornues et l'on en retire des disques de métal poreux qui ont conservé la forme du gâteau d'oxyde.

CHAPITRE III

TRAITEMENT DES MINERAIS SULFURES

Principes généraux. — Extraction du plomb. — Grillage de la blende. — Traitement des pyrites cuivreuses.

Un grand nombre de métaux se présentent dans les filons sous forme de sulfures. Tel est notamment le cas du plomb, du cuivre et du zinc; la galène (sulfure de plomb), la blende (sulfure de zinc), la pyrite cuivreuse (sulfure double de fer et de cuivre) se rencontrent souvent soit isolées, soit mélangées ensemble dans les filons métalliques; les oxydes de ces métaux ne se trouvent en général qu'à la partie supérieure des gîtes, où ils paraissent provenir de l'altération des sulfures. La plupart des sulfures, en effet, peuvent s'oxyder sous l'influence de l'air, surtout de l'air humide, et cette transformation lente a pu modifier la nature du minerai sur toute la hauteur où les eaux de surface pouvaient s'infiltrer, mais en profondeur on retrouve les sulfures intacts.

PROCÉDÉS GÉNÉRAUX DE TRAITEMENT DES SULFURES

Fonte pour mattes. — Si l'on chauffe des sulfures au milieu du charbon et à l'abri de l'action de l'air, comme c'est le cas

dans un four à cuve, ces minéraux, qui sont tous facilement fusibles, se liquéfient sans se décomposer et se séparent des roches stériles. Celles-ci peuvent se fondre si la température est suffisante, et l'on obtient alors deux produits qui se séparent par ordre de densité : une *matte*, c'est-à-dire un sulfure métallique, et une scorie dans laquelle passent les gangues, et parfois les métaux qui ont le plus de tendance à former des silicates, comme le fer. L'opération ainsi conduite a donc pour effet de concentrer certains métaux dans des mattes sulfurées plus ou moins riches.

On lui donne le nom de *fonte crue* lorsqu'on y passe les sulfures sans aucune autre préparation préalable. Elle est employée dans la pratique surtout pour le traitement des pyrites cuivreuses mélangées à de fortes proportions de gangues terreuses : elle a alors pour effet de séparer immédiatement toutes ces gangues et de concentrer le cuivre dans une matte beaucoup plus riche que le minerai et où le cuivre est combiné seulement avec du soufre et du fer.

Grillage. — Si les sulfures sont chauffés au contact de l'air, ils tendent à s'oxyder : le soufre se sépare sous forme de gaz acide sulfureux qui s'échappe dans l'atmosphère. Le métal reste à l'état d'oxyde de sulfate, c'est ce que l'on appelle le *grillage*. Si l'oxydation est poussée jusqu'au bout, le soufre s'élimine complètement et l'on obtient des produits d'où l'on peut extraire les métaux par réduction, suivant les procédés que nous avons déjà étudiés. Si le grillage est partiel, il reste du soufre non attaqué et l'on obtient un minerai qui est alors un mélange d'oxyde et de sulfures.

Concentration des mattes. — Si l'on fond un tel mélange aux fours à cuve, on obtiendra une matte et une scorie ; la matte sera en quantité plus faible que si l'on avait fondu directement le minerai primitif, puisque l'on a diminué la proportion de soufre par le grillage préalable ; la scorie contiendra une partie des métaux, la réduction des oxydes pourra même donner un troisième produit ;

c'est-à-dire une certaine proportion de métal libre. Lorsqu'on fond ainsi des minerais après un grillage partiel, l'opération prend le nom de *fonte de concentration*. Elle a pour but, en effet, de concentrer certains métaux dans une matte plus riche.

Si le minerai est complexe, la fonte pour mattes peut devenir un procédé de séparation des différents métaux. En effet, le fer a une tendance prédominante à passer dans la scorie. Il n'en reste dans la matte qu'une fraction d'autant plus faible que le lit de fusion contient moins de soufre; le cuivre, au contraire, passe en entier dans la matte; enfin, le plomb a beaucoup plus de tendances à se réduire à l'état métallique, et il n'en reste qu'une partie dans la matte. Quant au zinc, il se partage entre la matte et la scorie; mais sa présence est une source de gêne et d'inconvénients graves, parce qu'il rend ces matières moins fusibles et il est impossible de l'en extraire pratiquement. Dans ce genre de traitement, le zinc n'est pas utilisé et les sulfures complexes qui en contiennent doivent être toujours soumis à une préparation mécanique, de façon à ne livrer aux usines métallurgiques que des minerais contenant relativement peu de zinc.

Les fontes de concentration peuvent se répéter plusieurs fois; en effet, les mattes où le cuivre s'est concentré avec des proportions relativement plus faibles des autres métaux, peuvent être soumises à un nouveau grillage partiel, et le produit repasser à une seconde fonte de concentration. Par une série d'opérations de ce genre, on arrivera à faire passer peu à peu tout le fer dans les scories et à obtenir des mattes très riches en cuivre; tandis que le plomb, s'il y en a, se séparera progressivement à l'état métallique. Chaque fusion donnera un peu de plomb et des mattes plus riches en cuivre que les précédentes, de sorte qu'à la fin on aura extrait presque tout le plomb, et les dernières mattes seront des sulfures de cuivre presque purs.

On réalisera de cette manière la séparation des trois métaux et le cuivre comme le plomb se trouveront sous une forme utilisable. On est obligé de multiplier les opérations, parce que les réac-

tions ne sont jamais d'une netteté absolue; si l'on voulait, par exemple, obtenir du premier coup une matte très riche en cuivre, il faudrait laisser très peu de soufre et alors une partie du cuivre s'oxyderait et passerait dans la scorie. En graduant les séparations, on évite cet inconvénient. La première fonte a pour but d'éliminer la plus grande partie des matières stériles dans des scories pauvres où il ne passe pas de cuivre et qui peuvent être rejetées. Les opérations suivantes donnent des scories plus riches, mais en quantité beaucoup plus faible. Elles sont considérées comme des produits intermédiaires, et on les repasse avec de nouveaux minerais à la première fonte; le cuivre qu'elles entraînent n'est donc pas perdu.

Traitement final des sulfures purs. — Lorsqu'on a des sulfures purs ne contenant à peu près qu'un seul métal, soit que le minerai extrait réalise cette condition, soit qu'on l'ait enrichi par des fontes de concentration, l'extraction du métal peut se faire de deux manières. On peut griller le sulfure à mort, de manière à le transformer complètement en oxyde, et réduire cet oxyde par le charbon: c'est ce que l'on appelle le traitement par *grillage et réduction*. Mais le plomb et le cuivre peuvent être extraits de leurs sulfures par une seule opération plus simple, par un grillage convenablement conduit.

Si l'on grille les sulfures de façon à oxyder la moitié du soufre, et si l'on chauffe le mélange intime de l'oxyde et du sulfure restant, ces deux composés réagissent l'un sur l'autre; le soufre se transforme en acide sulfureux, en empruntant son oxygène, non plus à l'air, mais à l'oxyde métallique qui se trouve dans le mélange, et le métal fondu est mis en liberté. Théoriquement, si l'on chauffe ainsi ensemble un équivalent de sulfure de plomb et deux équivalents d'oxyde, tout le soufre doit se dégager et tout le métal doit rester libre: $PbS + 2PbO = 3Pb + SO_2$. En pratique la réaction n'est jamais parfaite, et l'on obtient avec le métal des crasses qui en retiennent une partie et qui doivent être retraitées.

La proportion de ces résidus est d'autant plus grande que le sulfure contient plus de matières étrangères, de sorte que ce procédé ne s'applique bien qu'à des sulfures purs et riches. Cette opération est connue sous le nom de *rôtissage*.

Formules applicables aux divers minerais. — D'après ce que nous venons de voir, les formules de traitement des minerais sulfurés pourront être très complexes et très variables. On peut distinguer trois cas principaux :

1° Le traitement *par grillage et réduction*, où l'on transforme tout d'abord le sulfure en oxyde par un grillage complet, pour réduire cet oxyde par le charbon. Ce mode de traitement peut être appliqué à tous les minerais sulfurés simples, c'est-à-dire à ceux qui ne contiennent qu'un seul métal en proportion considérable.

Dans la pratique, on traite de cette manière les minerais de plomb, lorsqu'ils ne contiennent pas sensiblement de cuivre, et les blendes en vue de l'extraction du zinc; la présence des gangues et même de l'oxyde de fer n'est pas ici une difficulté, parce que, par la réduction du four à cuve, on peut épuiser suffisamment les scories, et que le fer se réduit moins facilement que le plomb.

2° Les sulfures simples et riches peuvent se traiter directement par *rôtissage*; c'est ce que l'on fait par exemple pour les minerais de plomb, lorsqu'on a des galènes contenant plus de 60 pour 100 de métal; des galènes pauvres ne pourraient pas être traitées de cette manière, parce que tout le plomb resterait dans les scories.

3° Les sulfures complexes sont traités en plusieurs opérations par des fontes de concentration, destinées à donner des mattes riches. Tel est le cas pour la pyrite cuivreuse. On ne pourrait pas les traiter d'un seul coup par grillage et réduction, on n'arriverait pas à réduire l'oxyde de cuivre sans faire passer dans le métal beaucoup de fer. Par les fontes de condensation, on fait passer tout le cuivre dans les mattes riches qui peuvent alors se traiter

par rôtissage ou par un procédé spécial dont nous parlerons plus loin.

Le cas le plus complexe se présente pour les minerais de plomb qui contiennent une certaine proportion de cuivre. On cherche alors à extraire ces deux métaux, et pour cela on procède à une série de fontes de concentration alternant avec des grillages partiels, de manière à obtenir à chaque opération du plomb métallique et des mattes de plus en plus riches en cuivre.

TRAITEMENT DE LA GALÈNE

Les minerais de plomb ordinaires contiennent de la galène mélangée de quartz, d'argile, souvent de pyrite de fer et d'un peu de blende. On les grille de manière à oxyder autant que possible tous les sulfures.

Grillage. — Cette opération se fait dans des fours à réverbère très allongés ayant un grand nombre de portes de travail; on charge le minerai à l'extrémité qui est presque froide, et l'on avance peu à peu en le retournant avec des râbles jusqu'au foyer. Le four contient à chaque moment plusieurs charges qui se remplacent les unes les autres; en se rapprochant du foyer, elles s'échauffent progressivement et s'oxydent sous l'action de l'air qui arrive par les portes.

Il faut éviter de fondre le minerai, qui à partir de ce moment n'offrirait plus assez de surface à l'air. On le travaille donc très lentement et il peut séjourner vingt-quatre ou trente-six heures dans le four. A la fin de l'opération, on donne souvent un coup de feu pour décomposer les sulfates et agglomérer le minerai pulvérulent.

Fusion. — Le produit du grillage est fondu dans des fours à cuve, on y ajoute des oxydes de fer, par exemple des scories de forge, afin de former avec la silice des scories fusibles. Nous avons

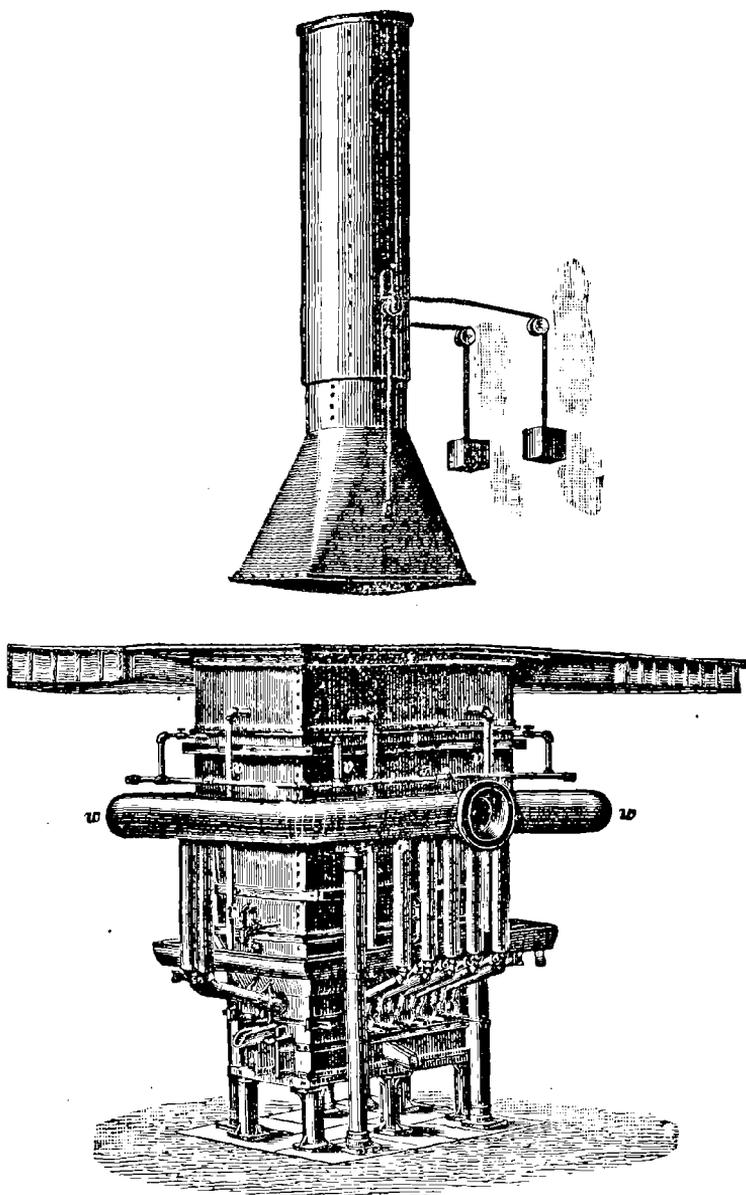


FIG. 24. — Four rectangulaire pour plomb.
v, tuyaux d'eau pour le retroissement de l'enveloppe; *w*, conduite de vent soufflé

déjà parlé de cette opération dans le chapitre précédent. Lorsque le grillage n'a pas été complet, il peut se former en même temps que le plomb d'œuvre une certaine quantité de matte; cela n'a pas d'inconvénients graves lorsque ce minerai contient un peu de cuivre, parce que cela permet de séparer ce métal; souvent pour les minerais pauvres et complexes, on supprime le grillage et l'on

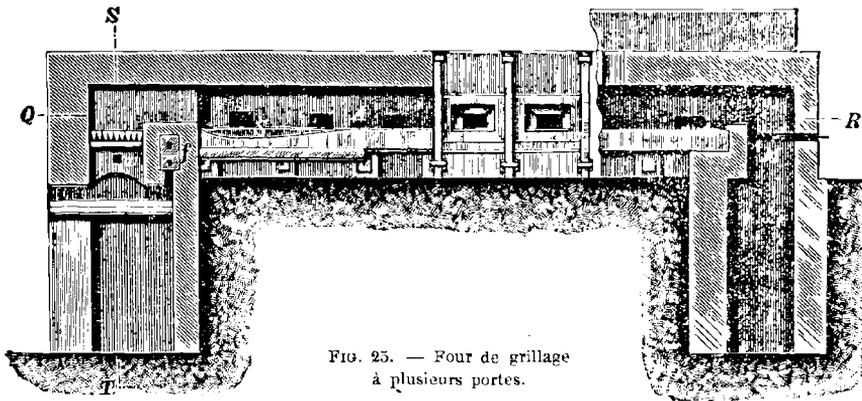


FIG. 25. — Four de grillage à plusieurs portes.

On n'a représenté qu'une partie de la longueur du four. Le minerai se charge à droite et est avancé par retournements successifs jusqu'au foyer de gauche : près du foyer se trouve un bassin *s* où se rassemble le minerai à demi fondu.

passé directement au four à cuve, en y ajoutant alors de grandes quantités d'oxyde de fer.

Ce corps, à l'état de Fc^2O^3 , contient un excès d'oxygène et agit comme comburant sur le soufre, qui se dégage à l'état d'acide sulfureux, tandis que le fer se réduit à l'état de protoxyde ou de métal : $5 + 2 \text{Fc}^2\text{O}^3 = \text{So}^3 + 2 \text{FeO}$. En outre, le fer métallique a plus d'affinité que le plomb pour le soufre et il prend sa place dans les mattes. Sa présence permet d'obtenir plus de plomb métallique et d'en laisser beaucoup moins dans les mattes; autrefois, on ajoutait même des rognures de fer ou de la fonte.

Rôtissage. — Quand la galène est riche, mélangée à très peu de matières étrangères, on la traite directement par rôtissage ; on étale toute la charge de minerai sur la sole d'un grand four à

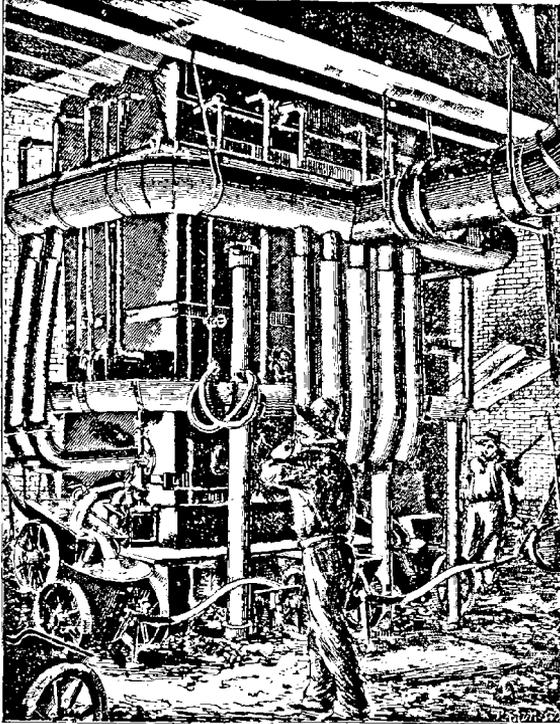


Fig. 26. — Cette figure représente le travail au four rectangulaire : on voit, à gauche, la coulée des scories dans des pots à déversoirs, où la scorie légère se sépare du métal entraîné qui reste au fond.

réverbère, muni de deux ou trois portes de travail de chaque côté, puis on le grille lentement. Quand il contient une certaine quantité d'oxyde, on pousse le feu de manière à élever la température et l'on brasse énergiquement. Les sulfures et les oxydes réa-

gissent les uns sur les autres, et le plomb mis en liberté coule dans un bassin sur le côté de la sole. Comme la réaction n'est pas complète, on recommence plusieurs fois cette alternative de grillage et de coup de feu, et à la fin on ajoute un peu de charbon, pour réduire les scories oxydées qui retiennent toujours du plomb.

Ce mode de travail donne du plomb plus pur qu'au four à cuve, parce que les autres métaux ne se réduisent pas ; mais il n'est applicable, comme nous l'avons vu, qu'aux galènes très riches. S'il y avait beaucoup de silice mélangée aux minerais, presque tout le plomb resterait dans les scories. Ce sont surtout les minerais pauvres en argent que l'on traite de cette manière ; en effet, ces minerais ont relativement peu de valeur, il faut les travailler par le procédé le plus économique, et avant de les fondre on les soumet à une préparation mécanique poussée très loin, de manière à en isoler de la galène à peu près pure.

Quand, au contraire, le minerai est très argentifère, il a plus de valeur et la préparation mécanique donnerait des pertes en argent sensibles ; on préfère alors pousser cette préparation beaucoup moins loin, et elle donne des produits beaucoup moins enrichis, qu'il faut traiter au four à cuve.

TRAITEMENT DES BLENDES

Grillage. — Les blendes ou sulfures de zinc doivent être grillés complètement pour les transformer en oxyde que l'on réduit par des procédés que nous verrons plus tard. Ce grillage est plus difficile que celui de la galène, il doit se terminer à une température très élevée ; on emploie des fours du même genre. Souvent, pour prolonger le trajet du minerai dans le four, il y a plusieurs soles superposées, et les charges descendent successivement de la sole supérieure à la plus basse, au bout de laquelle se trouve le foyer.

Grillage avec utilisation des gaz. — Depuis un certain temps on a cherché à utiliser les gaz sulfureux produits par le grillage de la blende pour fabriquer de l'acide sulfurique. Pour pouvoir employer ces gaz dans les chambres de plomb il faut qu'ils soient assez riches en acide sulfureux et qu'ils ne soient pas mélangés à la masse considérable de gaz qui vient du foyer. Il faut donc isoler le four du trajet des flammes et le transformer en une sorte de cornue.

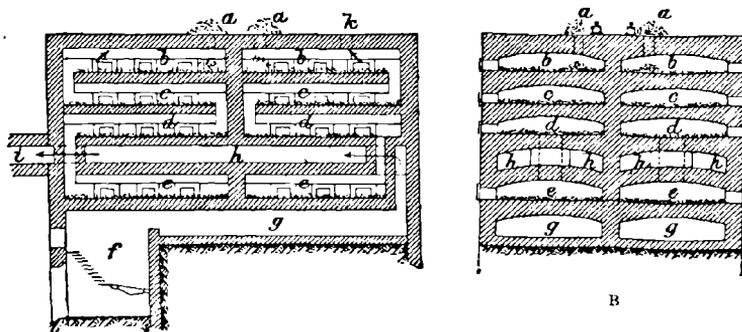


FIG. 27. — Four de grillage à soles superposées et à mouffles pour blende.

Les flammes circulent par les compartiments *g* et *h*, de manière à chauffer les mouffles inférieurs. Les minerais chargés en *a* descendent successivement sur les tablettes *b*, *c*, *d*, *e*. L'air circule en sens inverse et se sature d'acide sulfureux.

On peut faire le grillage dans des fours à moufle où les flammes, au lieu de passer sur la sole, circulent successivement au-dessous de la sole, puis au-dessus de la voûte.

Pour allonger le trajet et économiser le combustible, on a superposé plusieurs fours de ce genre en donnant à chaque moufle une très faible hauteur. Le four Rhenania, employé maintenant en Belgique et en Westphalie, donne de très bons résultats. Il se compose de huit compartiments plats et isolés les uns des autres par huit voûtes superposées. Ces compartiments communiquent deux par deux à leurs extrémités; dans les uns on étale le minerai, qui descend en zigzag en traversant quatre comparti-

ments du haut en bas ; dans les autres, qui alternent avec les premiers, circulent les flammes qui les parcourent de bas en haut avant de gagner la cheminée. Le four comprend donc quatre mouffles chauffées dont les gaz sont mélangés avec la fumée et se rendent dans les chambres de plomb. En utilisant ainsi les gaz, cette opération jadis coûteuse devient une source de bénéfices. Aussi les blendes, qui étaient jadis considérées comme des minerais de zinc inférieurs parce que leur traitement était plus onéreux et donnait du métal moins pur que celui des minerais oxydés, ont aujourd'hui à peu près autant de valeur que les meilleures calamines.

TRAITEMENT DES PYRITES CUIVREUSES

Les minerais de cuivre sont le plus souvent des pyrites cuivreuses contenant à l'état de sulfure une proportion de cuivre relativement faible par rapport à celle du fer. Il est rare que la teneur en cuivre dépasse 10 pour 100, et l'on traite des pyrites qui n'en contiennent parfois que 4 à 5 pour 100. Ces deux métaux, comme nous l'avons dit, ne peuvent être séparés que par une suite de fontes de concentration dans lesquelles on fait passer peu à peu le fer à l'état d'oxyde, tandis que le cuivre reste combiné avec le soufre, dont la proportion va en diminuant. Le traitement comprend donc en général plus d'opérations que ceux que nous avons vus jusqu'ici ; et l'on peut y distinguer deux phases : 1° la concentration, destinée à donner des mattes riches ; 2° l'extraction, consistant à retirer de ces mattes le cuivre à l'état métallique.

Lorsque les pyrites sont mélangées de beaucoup de gangues terreuses, on les fond directement au four à cuve de manière à éliminer toutes ces gangues sous forme de scories et à concentrer les métaux dans une matte.

Si, au contraire, ce qui est le cas le plus général, la pyrite de fer domine dans le minerai, c'est-à-dire si celui-ci est riche

en soufre, la fonte crue donnerait une matte trop pauvre; il faut commencer par un grillage pour diminuer la proportion de soufre.

Grillage. — Ce grillage peut se faire au réverbère et c'est ainsi qu'on le fait souvent en Angleterre; mais, comme il ne doit être que partiel et que la pyrite de fer en s'oxydant dégage assez de chaleur pour s'oxyder presque spontanément, on emploie en général d'autres procédés plus économiques dans lesquels le mine-

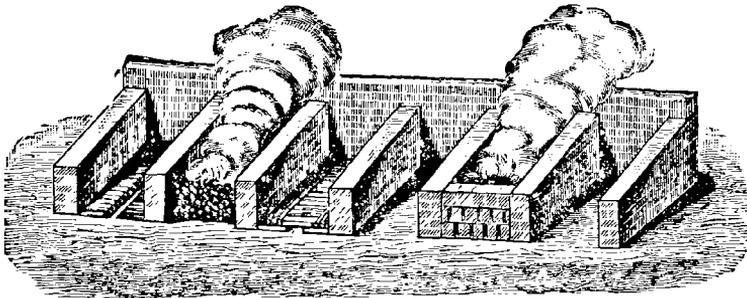


FIG. 28. — Stalles en maçonnerie.

rai est entassé en masse assez volumineuse de manière à mieux utiliser la chaleur que dégagent les réactions produites au sein de cette masse.

Autrefois on grillait le minerai en tas à peu près comme on fait la carbonisation du bois dans les forêts; le minerai est entassé de manière à former une masse perméable à l'air. On y ménage quelques cheminées et à la base se trouve un lit de bûches et de fagots servant à l'allumage. Une fois le tas allumé, il continue à s'échauffer par la combustion du soufre et brûle pendant plusieurs mois. Ce système exige de vastes emplacements; les fumées sont très nuisibles à la végétation.

Pour activer le grillage et localiser les dégagements de gaz sulfureux, on se sert de cases ou de stalles; on entasse le mine-

rai dans une série de compartiments voûtés où arrive de l'air par des orifices pratiqués à la base des murs. La chaleur se trouve alors concentrée dans les tas ; le grillage marche beaucoup plus vite et les gaz peuvent être recueillis dans des carneaux communiquant avec une cheminée.

On peut activer encore l'opération en employant des cases dont le fond est formé par une grille ; l'arrivée de l'air est alors plus abondante et plus régulière. Néanmoins, il faut éviter une oxydation par trop rapide, qui déterminerait la fusion de la pyrite et l'agglomération de la charge.

Fonte pour mattes. — Après ce premier grillage, les minerais passent à la fonte de concentration, qui se fait le plus souvent aux fours à cuve. On emploie des fours de formes très variées ; aujourd'hui les fours les plus usités sont circulaires, ils peuvent être construits à peu près comme les fours de réduction du plomb, mais ils sont souvent plus élevés.

On emploie aussi des fours spéciaux appelés *water-jackets* ; la cuve est formée par une double enveloppe en tôle dans laquelle on fait circuler un courant d'eau continu, de manière à l'empêcher de s'attaquer par la chaleur. A mesure que les scories et les mattes se fondent à la base du four, elles coulent dans un creuset extérieur, où elles restent longtemps liquides et se séparent par suite de leurs différences de densité.

En Amérique, on emploie souvent de grands fours à section rectangulaire, où le bas seulement est à *water-jacket* et la cuve construite en maçonnerie ; leur production est plus considérable. Lorsque le minerai est facilement fusible, c'est-à-dire riche en pyrite, on peut passer dans ces grands fours jusqu'à 90 tonnes de minerai par jour ; un *water-jacket* ordinaire en passe de 35 à 50. Les anciens fours, qui étaient de section beaucoup plus restreinte et avaient une marche beaucoup moins régulière, n'en passaient guère que de 10 à 20.

- En Angleterre, où le combustible est à bon marché et où l'on

traite des minerais relativement riches, on faisait autrefois toutes les fusions aux fours à réverbère ; la consommation de charbon est alors beaucoup plus grande, mais on a l'avantage d'obtenir des mattes plus riches. Aux fours à cuve, l'oxyde de fer est partiellement réduit, et il passe une plus grande quantité de fer dans les mattes.

Le four à réverbère pour mattes a sa sole creusée en forme de bassin intérieur ; on y charge le minerai, en ajoutant parfois du spath-fluor pour rendre la scorie plus liquide, et du quartz pour scorifier le fer, si le minerai ne contient pas par lui-même assez de silice. On brasse les matières par les portes de travail, quand elles sont bien fondues, pour activer les réactions ; la matte se rassemble au fond du bassin, d'où l'on peut la soutirer par un trou de coulée.

Dans le Colorado, où l'on traite des pyrites souvent aurifères,

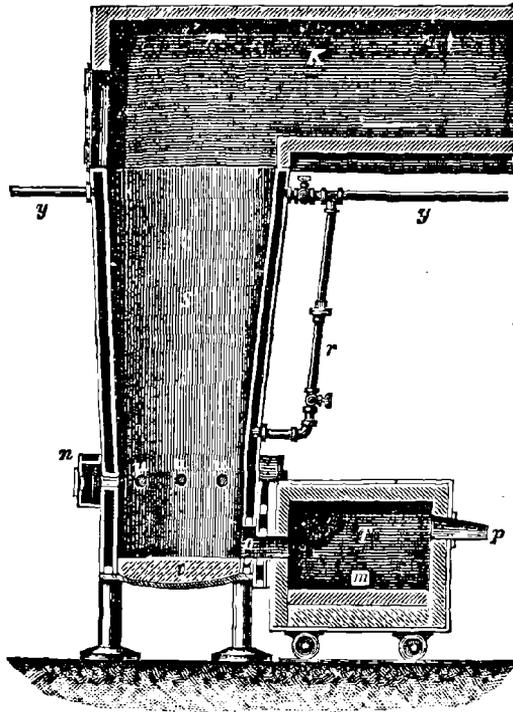


FIG. 29. — Water-jacket pour cuivre.

L'enveloppe est entièrement creusée et refroidie par un courant d'eau. Les charges s'introduisent par l'orifice supérieur de gauche ; les gaz s'échappent par le canal K. L'air soufflé arrive par les tuyères n. — Aussitôt fondues, les scories et le métal passent dans l'avant-creuset T où elles se reposent et se séparent par ordre de densité. Les scories se déversent en p ; on soutire le métal en m.

contenant de 6 à 8 pour 100 de cuivre, on emploie aussi le four à réverbère; mais on en a augmenté beaucoup les dimensions, et on le conduit à une allure très rapide en évitant qu'il ne se refroidisse au moment du chargement et du déchargement. Le minerai est introduit par des trémies placées dans la voûte, où il s'échauffe en attendant d'être versé dans le four; la matte

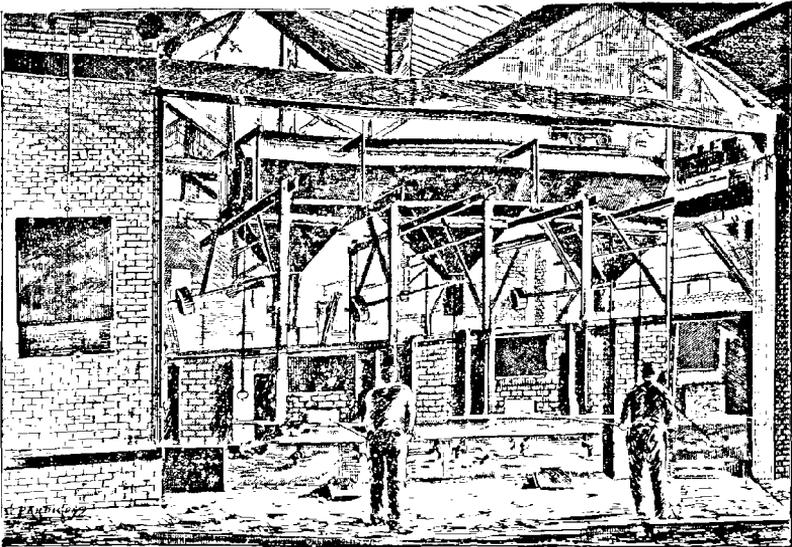


FIG. 30. — Four de fusion pour mattes de cuivre.

est soutirée par un trou de coulée placé à une certaine hauteur au-dessus du fond du bassin, de manière à laisser toujours sur la sole une certaine épaisseur de matte liquide provenant de l'opération précédente.

Tandis que les anciens fours anglais ne traitaient que 5 à 6 tonnes par jour et ne recevaient que des charges de 1 tonne, les fours américains, dont les dimensions sont doubles ou quadruples, peuvent traiter jusqu'à 60 tonnes par jour; dans ces

conditions, la consommation de combustible n'est pas beaucoup plus grande qu'aux fours à cuve.

Concentration des mattes. — La matte obtenue à la première fonte de concentration s'appelle *matte brute* ou *matte première*; elle peut contenir, suivant les cas, de 20 à 35 pour 100 de cuivre. Si le minerai est très riche, on obtient parfois du premier coup des mattes de 50 à 60 pour 100 qui peuvent être traitées directement de manière à en extraire le cuivre. Mais les mattes ordinaires ont besoin de subir une seconde fonte de concentration précédée d'un grillage partiel pour diminuer la teneur en soufre.

Ces deux opérations se font absolument comme sur les minerais; seulement, comme on traite des matières plus riches et en quantité beaucoup plus faible, on emploie plus souvent les fours à réverbère. Ils donnent des mattes très riches et des scories dans lesquelles il reste une proportion sensible de cuivre.

Ces scories sont considérées comme des minerais et rechargées plus tard avec ceux-ci dans les fours servant aux premières fontes de concentration.

Lorsqu'on traite des minerais purs, on cherche à obtenir le plus vite possible une matte riche et à diminuer le nombre des opérations; il y a ordinairement, au plus, quatre opérations, et quelquefois deux, avant d'arriver à la dernière matte. On ne fait pas plus de deux fontes de concentration. Si, au contraire, on traite des minerais impurs, on les grille chaque fois très peu, de manière à ne diminuer que lentement la proportion de soufre, et l'on multiplie les opérations, parce qu'à chacune d'elles il s'élimine par volatilisation de l'arsenic et de l'antimoine, et plus le traitement est long, plus le produit est pur. Dans quelques usines allemandes, on fait parfois trois ou quatre fontes de concentration, alternant avec autant de grillages, avant d'arriver à la dernière matte.

Aux dernières fontes, lorsqu'on traite des mattes déjà riches, il se produit un phénomène intéressant: outre la matte et la

scorie, il commence à se séparer un peu de cuivre métallique qui se rassemble au fond des bassins. Les *fonds cuivreux* ainsi obtenus sont très impurs et concentrent certains métaux étrangers, notamment l'étain. On provoque quelquefois leur formation afin de faire passer les impuretés dans une petite quantité de cuivre sacrifié. Les mattes obtenues en même temps seront plus pures, et le cuivre extrait des dernières scories, si l'on réduit celles-ci à part, sera encore d'une qualité supérieure. C'est de cette manière que l'on fabrique en Angleterre le cuivre dit *best selected*, en multipliant les opérations intermédiaires, de manière à obtenir aux dernières une certaine quantité de fonds cuivreux.

Rôtissage des mattes riches. — Lorsqu'on a obtenu une matte riche et assez pure, composée presque exclusivement de sulfure de cuivre et contenant plus de 60 pour 100 de ce métal, on arrive à la seconde phase du traitement, où il s'agit de transformer cette matte en cuivre métallique; cela se fait par *rôtissage*. La matte, coulée en saumon ou en plaque, est chargée sur la sole d'un four à réverbère qui est disposé pour obtenir une assez forte température et ne possède qu'une seule porte de travail. On commence par la faire chauffer lentement de manière qu'elle fonde goutte à goutte en s'oxydant au contact de l'air.

Lorsqu'on tout le bain est fondu, on pousse la température et l'on brasse énergiquement pour mélanger les scories oxydées avec les sulfures encore inattaqués. Il se produit alors une réaction vive entre ces deux composés; le bain entre en ébullition, l'acide sulfureux se dégage, le soufre et l'oxygène qui étaient combinés au cuivre se trouvent ainsi éliminés mutuellement et ce métal reste libre. On coule en saumon le produit de cette opération, que l'on appelle cuivre brut ou cuivre noir; il contient encore un peu de fer et de soufre et doit être affiné par des procédés dont nous parlerons plus loin.

Affinage pneumatique. — Aujourd'hui on emploie, surtout en

Amérique, un procédé de traitement des mattes beaucoup plus rapide, qui a été inventé en France par M. Manhès ; c'est ce que l'on peut appeler l'affinage pneumatique.

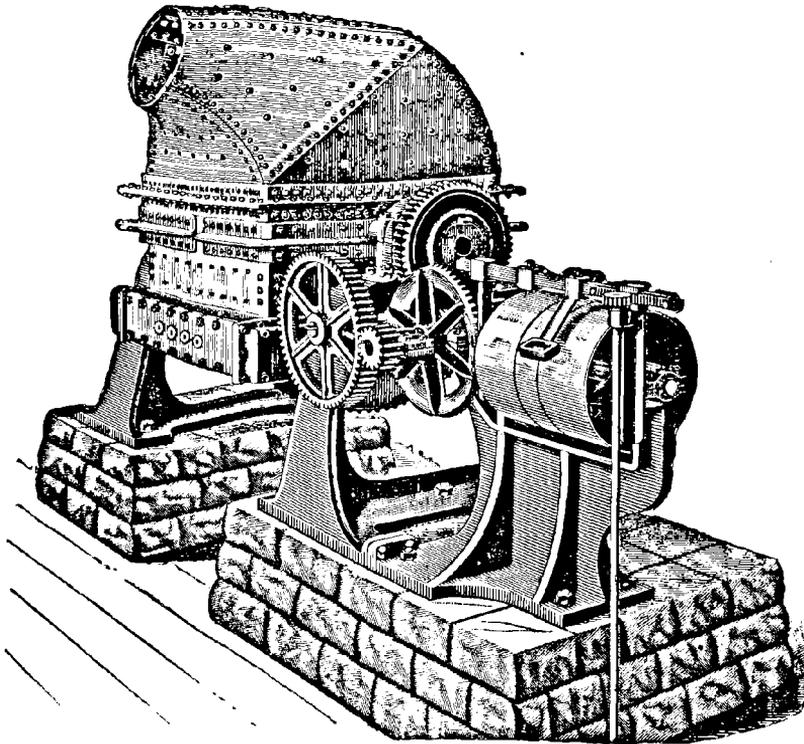


FIG. 31. — Convertisseur à soufflage latéral.

On voit à gauche la boîte où arrive le vent soufflé, avec une série de petits regards correspondant aux tuyères et servant à les déboucher, pendant l'opération, au moyen de tringles en métal qu'on y passe. — Devant se trouvent la poulie et les engrenages qui servent à faire tourner le convertisseur ; en l'inclinant plus ou moins, on peut faire varier la hauteur du bain au-dessus des tuyères et souffler à chaque instant à la profondeur convenable.

Les mattes fondues sont versées encore très chaudes dans une sorte de grande cornue ayant la forme d'un cylindre couché ; elle peut recevoir une charge de matière. Par une série de petites

tuyères ménagées sur le côté, on injecte de l'air sous pression qui traverse violemment toute la hauteur du bain ; cet air oxyde d'abord le fer, puis le soufre. Cette réaction dégage assez de chaleur pour que la masse, bien loin de se refroidir, s'échauffe spontanément et cela sans dépense d'aucun combustible étranger. Cette chaleur due aux réactions se trouve perdue dans les fours ordinaires, où l'oxydation est très lente et où les charges étalées sous une faible épaisseur présentent une grande surface au rayonnement. Mais dans une cornue où la charge occupe un grand volume pour une petite surface extérieure et où l'oxydation se produit très rapidement, non plus à la surface, mais au sein même et dans toutes les parties à la fois de la matte fondue, la perte de chaleur devient insignifiante par rapport à la quantité de chaleur produite. L'élimination du fer et du soufre ne dure guère plus d'une demi-heure, alors que dans les fours à réverbère une charge de cette importance exige plus de dix heures pour se traiter.

Pendant la première période de l'opération, le fer se brûle et se scorifie en se combinant à la silice du revêtement ou à celle qu'on introduit en jetant du sable par la bouche du convertisseur. On fait écouler les scories en inclinant l'appareil, puis on le redresse pour continuer l'opération. Le soufre se brûle à son tour en émettant des fumées acides.

Lorsqu'il est à peu près complètement éliminé, le cuivre commence à se brûler, les flammes qui s'échappent de la cornue se colorent en vert ; il faut alors laisser écouler le cuivre brut en renversant la cornue.

Ce système est très rapide, il n'exige guère d'autre dépense que la force motrice nécessaire pour comprimer l'air, et par suite de la netteté des réactions il peut s'appliquer même à des mattes relativement pauvres. Il permet de traiter presque tous les minerais de cuivre en deux opérations ou trois au plus. Si les minerais ne sont pas trop pauvres, on pourra, en effet, supprimer le premier grillage, traiter par fonte crue et verser immédiatement les

mattes dans le convertisseur. Avec les minerais pauvres et impurs, il peut y avoir avantage à conserver le premier grillage de manière à obtenir des mattes un peu plus riches.

Avec du minerai à 10 pour 100, les frais de fabrication com-

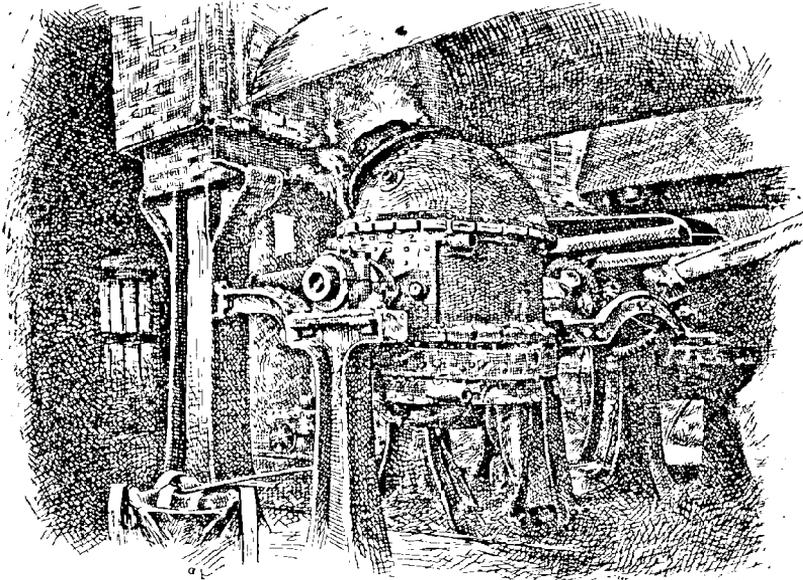


FIG. 32. — Convertisseur d'Anaconda.

Ce convertisseur, analogue à ceux qu'on emploie pour l'acier, se compose d'une corne cylindrique. Le vent arrive par une boîte annulaire située un peu au-dessus de la base. — La corne est représentée verticale dans la position qu'elle occupe pendant le soufflage.

plète d'une tonne de cuivre par ce procédé ne dépassent pas 450 francs. La consommation de houille et de coke est d'environ 5 tonnes. L'ancienne méthode anglaise exigeait dans les mêmes conditions 10 tonnes de houille et coûtait plus de 300 francs par tonne de cuivre.

MINERAIS PLOMBO-CUIVREUX

Le cas le plus complexe pour le traitement des minerais sulfurés se trouve réalisé au Harz et à Freiberg, où l'on traite des produits de filons multiples continus, toute espèce de sulfures métalliques. Les minerais sont alors soumis à un grillage et à une fonte de réduction et de concentration; on obtient du plomb métallique entraînant la plus grande partie de l'argent, et des mattes qui contiennent le reste du plomb, tout le cuivre, une partie du fer avec d'autres métaux encore. Ces mattes subissent une série de grillages alternant avec des fontes de concentration; chaque fonte donne encore un peu de plomb argentifère et des mattes de plus en plus riches en cuivre.

Il n'est pas possible de séparer tout le plomb de cette manière; les dernières mattes contiennent encore du plomb et de l'argent. On est obligé de les traiter par un procédé chimique: le plus souvent on les attaque, après les avoir grillées, par l'acide sulfurique, qui dissout le cuivre. Le plomb et l'argent restent à l'état de boues insolubles; le sulfate de cuivre peut être cristallisé et vendu, ou bien on peut précipiter le cuivre métallique avec du fer.

Notons encore que pendant le traitement de ces minerais complexes, on obtient parfois d'autres sous-produits; le nickel et le cobalt se concentrent dans des composés que l'on appelle speiss: ce sont des sulfo-arséniures qui contiennent ces deux métaux alliés à une grande proportion de fer. Ces speiss, un peu plus légers que les mattes, peuvent être coulés à part, et on les soumet aussi à une série de fontes de concentration qui donnent des speiss de plus en plus légers pendant que le fer se scorifie. Ces sous-produits ont été pendant longtemps la principale matière première servant à la fabrication du nickel et du cobalt, qui étaient alors des métaux rares et coûteux. Ils ont perdu leur importance industrielle depuis que ces métaux peuvent être extraits en grande quantité du Canada et de la Nouvelle-Calédonie.

EXTRACTION DU NICKEL

Le traitement du nickel ressemble, dans ses grandes lignes, à celui du cuivre. Certains filons (exploités surtout en Allemagne)

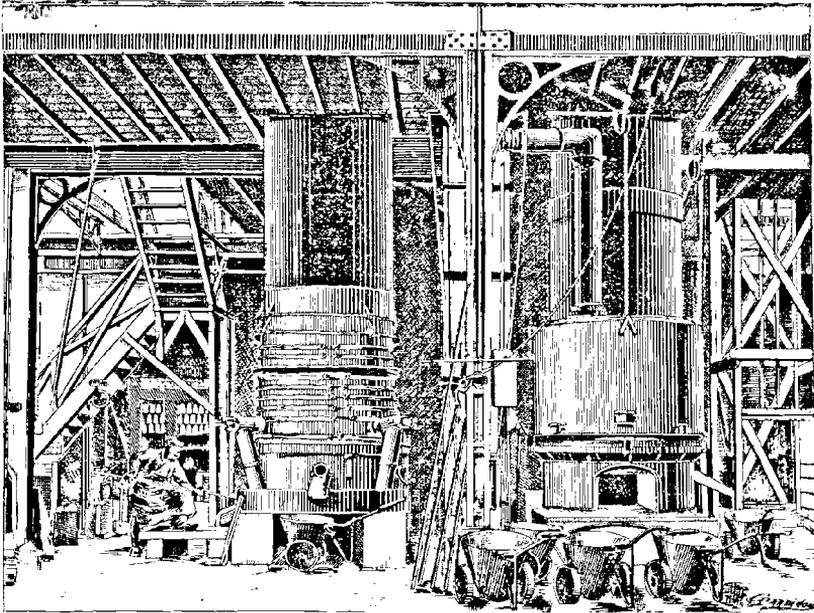


FIG. 33. — Cubilot servant à la fusion des minerais de nickel dans l'usine de MM. Cristofle à Saint-Denis.

donnent des sulfo-arséniures de nickel et de fer, que l'on traite par une série de grillages et de fontes de concentration. Le fer se scorifie et l'on obtient des mattes de plus en plus riches en nickel ; les dernières mattes, composées de sulfure de nickel à peu près pur, sont pulvérisées finement pour pouvoir les griller à mort : par deux grillages successifs au four à réverbère, on élimine les dernières traces de soufre et l'on obtient de l'oxyde de nickel pur.

Cet oxyde se réduit en vase clos, comme nous l'avons déjà indiqué, et donne du nickel spongieux, qu'on peut refondre au creuset, seul ou en alliage avec du cuivre (pour la préparation du maillechort).

Minerais de Nouvelle-Calédonie. — Ce traitement s'applique surtout aux mattes obtenues avec les minerais de la Nouvelle-Calédonie. Ces minerais, très abondants, contiennent le nickel à l'état de silicate, mélangé avec des serpentines (silicates de magnésie) et des argiles ferrugineuses. Ils ne contiennent pas de soufre, et on pourrait les traiter par réduction dans des hauts fourneaux, comme les minerais de fer; mais on obtient de cette manière une fonte complexe, composée de nickel, de fer et de carbone, et on n'a pas encore trouvé de moyen pratique d'affiner cette fonte pour en retirer le nickel pur. Jusqu'à présent on fond ces minerais avec des additions sulfureuses, de manière à obtenir des mattes, qu'on traite suivant la formule indiquée plus haut.

La multiplicité des opérations rend cette méthode coûteuse : l'extraction du nickel, dans ces conditions, peut revenir environ à 1 fr. 50 par kilogramme. On peut simplifier une partie des opérations en traitant les mattes au convertisseur suivant le procédé Manhès, mais on n'est pas arrivé, comme pour le cuivre, à éliminer en même temps le soufre : le traitement au convertisseur ne sert qu'à scorifier le fer et à donner le sulfure pur, qui subit comme d'ordinaire le grillage final et la réduction.

Minerais du Canada. — Au Canada, qui est avec la Nouvelle-Calédonie le seul pays grand producteur de nickel, on exploite des filons de pyrite complexe, contenant à la fois du nickel et du cuivre. On obtient très facilement une matte où se concentrent ces deux métaux : en la traitant comme les mattes de nickel ordinaire, on n'élimine pas le cuivre ; on a donc un alliage, qui peut s'employer tel quel à la préparation du maillechort. Pour en retirer le nickel pur, il faut le soumettre à un affinage électrique.

EXTRACTION DE L'ANTIMOINE

L'antimoine se rencontre sous forme de sulfure; c'est un composé fusible, d'un gris métallique, qui se présente en aiguilles ou en prismes dans des filons quartzeux. On le traite par une méthode spéciale (qui s'appliquait autrefois aussi aux minerais de plomb); on décompose directement le sulfure fondu par le fer.

Traitement direct par le fer. — On charge le sulfure avec du sel, des fondants alcalins (1) et des rognures de fer, dans des creusets chauffés dans un four à banquettes: chaque creuset reçoit environ 20 kilogrammes de sulfure; il peut être retiré ou mis en place par un orifice ménagé dans la voûte. Lorsque les matières sont bien fondues, on ouvre ces orifices et l'on brasse un instant le contenu; puis on recouvre les creusets, et au bout d'un certain temps on les retire pour couler le métal. Celui-ci est impur et il faut le refondre une ou deux fois avec des fondants convenables et des réactifs oxydants, comme l'azotate de potasse, pour l'affiner, en oxydant le soufre et le fer.

Chaque fusion dure trois heures; le traitement est coûteux: un four contenant quarante-deux creusets, occupe quarante ouvriers et brûle 3 tonnes de charbon par jour, pour donner 2 tonnes de métal (avec du minerai riche). Les dépenses, y compris les fondants et l'usure des creusets, dépassent 200 francs par tonne de minerai. Les pertes par volatilisation sont considérables, et l'on ne peut traiter que des minerais triés assez riches.

Traitement par grillage et réduction. — Il vaut peut-être mieux griller les sulfures dans de petits fours à réverbère, puis réduire l'oxyde en le chauffant avec du charbon de bois en poudre

(1) Ces fondants sont destinés à scorifier le quartz et les matières stériles pour donner une scorie fusible à température modérée.

dans des creusets ; la réduction se fait à température modérée et l'usure des creusets est de beaucoup moins rapide.

On sait aujourd'hui utiliser les minerais pauvres, en en retirant l'oxyde d'antimoine pur par distillation, comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

TRAITEMENT PAR DISTILLATION

Distillation à l'état métallique : mercure, zinc. — Distillation à l'état d'oxydes : zinc, antimoine. — Condensation des fumées métalliques.

DISTILLATION A L'ÉTAT MÉTALLIQUE

Certains métaux volatils peuvent être séparés immédiatement de leur minerai à l'état de pureté, si on les chauffe assez pour les distiller : le traitement métallurgique devient alors tout spécial. Les minerais doivent être chauffés en vases clos et la vapeur recueillie dans des condensateurs. La condensation complète de ces vapeurs devient la principale difficulté.

Deux des métaux usuels se trouvent dans ce cas, le mercure et le zinc. Les appareils destinés à les extraire sont très différents. En effet, le mercure est volatil à une température modérée ; il bout à 360 degrés. Le zinc, au contraire, ne se réduit en vapeur que quand il est chauffé au blanc.

Minerai de mercure. — Le mercure se rencontre souvent sous forme de cinabre : c'est un sulfure rouge qui imprègne parfois en proportion très faible les roches encaissantes des filons. On traite

des minerais dont la teneur dépasse rarement 10 pour 100, et descend parfois à 2 ou 3 pour 100.

Le sulfure peut se décomposer par grillage, lorsqu'il est chauffé au rouge sombre au contact de l'air; comme dans tout

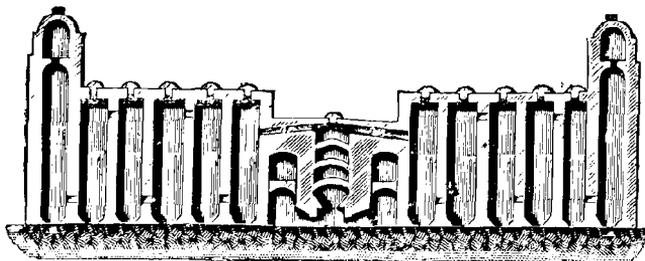


FIG. 31. — Four d'Idria.

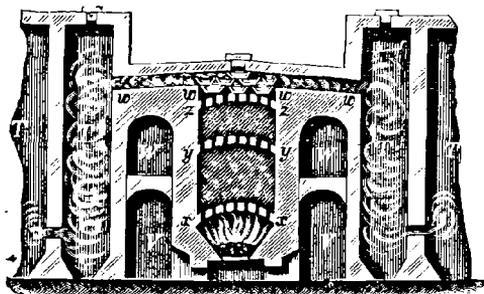


FIG. 35. — Four d'Idria.

On voit au milieu le four à cuve, divisé en plusieurs compartiments par des voûtes à jour; en bas se trouve le foyer; au-dessus on charge les minerais. Les menus sont dans les compartiments supérieurs, placés dans des vases en poterie découverts. — Des deux côtés se trouvent les chambres de condensation.

grillage, le soufre se dégage à l'état d'acide sulfureux, mais le métal ne s'oxyde pas, car l'oxyde de mercure serait lui-même décomposé par la chaleur; le métal reste donc libre et se distille.

Traitement du cinabre. — Le grillage peut se faire dans des fours à réverbère quand le minerai est menu, ou dans des fours à

cuve, chauffés par des foyers latéraux, quand le minerai est en gros morceaux. Les vapeurs circulent dans de grandes chambres qui sont disposées avec un sol en pente, de manière que le mercure liquide qui se condense coule directement dans des réservoirs. La principale question est de rendre ces chambres bien étanches pour éviter les fuites, et d'assurer le refroidissement complet. Les premières chambres sont en maçonnerie; les dernières, destinées à achever le refroidissement, peuvent être en bois, avec des fenêtres

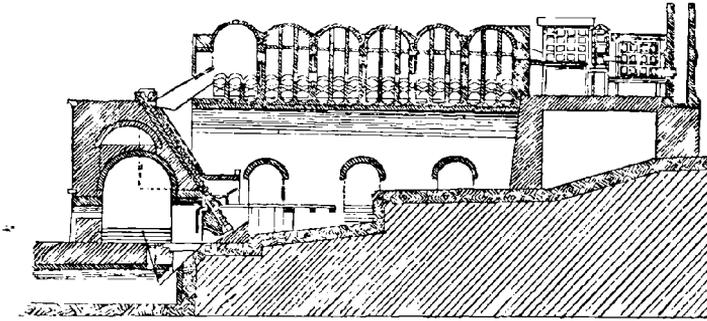


FIG. 36. — Four pour menus employé en Nouvelle-Californie.

On voit à gauche le four; c'est un couloir incliné où l'on verse les menus, qui y glissent spontanément, en s'arrêtant sur une série de briques disposées en chicane. — A droite sont les chambres de condensation, et près de la cheminée les condenseurs à vitre, entre lesquels se trouve un petit condenseur en fonte à circulation d'eau.

en verre, et enfin on peut encore faire traverser aux gaz des caisses en fonte, refroidies par un courant d'eau extérieur. (Ces caisses ne peuvent être placées que là où les gaz sont déjà très froids et où la fonte ne peut plus être attaquée par les vapeurs acides.)

On peut activer le tirage par des ventilateurs aspirants. Ces ventilateurs doivent être placés à l'extrémité des chambres, de manière à y maintenir une pression légèrement inférieure à la pression atmosphérique. Il n'y a pas alors de fuite de vapeur; s'il existe des fissures, c'est l'air extérieur qui rentre dans les chambres,

et, comme le mercure n'est pas oxydable, il n'en résultera pas de pertes.

Les frais de traitement ne sont pas élevés, car la température est modérée et la dépense de combustible faible. Ils ne dépassent pas 10 à 20 francs par tonne de minerai. Le prix élevé du métal tient surtout à la rareté des minerais et à leur faible teneur.

Minerais de zinc. — Les minerais de zinc que l'on traite au four sont toujours des oxydes, soit naturels, comme les calamines (1), soit obtenus par le grillage de la blende ou sulfure de zinc. Ces oxydes peuvent être réduits par le charbon; on les chauffe au blanc dans des cornues reliées avec des condensateurs où le zinc distille.

Fours à zinc. — Les fours sont en général des chambres très élevées, chauffées à leur base par les foyers, et où l'on superpose plusieurs rangées de cornues. Les cornues du type belge sont des tubes en terre réfractaire, de 15 centimètres de diamètre sur 1^m, 20 de longueur, fermés par un bout et ouverts à l'autre pour recevoir le condenseur. Chaque tube peut contenir de 15 à 20 kilogrammes de minerai.

En Silésie, on emploie un autre genre de fours, où les cornues sont remplacées par des moufles à fond plat, pouvant contenir 50 kilogrammes de minerai; les plus grands en contiennent même 100 kilogrammes. Les moufles sont rangés sur des banquettes, entre lesquelles se trouve le foyer.

La consommation de combustible dans ces fours est considérable, et, pour la diminuer, il faut augmenter autant que possible le volume et la charge du four. Les anciens fours avaient des

(1) Dans l'industrie on désigne sous le nom de calamines tous les minerais oxydés du zinc, qui se trouvent surtout en amas au milieu de formations calcaires. Le métal y est à l'état de carbonate ou de silicate. Ces minerais subissent, en général, auprès des mines, une calcination qui décompose les carbonates et les ramène à l'état d'oxyde en provoquant le dégagement de l'acide carbonique; quant aux silicates, ils se réduisent par le charbon, comme l'oxyde, et exigent seulement une température plus élevée.

dimensions limitées, par suite de la difficulté d'y obtenir une température suffisante; les fours belges, par exemple, ne contenaient guère plus de vingt-quatre cornues, les fours silésiens une dou-

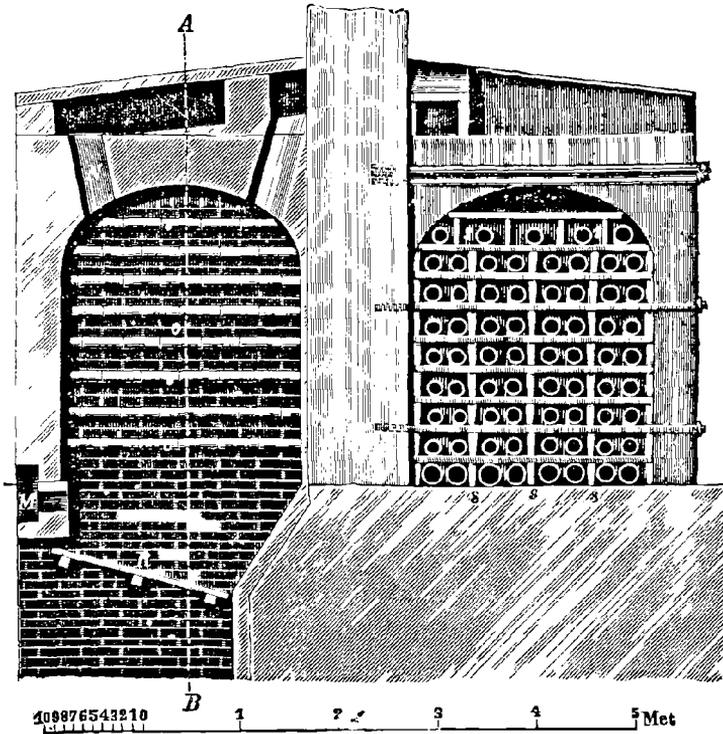


FIG. 37. — Four belge pour zinc.

En R se trouve la grille de chauffage desservi par la porte M; les flammes sortent en haut de la chambre par les canaux N, après avoir circulé autour des tubes. — La fosse K sert à recevoir les résidus après le déchargement des cornues.

zaine de mouffes, et encore on n'arrivait à bien les chauffer qu'avec des charbons à longue flamme, de première qualité. L'emploi des fours à gaz et des fours Siemens a permis de chauffer de plus grandes enceintes et de tripler la capacité des fours, en même

temps qu'on diminuait beaucoup la consommation de combustible. Au lieu de brûler 3 tonnes de charbon par tonne de minerai, on n'en brûle plus guère que 1500 kilogrammes dans les fours perfectionnés.

Ces fours sont chauffés souvent avec des grilles soufflées. On maintient ainsi dans les fours une pression un peu supérieure, qui empêche la vapeur de zinc de se perdre par les fissures des cornues, comme elle le ferait dans des fours à tirage naturel.

Condenseurs. — Les condenseurs se composent d'un tuyau en terre que l'on fixe sur l'entrée des cornues, en les lutant avec de l'argile, et qui viennent sortir de la devanture du four. A l'extrémité de ces tuyaux, on ajuste de petits tonneaux en tôle, n'offrant à la sortie des gaz qu'un orifice très faible; les gaz, produits de la réduction de l'oxyde par le charbon, qui se composent principalement d'oxyde de carbone, suivant la formule



s'échappent à travers ces appareils, en même temps que les vapeurs de zinc; celles-ci se condensent, et le métal se rassemble dans le tonneau, où il reste fondu, car la température y dépasse

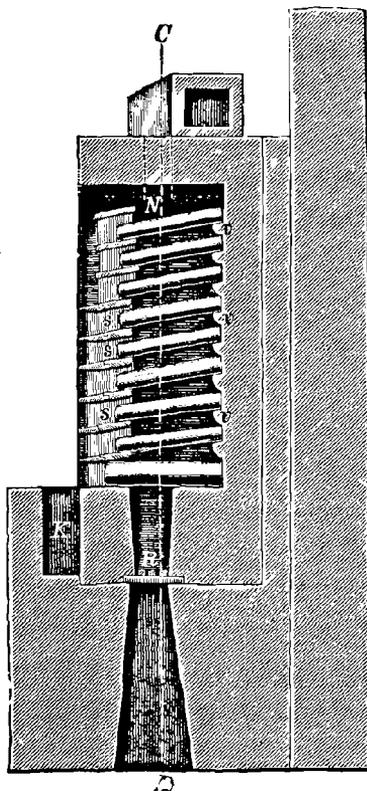


FIG. 38. — Four belge pour zinc (coupe).

400 degrés. En effet, le refroidissement du condenseur n'est produit que par l'air extérieur.

(Cela suffit, parce que le zinc n'est volatil qu'à une température très élevée. Il n'y a donc pas besoin d'un refroidissement très

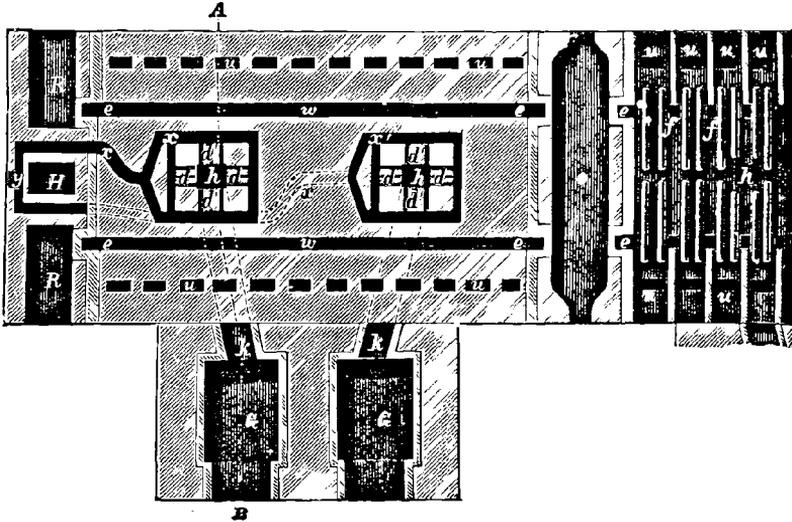


FIG. 39. — Four silésien à gaz.

Les gaz combustibles produits dans les gazogènes G arrivent au milieu du four par les puits k, h ; l'air soufflé nécessaire à la combustion arrive par les conduits x, y, z, d et vient brûler le gaz à la bouche des puits. Les flammes s'élèvent vers la voûte et sont obligées de se rabattre pour sortir par les galeries w , pratiquées dans l'épaisseur des banquettes, après avoir circulé autour des moules m . Dans les chambres r se trouvent les condenseurs; les orifices u servent à jeter les résidus dans la fosse P. — La chambre o , située entre deux fours et chauffée par conductibilité, sert à la calcination de la calamine.

énergique pour le condenser.) Les pertes proviennent surtout de la facilité avec laquelle il s'oxyde; il ne faut pas que ces vapeurs soient en contact avec l'air, ni même avec l'acide carbonique ou la vapeur d'eau qu'elles peuvent décomposer. C'est pour ce motif qu'on ne donne aux condenseurs qu'un très faible volume, de manière que l'air soit balayé par le courant d'oxyde de carbone sortant des cornues.

Conduite de l'opération. — Le traitement d'une charge dure en général douze heures ou vingt-quatre heures, suivant que le minerai est plus ou moins facile à réduire et que la charge des cornues est plus ou

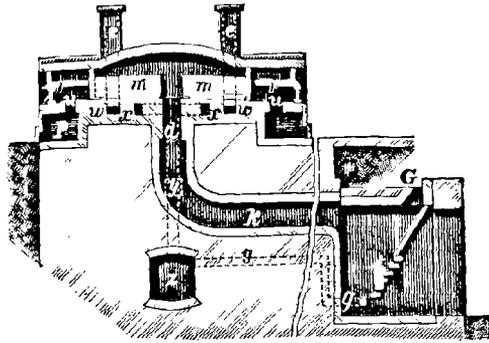


FIG. 10. — Coupe du four silésien à gaz.

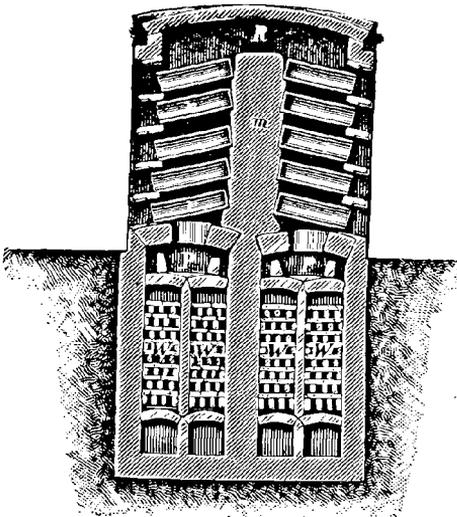


FIG. 41. — Four Siemens.

Les gaz et l'air arrivent séparément d'un côté par les chambres W, où ils s'échauffent : ils se mélangent dans la chambre de combustion P. Les flammes s'élèvent autour des moules, passent en R et redescendent dans l'autre moitié du four, pour sortir par l'autre paire de chambres. Le courant est alternativement renversé.

moins considérable. Dans les fours silésiens, la durée est presque toujours de vingt-quatre heures. Toute l'opération doit être conduite par la même brigade d'ouvriers associés. Ils commencent par vider les cornues en retirant la charge qui vient d'être réduite ; puis ils les examinent pour remplacer celles qui seraient fendues. Ils préparent les charges en mélangeant soigneusement le minerai en poudre avec du charbon, et les introduisent dans les cornues en se servant de pelles de forme spéciale. En-

fin, ils ferment le devant des cornues avec de l'argile et y fixent les condenseurs.

A partir de ce moment, ils n'ont qu'à surveiller le feu, qu'il faut pousser plus ou moins activement, pour élever peu à peu la température jusqu'au plus haut degré nécessaire. Ils doivent aussi examiner s'il ne se produit pas de fissures dans les garnissages d'argile, pour les obstruer immédiatement.

A la fin, on coule le zinc dans des lingotières en le puisant à la

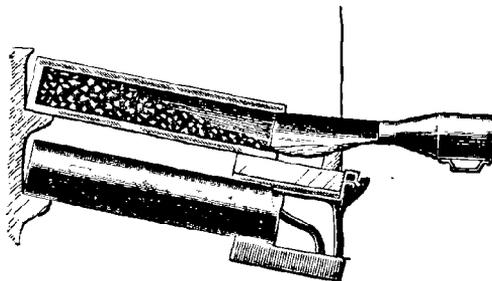


FIG. 42. — Condenseur belge.

Le métal fondu se rassemble dans le renflement du tuyau en terre, fixé à l'extrémité de la cornue. L'allonge en tôle placée à droite sert surtout à recueillir les oxydes.

cuiller dans le tonneau condenseur; on recueille à part, en renversant ce tonneau, les dépôts oxydés qui s'y forment sur les parois.

L'opération est très délicate à conduire; un dégagement trop brusque se traduit par des pertes de zinc, quand les vapeurs sont entraînées hors des condenseurs. Un chauffage insuffisant ne produit pas la réduction complète des oxydes, et le métal reste dans les résidus. L'allure du four doit varier avec la richesse et la nature du minerai. Il faut des ouvriers très expérimentés, auxquels on donne des primes à mesure qu'ils obtiennent un meilleur rendement et qu'ils économisent plus de charbon. Les pertes at-

teignent quelquefois 25 pour 100 du métal ; des ouvriers inhabiles pourraient arriver à ne recueillir presque pas de zinc.

Les perfectionnements introduits ont permis d'abaisser de 50 pour 100 la consommation de houille. En Belgique, où on



FIG. 43. — Aspect extérieur d'un four belge pendant l'opération.

On voit brûler à l'extrémité des allonges l'oxyde de carbone qui se dégage de chaque cornue. Dans la partie droite, les allonges ne sont pas encore en place.

traite des minerais riches, elle est de 3 à 4 tonnes par tonne de zinc ; en Silésie, où les minerais sont pauvres, elle atteint 6 à 8 tonnes. Dans les anciens fours, on consommait 7 à 8 tonnes en Belgique, 15 à 17 en Silésie. Ce résultat est dû surtout à l'agrandissement des fours. La dépense de main-d'œuvre a moins

changé : la même brigade voit le four pendant vingt-quatre heures et il faut de quatre à six hommes pour produire une tonne de zinc.

On est arrivé aussi à réduire les pertes en zinc ; cependant elles représentent encore 10 à 20 pour 100 du métal. Elles ont d'autant plus d'importance que le minerai est plus pauvre. Elles dépendent essentiellement de l'habileté des ouvriers.

Par suite de cette difficulté et de la grande consommation de combustible qu'elle exige, la métallurgie du zinc est restée exclusivement concentrée dans quelques pays qui possèdent de riches bassins houillers et où cette industrie existe depuis longtemps ; il est très difficile de l'établir dans un pays neuf, et les nombreuses mines exploitées par exemple dans le bassin de la Méditerranée sont obligées de vendre leurs minerais en Angleterre ou en Belgique.

DISTILLATION A L'ÉTAT D'OXYDES

Zinc. — On a essayé souvent de réduire les minerais de zinc dans les fours à cuve, ce qui serait beaucoup moins coûteux. Le zinc, dans ces conditions, se réduit et distille ; mais ses vapeurs, noyées dans la grande masse du gaz qui sort du four, sont impossibles à condenser ; elles se réoxydent au contact de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau qui y sont toujours en forte proportion. L'oxyde de zinc commence à se déposer à la bouche même du four. Les hauts fourneaux, les fours à plomb, où l'on traite les minerais contenant un peu de zinc, ont souvent leur gueulard obstrué par ces dépôts blancs qu'on appelle *cadmies*.

Pour arriver à recueillir du métal, il faudrait ne charger dans le four que des matières parfaitement sèches, calcinées, soufflées avec de l'air sec, et éviter toute production d'acide carbonique et de vapeur d'eau. Ces conditions ne sont pas jusqu'à présent pratiques à réaliser dans l'industrie ; la distillation au four à cuve ne peut donc servir qu'à fabriquer des oxydes.

Blanc de zinc. — En Amérique, on traite ainsi depuis longtemps certains minerais de zinc impurs, en les chauffant avec du charbon sur une grille soufflée. Un ventilateur aspire les gaz et leur fait traverser de grandes chambres de dépôt, où l'on recueille de l'oxyde blanc utilisé en peinture.

Blanc de plomb. — Ce mode de distillation a été quelquefois appliqué à des minerais de plomb; en les chauffant dans des foyers soufflés à haute température, on volatilise la plus grande partie du plomb, et l'on peut recueillir les dépôts blancs de sulfate et d'oxyde, qui peuvent remplacer la céruse pour la peinture.

Fabrication de l'oxyde d'antimoine. — Ce mode spécial de distillation a été appliqué avec succès par M. Chatillon aux minerais d'antimoine.

Nous avons vu que les procédés ordinaires pour la fabrication de l'antimoine ne pouvaient utiliser que des minerais riches, et les pertes y sont encore considérables. Si l'on fond les minerais aux fours à cuve, l'antimoine se volatilise entièrement et ses vapeurs se réoxydent à la sortie du four; avec des chambres de dépôt convenablement disposées, et l'emploi d'un ventilateur aspirant et soufflant dans lequel on fait pénétrer parfois des injections d'eau, M. Chatillon est arrivé à condenser complètement ces vapeurs et à recueillir la totalité de l'antimoine sous forme d'oxyde pur.

Cet oxyde est susceptible de divers emplois pour la fabrication de produits pharmaceutiques. Il peut aussi servir à fabriquer l'antimoine métallique par réduction avec du charbon. Cette fabrication en deux temps n'est pas plus onéreuse que le traitement direct des sulfures riches au creuset par le fer, car la réduction de l'oxyde est relativement plus facile et moins coûteuse, les creusets y sont beaucoup moins attaqués que dans le traitement des sulfures. Ce procédé permet d'utiliser les minerais les plus pauvres et de développer beaucoup la production de l'antimoine en Auvergne, où il existe de nombreux filons qui donnent des

minerais mélangés, dont on ne pouvait autrefois utiliser les parties les plus riches.

Condensation des fumées métalliques. — Dans les usines où l'on traite les minerais de plomb ou de cuivre, il y a toujours des pertes importantes par volatilisation ou entraînement des poussières, surtout lorsque le traitement se fait dans un four à cuve. Toutes les fumées qui se dégagent des fours doivent être envoyées dans des chambres ou dans des carneaux larges et très allongés, avant de se rendre à la cheminée.

Carneaux de condensation. — Quand les usines sont en pays de montagnes, on construit souvent de longues galeries grimpant sur la colline jusqu'à une grande hauteur, ce qui a l'avantage de déverser plus haut dans l'atmosphère les gaz délétères. On recueille dans ces galeries des dépôts pulvérulents composés en grande partie d'oxydes métalliques; ils sont parfois très riches lorsqu'on traite des minerais argentifères.

Pour assurer mieux la condensation de toutes les vapeurs métalliques, on a imaginé bien des procédés, on a été jusqu'à vouloir l'activer par des décharges électriques.

Carneaux à chicane. — Le système le plus en faveur et peut-être le plus simple consiste à multiplier les remous en interposant sur le trajet des gaz des chicanes, des obstacles contre lesquels le courant vient se briser, par exemple en suspendant dans les carneaux des rangées de plaques de tôle parallèles. A Tarnowitz, on y suspend des espèces de brosses portant des fils de fer qui ont presque la hauteur du carneau, de sorte que le courant gazeux circule à travers une forêt de tiges métalliques.

Procédés de refroidissement. — Il est utile aussi d'assurer le refroidissement complet des gaz, parce que, avec les poussières solides, ils entraînent aussi de véritables vapeurs métalliques, que

le refroidissement seul peut condenser. A cet effet, les carnaux de condensation doivent être construits avec des parois minces; on peut y employer des briques creuses ou des cloisons en ciment armé, c'est-à-dire consolidées par des armatures en fer (système Monnier).

A Tarnowitz, les gaz, avant de se rendre dans les derniers carnaux, traversent une tour où est suspendu une sorte de jeu d'orgue, formé par des tuyaux de cuivre où circule un courant d'eau. Ce serpentin joue à la fois le rôle de chicane contrariant le parcours des gaz et d'appareil refroidisseur.

CHAPITRE V

TRAITEMENT PAR VOIE HUMIDE

Considérations générales. — Traitement des minerais de cuivre pauvres. —
Extraction des métaux précieux : argent, or.

Considérations générales. — Au lieu de traiter les minerais par fusion, on emploie quelquefois dans l'industrie des procédés analogues à ceux que le chimiste emploie au laboratoire : on cherche à dissoudre le métal par des réactifs convenables qui n'attaquent pas les gangues, et ensuite on le précipite seul de sa dissolution.

La plupart du temps il faudrait recourir à des réactifs coûteux et ces méthodes ne seraient pas applicables ; mais, lorsqu'il s'agit de métaux ayant une certaine valeur, elles peuvent devenir avantageuses, surtout lorsque le métal est en très petite quantité dans le minerai. Dans ce cas, en effet, si l'on opérât par voie ignée, il faudrait fondre une masse de matière considérable ; avec les procédés chimiques, si le réactif n'attaque que le métal utile, sa consommation n'augmente pas par la présence des matières stériles. Tandis que les frais de fusion sont à peu près proportionnels à la quantité de minerai qu'on traite, les frais de dissolution ne dépendent que de la quantité de métal qu'on extrait. Ce second type de méthode peut donc prétendre à l'avantage sur le premier quand il s'agit de minerais pauvres.

On désigne souvent ces procédés sous le nom de traitements par voie humide, par opposition aux traitements par voie sèche, qui sont ceux où l'on emploie le feu et la fusion.

Traitement des minerais de cuivre pauvres. — Parmi les métaux usuels le cuivre est le seul que l'on extrait assez souvent

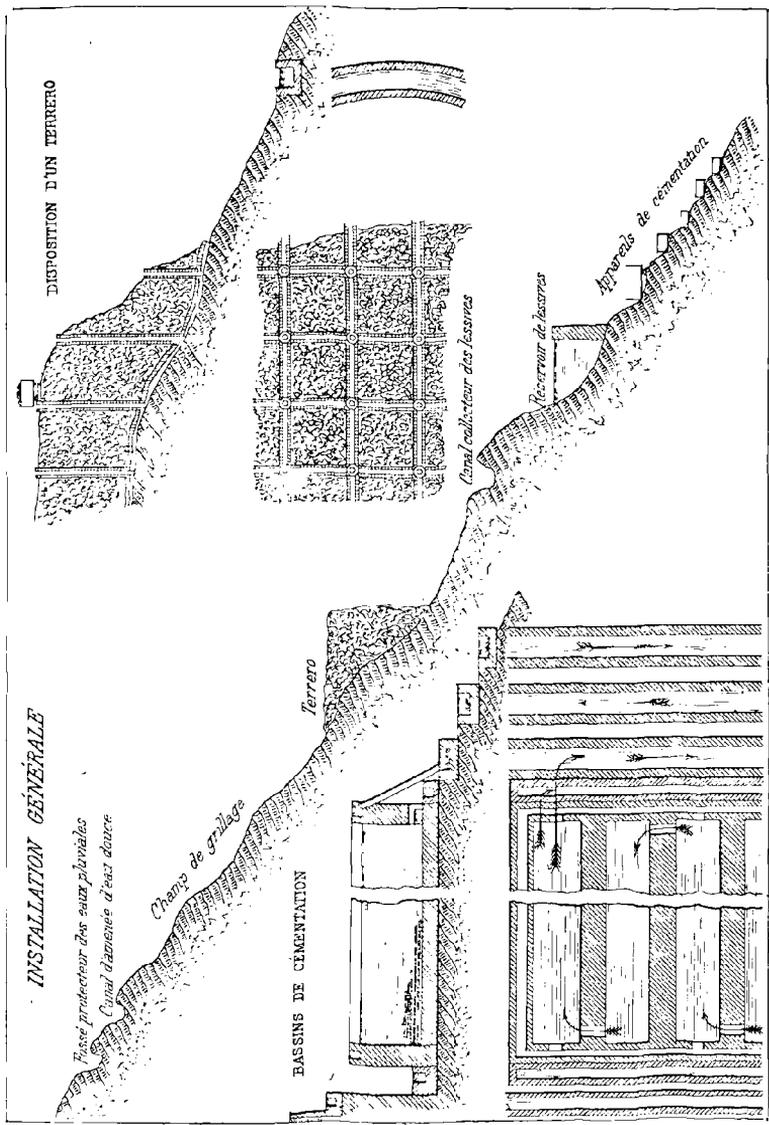


FIG. 44. — Traitement des pyrites cuivreuses pauvres au Rio-Tinto.

par voie humide. Les pyrites cuivreuses peuvent en effet donner un produit soluble presque sans réactif spécial ; il suffit de les griller d'une manière convenable ; l'oxydation lente de ces sulfures donne des sulfates de fer et de cuivre. Ce phénomène se produit spontanément dans les mines dont les eaux sont souvent bleues et chargées de sel de cuivre.

Méthode du Rio-Tinto. — Au Rio-Tinto, qui a reçu son nom précisément à cause de ce phénomène naturel, on traite des amas et des filons puissants de pyrites que l'on exploite même en carrières à ciel ouvert.

Ces pyrites ne contiennent le plus souvent que de faibles quantités de cuivre, environ 2 pour 100. On en forme des tas de très grandes dimensions qu'on laisse se griller très lentement en les arrosant de temps en temps avec de l'eau. L'eau qui s'écoule est chargée de sulfate de cuivre : on l'envoie dans de grands bassins où on précipite le cuivre en faisant séjourner les liqueurs avec des saumons de fonte ou des rognures de fer. Ce métal décompose le sulfate en prenant la place du cuivre, qui se dépose à la surface du fer. Ce dépôt s'appelle *cuivre de ciment*. C'est un cuivre très impur, qui doit être fondu et raffiné.

On a modifié cette méthode par suite des dégâts que le dégagement de l'acide sulfureux cause dans le voisinage. Au lieu de griller les tas, on les laisse s'oxyder lentement à l'air et on les arrose avec une dissolution de sel marin et de sulfate de fer provenant de la décomposition des pyrites. Ces deux sels réunis agissent comme une dissolution de chlorure de fer qui peut attaquer le sulfure de cuivre et le dissoudre.

Ces procédés n'exigent pour ainsi dire pas de travail, mais ils sont très lents ; il faut plusieurs années pour épuiser à peu près le minerai et l'on a besoin d'emplacements et d'installations considérables.

Grillage chlorurant. — On peut dissoudre rapidement le

cuivre si l'on grille le minerai dans des fours avec du sel marin. La réaction du chlorure de sodium fondu sur les sulfates métalliques produits pendant le grillage donne lieu à un échange de bases et des acides; il se forme du sulfate de soude et des chlorures de cuivre solubles. Le produit du grillage est lessivé avec de l'eau.

Ce système s'applique surtout aux minerais qui sont à la fois pauvres en cuivre et en soufre, c'est-à-dire qui ne contiennent que peu de pyrites de fer. Ainsi on l'applique en grand en Angleterre au traitement des résidus des pyrites.

Après avoir brûlé les pyrites pour fabriquer l'acide sulfurique, il reste un produit composé principalement d'oxyde de fer. Lorsque le minerai contient un peu de cuivre, le grillage n'est jamais complet et il reste toujours un peu de soufre. On le traite alors par grillage chlorurant, qui enlève les dernières traces de soufre en même temps qu'il permet de dissoudre le cuivre; l'oxyde de fer, qui reste insoluble, est assez pur et assez riche pour être employé dans les forges. On arrive ainsi à utiliser tous les éléments du minerai : le cuivre, le soufre et le fer.

Le grillage chlorurant se fait souvent dans des fours à moufle, de manière à recueillir l'acide chlorhydrique qui se dégage. On étale le minerai, mélangé de 5 pour 100 de sel environ, sur la sole du moufle, et l'on chauffe lentement, sans dépasser le rouge sombre. Quand la masse est assez chaude, on brasse activement pour faire réagir le sel sur les sulfates produits par le grillage : il se dégage des fumées blanches d'acide chlorhydrique, qui, avant de se rendre à la cheminée, traversent de grandes tours pleines de fragments de coke et arrosées par une pluie d'eau. L'acide chlorhydrique s'y dissout.

Quand l'opération est terminée, on décharge le four et on lessive le minerai d'abord avec de l'eau, puis avec l'acide étendu recueilli dans les tours de condensation, lequel achève la dissolution du cuivre.

EXTRACTION DES MÉTAUX PRÉCIEUX

Les métaux précieux s'extraitent souvent par dissolution ; ils se trouvent en effet dans leurs minerais sous forme de traces très faibles, et, si l'on voulait les extraire par voie sèche, il y aurait des masses énormes de matière stérile à fondre, le métal resterait même souvent engagé dans les scories.

ARGENT

Minerais d'argent. — L'argent se trouve rarement seul dans ses minerais, il accompagne presque toujours le plomb et il devient, comme nous l'avons vu, un produit accessoire des usines à plomb. Il reste pendant le traitement à l'état d'alliage avec ce métal et on l'extrait par coupellation. Cependant on trouve aussi des filons qui contiennent l'argent accompagné seulement de très petites quantités d'autres sulfures métalliques ; la gangue se compose le plus souvent de quartz ou de roches siliceuses.

Fonte plombeuse. — Lorsqu'on en a l'occasion, on peut mélanger ces minerais à d'autres plus riches en plomb et les traiter par fusion ; c'est le meilleur moyen d'extraire la totalité de l'argent avec le plomb d'œuvre. Autrefois, beaucoup de minerais riches d'Amérique étaient envoyés en Allemagne et en Angleterre pour être soumis à la fusion plombeuse.

Traitement par dissolution. — Lorsqu'on ne se trouve pas à proximité de gisements plombifères, on peut extraire l'argent par dissolution.

Les minerais qui contiennent presque toujours une certaine proportion de pyrite sont grillés en mélange avec du sel marin ; l'acide sulfureux réagit à chaud sur le chlorure, le chlore dégagé attaque les minéraux de l'argent. En lessivant avec de l'eau, on

dissout le fer, le cuivre et une partie de l'argent qui est à l'état de chlorure double combiné avec le chlorure de sodium.

Le reste du chlorure d'argent peut être dissous par une lessive très étendue d'hyposulfite de soude; on le précipite ensuite par le sulfure de sodium, et la lessive peut resservir, car une très faible partie seulement a été décomposée.

Ce traitement, employé dans plusieurs usines américaines, vient d'être introduit en France, à l'usine de Villeveille. Les filons quartzeux exploités à Villeveille autrefois pour plomb, sont remarquables par leur régularité, mais la galène ne s'y trouve en quantité un peu notable que par places. Leur exploitation avait été abandonnée, elle a été reprise avec succès sous la direction de M. Castelnau, qui a reconnu que les quartz qu'on rejetait comme stériles étaient fortement imprégnés de minéraux argentifères. On les sépare par triage à la main et on les traite par le procédé dont nous venons d'indiquer le principe. Le minerai grillé dans des fours à réverbère est chargé dans de grandes cuves en maçonnerie, où il séjourne environ une semaine. On y fait passer successivement un grand volume d'eau et de dissolution d'hyposulfite de soude. La cuve est garnie de claies en planches sur lesquelles sont tendues des toiles. On soutire les liqueurs pour les faire tomber dans une seconde cuve où on les précipite par le sulfure de sodium. Elles viennent enfin tomber dans une troisième cuve, où le précipité se rassemble et est séparé par filtration.

Les boues humides de sulfure d'argent sont reprises par une pompe qui les renvoie dans un filtre-presse. Cet appareil exprime le reste de la liqueur et l'on en retire des gâteaux compacts de sulfure noir qui peuvent contenir jusqu'à 10 pour 100 d'argent.

Amalgamation. — L'amalgamation est le procédé le plus employé pour traiter les minerais spéciaux d'argent; il paraît avoir été connu des anciens; il consiste à dissoudre l'argent par le mercure. Ce métal liquide s'allie rapidement à l'argent libre. Il peut aussi attaquer les chlorures, les bromures d'argent lorsqu'il

est en présence du fer ou de certains autres réactifs métalliques ; mais il n'attaque pas les sulfures que l'on doit d'abord soumettre au grillage chlorurant. Le plus souvent dans les filons les métaux sont plutôt à l'état de sulfure en profondeur et les autres minéraux sont des produits d'altération que l'on rencontre surtout près de la surface, aussi le traitement par amalgamation devient de plus en plus difficile, à mesure que les gîtes de surface s'épuisent.

Méthode mexicaine. — L'amalgamation a été pratiquée sur une grande échelle au Mexique avec des installations très primitives dont on retrouve encore quelques exemples ;

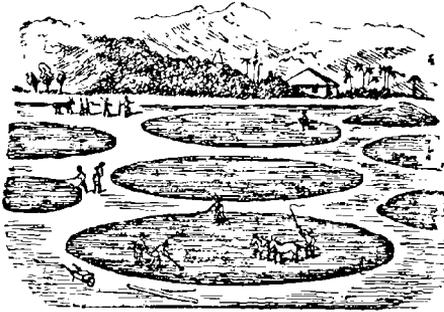


FIG. 45. — Traitement des minerais d'argent au Mexique.

c'est le procédé au *patio* ; le minerai, broyé sous des meules en pierre, est étendu sous forme de grande tourte dans des cours dallées où on le fait piétiner par des mules tournant autour d'un manège. On ajoute peu à peu différents réactifs :

du sel marin, du mercure et du magistral.

On donne ce nom à des sels de composition très variée qu'on peut obtenir en lessivant des pyrites grillées. Le sulfate de cuivre paraît y jouer le rôle prépondérant. Ce sel active la réaction du mercure sur les composés de l'argent ; on doit en ajouter plus ou moins, suivant que la masse s'échauffe, ce qui est un signe de réaction vive. Le traitement dure plusieurs semaines, au bout desquelles on peut rassembler le mercure au centre de cuvette formée par le dallage de la cour. Le mercure est d'abord filtré en le pressant dans des sacs en peau. L'excès de mercure liquide se sépare, il reste un alliage épais que l'on distille pour éliminer le mercure à l'état de vapeur.

Dans l'Amérique du Sud on pratique surtout l'amalgamation dans de grandes cuves en fonte ou en cuivre, où le minerai est chauffé et brassé avec une dissolution de sel.

Méthode des pans. — Aux États-Unis, où les minerais sont plus sulfurés, il faut d'abord les griller; on a imaginé beaucoup d'appareils pour rendre ce grillage plus rapide et plus économique en opérant sur de grandes masses; on le fait souvent dans

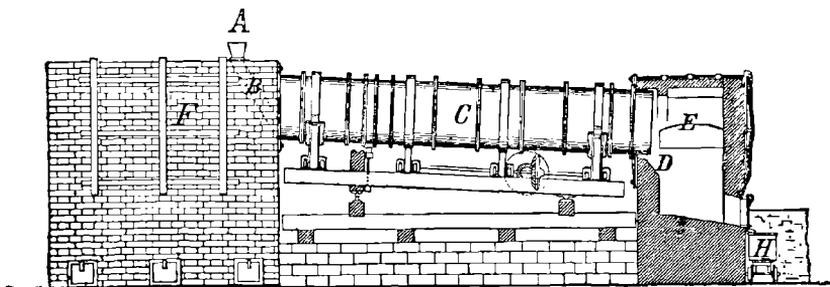


FIG. 46. — Four tournant.

Les flammes venant du foyer arrivent par le carneau E et traversent le cylindre de bas en haut. Les minerais chargés de la trémie A descendent lentement tout le long du cylindre, par suite du mouvement de rotation, ils viennent tomber en D et de là dans les wagons H destinés à recevoir le minerai grillé. — La chambre K sert au dépôt des poussières entraînées, qu'on retire par les portes du bas.

de grands cylindres tournants, où le minerai se trouve brassé avec le sel par le mouvement de rotation.

L'opération est beaucoup plus économique dans le four Stetefeld, qui n'est qu'une grande tour chauffée à la base, où l'on précipite le mélange de minerai et de sel sous forme de poudre fine. La chute se trouve assez retardée par le courant qui s'élève du foyer pour que le minerai arrive chaud en bas, où il séjourne un certain temps avant qu'on le retire par des portes latérales.

Il ne semble pas que dans cet appareil le grillage puisse être bien complet; néanmoins on l'emploie encore quelquefois avec les minerais faciles à amalgamer.

L'amalgamation se fait dans des *pans* . Ce sont des cuves circulaires où tournent des espèces de meules triturant le minerai. Au fond de la cuve se trouve une couche de mercure où passe

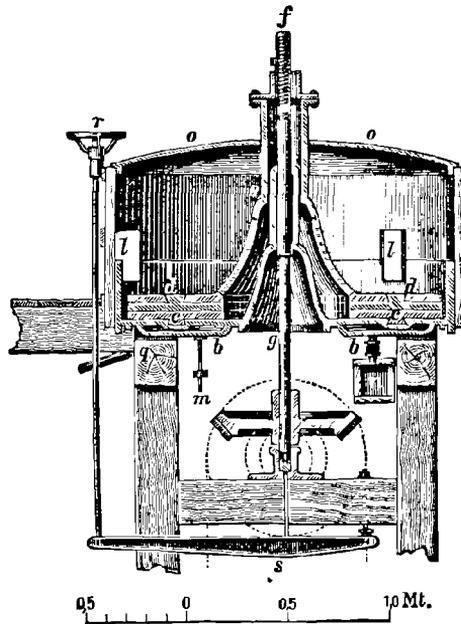


FIG. 47. — Pan d'amalgamation.

La meule *d* est suspendue au moyen du manchon *e* à un arbre vertical traversant la cuve. On peut régler la hauteur de la meule au moyen de l'écran *f*, afin de triturer plus ou moins énergiquement le minerai avec le mercure. Quand la meule est trop haute, l'or échappe sans avoir touché le mercure ; si elle est trop basse, il y a des pertes de mercure entraîné. — La liqueur peut s'échapper par les orifices *l*, munis de toiles métalliques très fines. — On soutire le mercure par les orifices *b*. — Quand on veut arrêter le mouvement, on soulève l'arbre au moyen de la roue *r* et du levier *s*.

peu à peu l'argent. Le minerai grillé est chargé dans les pans sous forme de *pulpe*, c'est-à-dire de poudre délayée avec une certaine quantité d'eau. Après plusieurs heures de trituration, on fait

écouler la pulpe dans d'autres cuves, où elles se reposent, et l'on recueille les gouttelettes de mercure entraînées.

Le traitement se termine toujours de la même manière, en filtrant, puis calcinant l'amalgame pour régénérer le mercure par distillation.

OR

L'or s'extrait le plus souvent comme l'argent, par l'amalgamation. Il se trouve en général dans ses minerais à l'état natif, c'est-à-dire sous forme de paillettes de métal libre. Il semble donc que son amalgamation doive être plus facile, car à l'état métallique son affinité pour le mercure est très grande; mais on rencontre d'autres difficultés et il existe aussi des minerais d'or rebelles à l'amalgamation. Ceux qui contiennent beaucoup de pyrite, surtout ceux où il y a des arséniures, sont parfois impossibles à traiter.

Lavage des sables. — Quand l'or est simplement à l'état de mélange dans les sables, on peut le retirer par un simple lavage. Il s'isole facilement des grains stériles par suite de sa grande densité. Ce métal se rencontre en traces dans presque toutes les alluvions des rivières au sortir des montagnes.

Autrefois de nombreux orpailleurs travaillaient les sables du Rhin ou des rivières qui descendent du plateau central de la France. Il se servaient de la battée, qui est une sorte d'écuelle dans laquelle on recueille une certaine quantité de sable. On la plonge dans un courant d'eau en lui imprimant de légères secousses et l'on arrive à faire entraîner peu à peu par l'eau les matières stériles et à ne conserver au fond que les éléments les plus lourds, parmi lesquels se trouvent les paillettes d'or. Un bon orpailleur peut arriver à laver environ 1 mètre cube de sable par jour et l'on a pu traiter de cette manière des sables contenant 1 gramme d'or par mètre cube et donnant par suite un rendement de 3 francs.

Cette industrie a à peu près disparu. On emploie encore la battée pour la prospection, c'est-à-dire pour examiner les sables et se rendre compte de leur teneur. Mais le lavage en grand se fait par des appareils plus puissants et plus productifs, et le

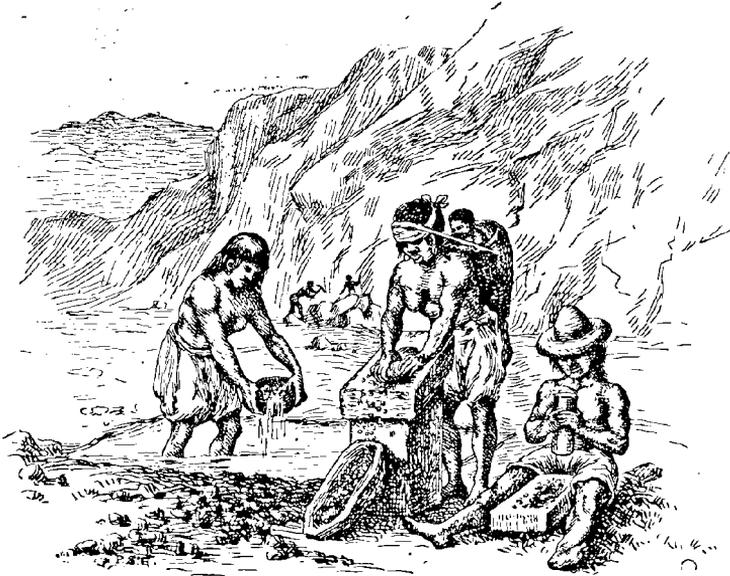


FIG. 48. — Lavage de l'or à la battée, chez les indiens.

On voit à gauche le laveur à la battée, à droite les ouvriers qui brisent le minerai et l'écrasent avec des pierres dures.

plus souvent on fait agir en même temps le mercure pour mieux épuiser le minerai.

En Sibérie, dans l'Oural, le lavage se fait sur des tables inclinées où un courant d'eau entraîne les matières légères tandis que l'or adhère à la surface rugueuse de la table. On peut placer sur la table des réglottes produisant le remous et y ménager des rigoles dans lesquelles se trouve du mercure. Souvent on achève

l'opération en faisant passer le courant d'eau sur des couvertures de laine ou sur des toiles grossières auxquelles adhèrent les dernières paillettes et les gouttelettes de mercure entraînées.

Méthode californienne. — En Californie, où on exploite des alluvions anciennes accumulées sur de grandes hauteurs et for-



FIG. 49. — Lavage de l'or sur table.

L'ouvrier met peu à peu les sables en suspension dans l'eau; ils passent sous une cloison qui règle la hauteur de la nappe d'eau. Cette nappe s'étale sur la table en y laissant les particules plus lourdes.

mant de véritables collines, on a installé le lavage dans des proportions géantes. Les tables de lavage ordinaires sont remplacées par des *sluices*, c'est-à-dire par de longs canaux en bois qui ont parfois un développement de plusieurs kilomètres. Le fond de ces canaux est garni de pierres et l'on y verse une certaine quantité de mercure. Par intervalles le courant traverse des parties élargies afin de favoriser le dépôt des matières les plus fines. L'eau est employée non seulement au traitement, mais à l'abatage des minerais : on capte l'eau sous pression dans le haut des vallées,

on la fait arriver en bas par de longues conduites, et de là, avec des espèces de lances, on projette des trombes d'eau qui viennent

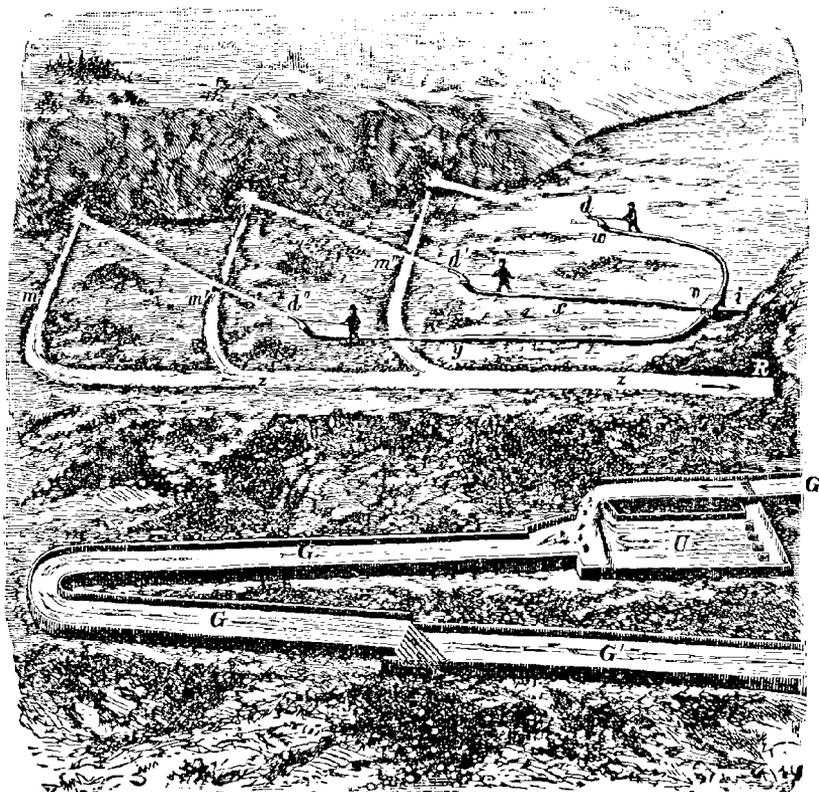


FIG. 50. — Exploitation du minerai d'or en Californie.

Les sables, abattus à la lance, tombent dans le courant x qui traverse le tunnel R, et de là passent dans le sluice G; en U, on voit des bassins latéraux où on dérive une partie du courant pour le ralentir. Entre G et G' se trouve une grille inclinée sur laquelle les grosses pierres glissent et vont tomber de côté, tandis que les sables fins, passant à travers les barreaux, continuent leur trajet en G', où s'achève le dépôt des parties fines.

saper le pied des collines. Le sable éboulé est entraîné par le courant dans les *sluices*. Les paillettes d'or se déposent peu à peu

au fond et sont absorbées par le mercure. Les autres matières sont entraînées. De temps en temps on interrompt le travail pour racler soigneusement tout le fond des *sluices* et recueillir le mercure avec l'amalgame.

Cette méthode curieuse a permis de traiter des sables contenant moins de 50 centimes d'or au mètre cube; mais on a dû y renoncer à mesure que les vallées se peuplaient et que l'agriculture se développait. L'immense quantité de sable déversée par les *sluices* devenait un embarras sérieux. Il a été interdit de le jeter dans les rivières; on a essayé alors de se servir de la pression de l'eau pour le remettre sur des plateaux stériles en envoyant au bas de conduites inclinées de grands volumes d'eau sous pression. Ce torrent ascendant entraînait des masses de sable et même des galets pour les rejeter plus haut. Néanmoins cette exploitation a à peu près disparu; d'ailleurs avec ces procédés puissants et expéditifs, on épuise assez rapidement les alluvions d'une région, et dans la plupart des pays aurifères on est obligé maintenant de s'attaquer aux filons ou aux gîtes souterrains.

Traitement au bocard. — Les quartz aurifères, qui forment de puissants filons dans les Montagnes Rocheuses, en Australie, etc., sont presque toujours bocardés sous des pilons avec addition d'un peu de mercure au fond de l'auge. Le minerai arrive avec un fort courant d'eau. Sur une face du bocard se trouvent des tamis à travers lesquels l'eau entraîne les matières suffisamment broyées. Les paillettes d'or tombent au fond de l'auge et viennent se combiner avec le mercure. Pour retenir les paillettes fines qui peuvent être entraînées par l'eau, le courant au sortir du bocard glisse sur des plans inclinés formés par des plaques de cuivre amalgamé. L'or adhère fortement à la surface visqueuse de ces plaques.

Les pertes à l'amalgamation sont toujours considérables et il n'est pas rare qu'on obtienne seulement la moitié de l'or contenu dans les quartz. Les paillettes d'or très fines flottent parfois à la

surface de l'eau sans venir à la surface du mercure ; l'or rouillé, c'est-à-dire recouvert d'oxyde de fer, celui qui est enduit d'argile échappent à l'action du réactif, qui ne les touche pas. Il est même important d'éviter qu'il ne s'introduise de l'huile dans les bocards. Le minerai graissé ne serait pas attaqué par le mercure.

Les résidus entraînés après la sortie des bocards peuvent être

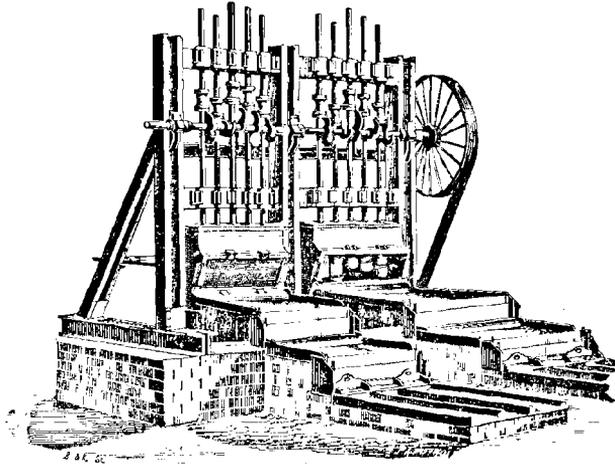


FIG. 51. — Bocard amalgamateur.

recueillis dans des bassins de dépôt ; on les appelle des *tailings*. Ces matières se traitent souvent aujourd'hui par la cyanuration.

Cyanuration. — L'introduction de ce procédé a eu une grande importance pour le Transvaal, où l'on exploite des conglomérats aurifères contenant des pyrites, et surtout de l'oxyde de fer, et ne donnant qu'un assez faible rendement à l'amalgamation. Les *tailings* sont versés dans de grandes cuves, où on les laisse séjourner longtemps avec une dissolution très étendue de cyanure de potassium. Ce réactif, en présence de l'air, attaque et dissout l'or. De la dissolution filtrée on peut précipiter l'or par le zinc ou par un courant

électrique. Le cyanure dissout rapidement les paillettes fines et l'or libre qui, sous diverses formes, avaient échappé au mercure. Son action serait au contraire lente sur les grains d'or un peu gros que le mercure prend facilement. Il vient donc compléter

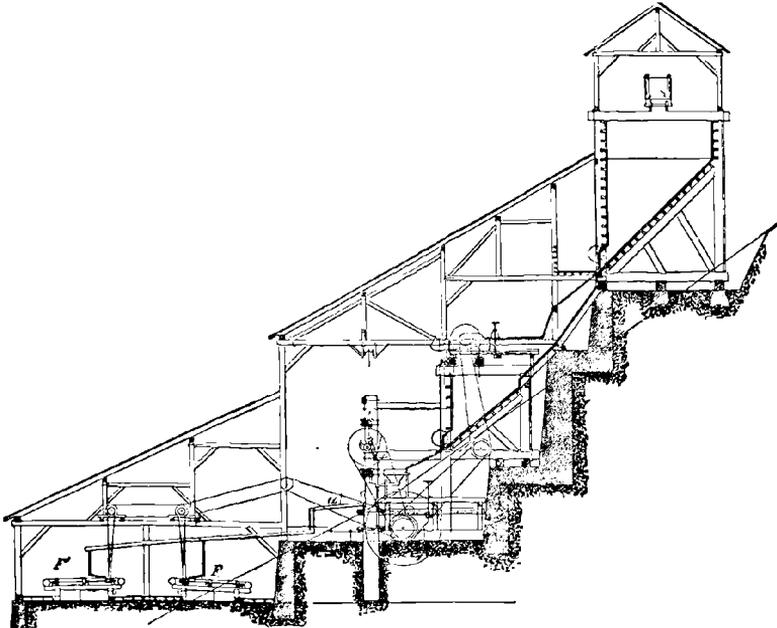


FIG. 52. — Ensemble d'une installation pour le traitement des minerais d'or.

A l'étage supérieur se trouvent les trémies pour l'emmagasinement et la distribution des minerais ; au-dessous, les bocards ; en bas, les tables où se fait le lavage des résidus pour recueillir les concentrés.

avantageusement l'amalgamation, et les minerais qui ne contiendraient que peu d'or amalgamable peuvent être traités directement par le cyanure.

Fonte plombeuse. — Les minerais d'or contenant des sulfures métalliques complexes en quantité un peu grande restent encore rebelles à la plupart des procédés industriels connus. Le moyen

le plus avantageux est de les fondre avec des minerais de plomb. L'or se combine avec ce métal aussi bien qu'avec l'argent ; mais cela n'est pas possible dans tous les pays. La cyanuration devient très coûteuse pour des minerais de ce genre, parce que le cyanure attaque la plupart des métaux étrangers et qu'il se fait alors une consommation exorbitante de ce réactif ; aussi désigne-t-on sous le nom de *cyanicides* ces métaux nuisibles.

Chloruration. — Les minerais rebelles peuvent encore être traités avec succès par chloruration. Le chlore libre est un des rares réactifs qui attaquent l'or et forment avec lui un sel soluble. Il faut d'abord griller soigneusement le minerai avec du chlorure de sodium. Cette opération n'attaque guère l'or, mais elle oxyde ou chlorure tous les autres métaux qui sans cette préparation absorberaient une grande quantité de chlore. On place ensuite le minerai grillé dans des tonneaux avec de l'eau, du chlorure de chaux et de l'acide sulfurique ; on fait tourner l'appareil fermé, la réaction de l'acide sulfurique sur le chlorure de chaux dégage du chlore gazeux et l'or est dissous. Théoriquement ce procédé permettrait d'épuiser la plupart des minerais mieux que les autres méthodes usuelles, mais il est coûteux et on ne l'emploie que faute de mieux et seulement pour les minerais sulfurés riches.

On l'applique notamment aux *concentrés*. Lorsque les minerais contiennent assez de pyrites ou de sulfures métalliques, les résidus pulvérisés, au sortir des bocards, sont lavés sur des tables, où l'eau entraîne les parties les plus légères. On isole ainsi les sulfures, dans lesquels il reste beaucoup d'or non amalgamable. C'est ce produit que l'on nomme *concentrés* et qu'on traite par grillage et chloruration, quand il n'y a pas assez d'usines à plomb pour le traiter par fusion plombeuse.

CHAPITRE VI

AFFINAGE DES MÉTAUX

Affinage par fusion. — Affinage chimique : séparation des métaux précieux.
— Affinage électrique du cuivre.

Les métaux, tels qu'on les obtient par la fusion de leur minéral, sont presque toujours impurs. Le plus souvent ils seraient impossibles à travailler, l'alliage avec les corps étrangers leur ôtant toute malléabilité; l'affinage a pour but d'éliminer autant que possible ces impuretés. Les méthodes d'affinage sont très nombreuses. Pour la plupart des métaux usuels, l'affinage se fait par une fusion oxydante au contact de l'air.

AFFINAGE PAR FUSION

Cette opération s'exécute dans des fours à réverbère. (V. fig. 7.)

Conduite de l'opération. — Le métal est introduit sous forme de saumons que l'on empile sous la voûte du four et qui se trouvent plongés au centre du courant de flammes. Il fond peu à peu en gouttelettes en même temps que sa surface s'oxyde. Lorsque la fusion est terminée, tout le métal se trouve rassemblé dans le bassin formé par la sole et recouvert d'une croûte de scories produites par l'oxydation. En brassant ces scories avec le métal fondu, elles réagissent sur les différents corps qui s'y trouvent; les éléments les plus oxydables s'emparent de l'oxygène des scories et finalement on obtient une scorie où se trouve toujours une forte proportion du métal principal et où se sont concentrés tous les éléments qui étaient plus oxydables que lui.

Tel est le procédé par lequel on affine depuis longtemps par

exemple le plomb et le cuivre ; le fer, le zinc, l'arsenic, le soufre qui peuvent s'y trouver passent en entier dans la scorie, ou se volatilisent et s'échappent en fumées.

L'affinage du cuivre se termine souvent par une sorte d'éruption due au départ du soufre sous forme d'acide sulfureux.

L'affinage du plomb commence par une période dans laquelle se dégagent des fumées plus ou moins épaisses dues à la volatilisation de l'antimoine et de l'arsenic. On laisse le plomb fondu reposer dans le four jusqu'à ce que ces fumées se soient dissipées. C'est alors seulement qu'on pousse un peu plus loin la température pour produire une oxydation plus rapide et scorifier les autres métaux. L'affinage des plombs impurs peut durer plusieurs jours.

Raffinage. — On comprend que, dans des réactions qui portent sur de grandes masses, il soit difficile de ne pas dépasser le but. On n'arrive à scorifier les corps étrangers qu'à condition d'oxyder une certaine partie du métal. Or cet oxyde a la propriété de rester dissous ou disséminé dans le métal, dont il diminue la résistance et la malléabilité. C'est ainsi que, dans l'affinage du cuivre, on obtient ce qu'on appelle le *cuivre rosette*, c'est-à-dire un cuivre dont la cassure est rendue très rouge par la présence de paillettes de sous-oxyde. Il faut corriger ce défaut, et l'opération comporte en général une seconde phase dans laquelle on revient en arrière. Après avoir enlevé les scories, on fait agir sur le métal un agent réducteur afin de lui enlever l'excès d'oxygène dont il s'est emparé. C'est ce qu'on appelle spécialement le *raffinage*.

Pour les métaux facilement réductibles, comme le cuivre, le raffinage peut se faire par le charbon. On pratique ce que l'on appelle le *perchage*, c'est-à-dire que l'on brasse le bain avec deux longues perches de bois. Ce bois s'enflamme, il dégage à l'intérieur du métal en fusion des hydrocarbures gazeux qui produisent une sorte d'ébullition et qui réduisent les oxydes. Au besoin, on aide l'action du perchage en projetant sur le bain du charbon pur en poudre.

Réactifs spéciaux pour le raffinage. — On emploie aujourd'hui souvent des agents réducteurs spéciaux dont l'énergie est plus grande, et l'usage de ces réactifs a été un des principaux progrès de la métallurgie, au point de vue de la qualité et de la variété des produits qu'ils permettent d'obtenir. Ce sont des éléments solides tels que le silicium ou le phosphore, ou encore des métaux tels que le sodium, le magnésium, le manganèse, l'aluminium, que l'on ajoute au bain sous forme d'alliage. Ils forment des oxydes solides qui passent dans la scorie.

Ainsi le bronze phosphoreux est un bronze que l'on a raffiné en ajoutant à la fin de la fusion un alliage de phosphure de cuivre. Cet alliage fond peu à peu et se mélange très intimement au cuivre; le phosphore réagit sur l'oxyde qui était dissous dans le bain et forme de l'acide phosphorique qui se dissout facilement dans la scorie. On peut doser l'addition de phosphure de manière que le phosphore s'élimine complètement sous cette forme; on peut aussi en ajouter un petit excès, quelques millièmes, dont la présence augmente la résistance du bronze. Le cuivre siliceux, qu'on emploie beaucoup pour les fils téléphoniques, par exemple, n'est autre chose que du cuivre presque rigoureusement pur, qu'on a affiné par l'addition d'un alliage de siliciure de cuivre. Le silicium, très oxydable, s'élimine complètement et passe tout entier dans la scorie; il réduit parfaitement l'oxyde de cuivre, dont la présence nuirait beaucoup à la conductibilité électrique.

L'aluminium, le magnésium et les métaux alcalins sont des agents réducteurs encore plus énergiques. Lorsqu'il s'agit de produire des métaux absolument purs, le sodium, qui est le plus coûteux de ces réactifs, offre l'avantage de s'éliminer très facilement par volatilisation et de donner un oxyde fusible qui se sépare très bien du métal en passant dans la scorie.

L'aluminium, d'un emploi plus pratique, s'élimine moins bien; mais dans beaucoup de cas sa présence dans le métal peut donner des alliages intéressants: les laitons et les bronzes à l'aluminium ont des résistances remarquables.

L'emploi des réducteurs solides permet seul de bien raffiner les métaux dont les oxydes sont assez stables, comme le fer, le nickel ; leurs oxydes ne seraient pas complètement réduits par le charbon ; ainsi il n'y a que peu d'années que l'on est parvenu à couler le nickel pur en lingots bien sains, en y ajoutant un peu de magnésium.

Les procédés que nous venons de décrire constituent le type de l'*affinage oxydant*. Ils comportent plusieurs variantes. Nous verrons plus tard comment ils s'appliquent au fer et à l'acier.

Affinage à la vapeur. — Dans quelques cas particuliers on peut employer comme agent oxydant la vapeur d'eau. Certains métaux, comme le fer, le zinc, décomposent la vapeur d'eau au rouge. On se sert de cette réaction, par exemple, pour affiner le plomb zingué. On fait passer à travers une chaudière pleine de plomb fondu, de la vapeur d'eau sous pression ; cette vapeur n'a aucune action sur le plomb, elle attaque rapidement le zinc, dont l'oxyde léger est projeté par la vapeur contre le dôme de la chaudière.

Liquation. — La liquation peut intervenir parfois comme moyen de séparation physique entre des métaux dont les propriétés chimiques seraient trop peu différentes. Si l'on fond du zinc ferreux et qu'on le maintienne liquide à basse température, le fer forme des alliages beaucoup moins fusibles, qui surnagent en croûtes. On affine à peu près de la même manière l'étain ferreux. Lorsque le zinc contient du plomb, ce métal, beaucoup plus dense, se rassemble au fond du bain. Avec des lingotières de forme convenable, on peut couler le zinc en plaques portant au-dessous des saillies où se concentre le plomb ; on casse ces saillies après refroidissement.

DÉSARGENTATION DU PLOMB

L'affinage a parfois pour but de recueillir certains corps étrangers utilisables; tel est le cas spécialement pour le plomb

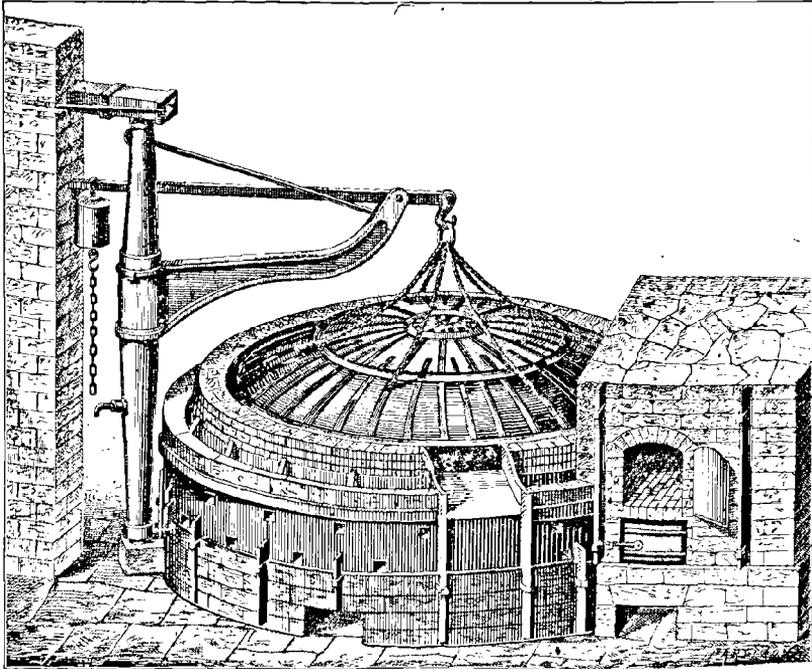


FIG. 53. — Four de coupellation allemand,

argentifère. L'argent, quoique en proportion très faible, est ici le produit principal, et l'opération a pour but d'isoler l'argent beaucoup plus que d'épurer le plomb. C'est ce qu'on appelle la *cupellation*.

Coupeellation. — Le plomb est fondu en grandes masses dans des fours circulaires couverts d'une voûte mobile. On active son oxydation en injectant de l'air soufflé ; on le transforme ainsi complètement en litharge, qui fond et que l'on fait écouler au fur et à mesure du four.

La sole est faite en chaux ou en ciment, car les briques seraient rapidement attaquées par la litharge. La chaux, au contraire, absorbe la litharge sans se fondre et forme des fonds de coupelle qui s'imprègnent peu à peu de plomb et qu'on refondra plus tard comme des minerais.

Lorsque presque tout le plomb est oxydé, il ne reste plus au milieu du four qu'une petite quantité de métal ; les dernières litharges s'absorbent dans la coupelle, et, au moment où la pellicule oxydée qui recouvrait la surface du bain se déchire, l'argent, qui ne s'attaque pas, apparaît avec un éclat éblouissant ; c'est ce qu'on appelle *l'éclair*, qui marque la fin de l'opération.

Les litharges peuvent être utilisées telles quelles, l'oxyde de plomb ayant différents emplois, notamment la fabrication du minium ou de la céruse. On peut aussi les refondre dans un four à manche et l'on obtient ainsi du plomb désargenté ; comme la plupart des impuretés s'oxydent d'abord et se concentrent dans les premières litharges produites, celles qu'on recueille dans la suite des opérations donnent par réduction du plomb pur. Le traitement a donc abouti à la séparation de l'argent et à l'affinage du plomb.

La coupeellation se fait souvent maintenant dans les fours anglais, qui sont beaucoup plus petits et où l'on rajoute du plomb fondu à côté dans une chaudière au fur à mesure que le bain diminue en s'oxydant. La sole de ces fours est mobile et porte sur un petit chariot qui permet de l'enlever pour la réparer. Ils consomment moins de combustible que les grands fours du type allemand.

Zingage. — La coupellation des plombs pauvres en argent est très longue et cause des pertes assez sensibles. Aujourd'hui, avant de coupeller le plomb, on commence par l'enrichir par un procédé tout spécial. On ajoute au plomb fondu dans une chaudière une certaine quantité de zinc avec lequel on le brasse. Il se forme un alliage ternaire de plomb, de zinc et d'argent qui surnage en croûte solide et où passe la totalité du métal précieux.

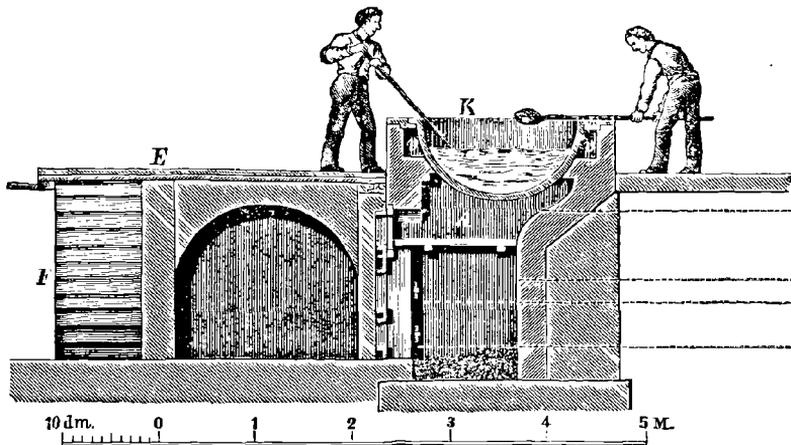


FIG. 54. — Cuve de zingage.

Tout le reste du plomb, demeuré liquide, se trouve désargenté. On écume les croûtes d'alliage; on les chauffe dans des cornues pour faire distiller le zinc, qu'on recueille, et il reste dans la cornue un alliage très riche de plomb et d'argent, qu'on coupelle. Cette dernière opération ne s'applique ainsi qu'à une très faible partie de la masse totale du plomb à traiter.

Grâce à ce procédé, les frais de traitement d'une tonne de plomb se réduisent à 20 ou 30 francs, tandis que la coupellation directe en coûtait 50 à 60.

AFFINAGE DES MÉTAUX PRÉCIEUX

L'affinage des métaux précieux a pour but de séparer l'or de l'argent avec lequel il est presque toujours allié. On lui donne souvent le nom de *départ*. Il se fait par des procédés chimiques.

On dissout l'argent dans des acides qui n'attaquent pas l'or; aujourd'hui c'est presque toujours l'acide sulfurique que l'on emploie. L'alliage grenailé est attaqué dans une chaudière en plomb par l'acide sulfurique chaud. Il se forme du sulfate d'argent et l'or reste en poudre. On fait ensuite passer la liqueur dans des bassines où l'on précipite l'argent par des grenailles de cuivre. Le dépôt d'argent est recueilli, séché et fondu au creuset.

Un autre procédé qui est employé dans certains cas consiste à faire passer du chlore gazeux à travers l'or fondu dans un creuset. L'argent se transforme en chlorure fusible, qui surnage. L'or n'est pas attaqué par le chlore à cette température où son chlorure est décomposable.

AFFINAGE ÉLECTRIQUE

L'industrie s'est enrichie depuis quelque temps d'une méthode d'affinage toute nouvelle, qui est l'électrolyse.

Principes de l'électrolyse. — On sait que, quand on fait passer un courant électrique au travers d'une dissolution d'un sel métallique, le métal se dépose au pôle négatif; on emploie depuis longtemps cette méthode pour produire les dépôts galvanoplastiques. En suspendant dans une solution de sulfate de cuivre une plaque de même métal, en face de laquelle on plonge les objets à cuivrer, le courant entre par la plaque de cuivre et sort de l'autre côté. Le métal est entraîné dans le même sens et va se déposer sur les objets qui servent de pôle négatif. La plaque par laquelle entre le courant se dissout peu à peu, à mesure que la décomposition du

sulfate de cuivre met de l'acide sulfurique en liberté. Le liquide ne sert donc que de véhicule et se régénère sans cesse; le courant n'effectue que le transport du métal d'un pôle à l'autre.

Ce transport des métaux par le courant présente cette particularité intéressante qu'il peut être accompagné d'une sorte de sélection: le courant décompose plus ou moins facilement les sels

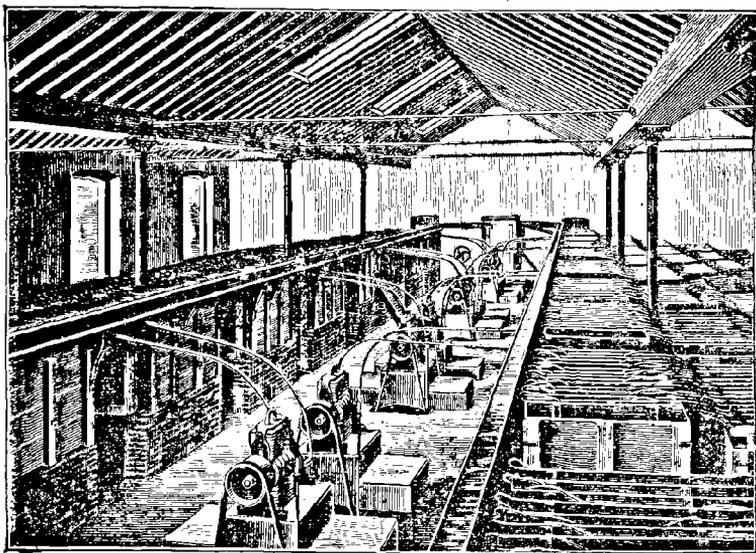


FIG. 55. — Atelier d'affinage du cuivre.

des divers métaux et, pour déposer un métal déterminé, il faut donner au courant une certaine force qui n'est pas la même pour tous. On exprime cette loi en disant que les métaux sont plus ou moins électro-positifs, c'est-à-dire ont plus ou moins de tendance à se porter au pôle négatif. Un courant d'une force limitée pourra déposer un certain nombre de métaux, mais ceux qui seront moins électro-positifs resteront dans la liqueur.

Affinage du cuivre. — Si, au lieu d'opérer, comme dans la galvanoplastie, avec une plaque de cuivre pur, on forme le courant positif avec une plaque de cuivre impur, presque tous les corps étrangers ne se déposeront pas ; les uns, comme le fer, le zinc, l'arsenic, se dissoudront dans la liqueur, mais le courant n'aura pas

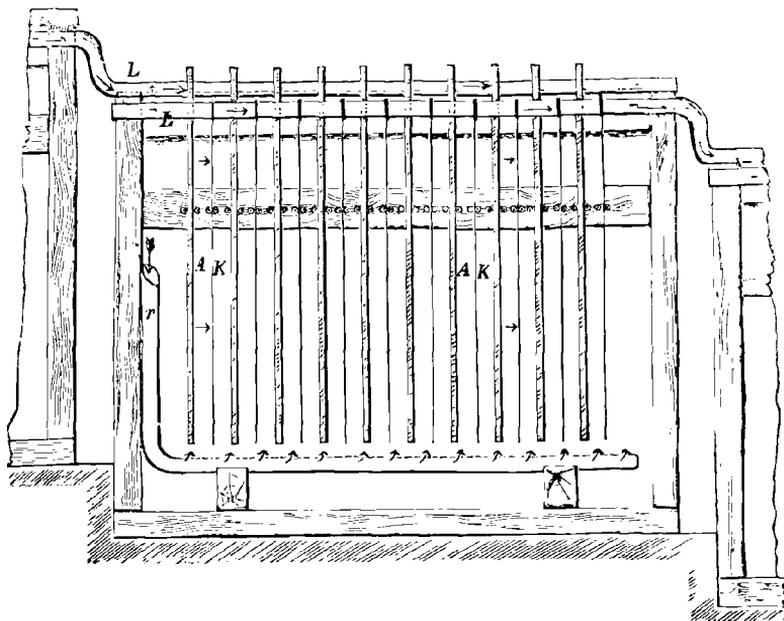


FIG. 56. — Bac pour l'affinage du cuivre.

A, Anodes ; K, cathodes ; L, conducteurs. — Le courant arrive par le conducteur positif + et sort par le conducteur négatif — après avoir traversé le liquide entre l'anode et la cathode. r, tuyau servant à la distribution du liquide qui est siphonné d'un bac dans l'autre.

assez de force pour décomposer leurs sels ; les autres, comme l'or, le plomb, l'argent, sont insolubles dans l'acide sulfurique étendu, ils tomberont en boue à mesure que la plaque de cuivre s'attaque par l'acide et se dissout. Ce dernier métal sera donc seul transporté par le courant et déposé au pôle négatif.

Pour réaliser cet affinage, on emploie de grands bacs en bois

doublés de plomb, où l'on suspend une série de plaques métalliques; les unes sont faites de cuivre brut fondu, elles sont accrochées à une longue barre de cuivre qui communique avec le pôle positif: ce sont les *anodes*; les autres, qui alternent avec les premières, sont des feuilles minces de cuivre pur, la barre qui les supporte communique avec le pôle négatif: ce sont les *cathodes*.

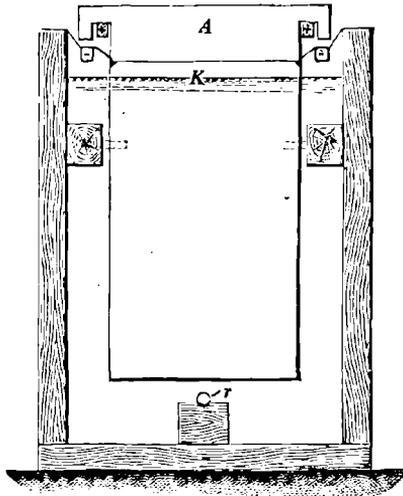


FIG. 57. — Bac pour l'affinage du cuivre.

Le bac contient ainsi un grand nombre de couples à travers lesquelles le courant passe en même temps. Les cathodes se nourrissent peu à peu par un dépôt de cuivre pur. Les boues contenant les métaux précieux et inattaquables tombent au-dessous des anodes où on les recueille de temps en temps. Le liquide s'enrichit en fer ou autres impuretés solubles, et on doit le changer à certains intervalles.

La dépense de force motrice est de 2 à 3 chevaux-heure pour 1 kilogramme de cuivre. L'ensemble des frais, qu'on estimait autrefois à 200 francs par tonne, ne dépasse plus 50 à 100 francs.

Ce procédé d'affinage est employé aujourd'hui sur une grande échelle, surtout en Amérique, où il y a des usines considérables qui livrent le cuivre électrolytique à un prix à peine supérieur à celui du cuivre raffiné par les procédés ordinaires.

Ce cuivre est plus pur et convient spécialement pour les applications à l'électricité, à cause de sa grande conductibilité. Ce procédé a l'avantage en même temps, de donner des boues où passent l'or et l'argent que l'on peut envoyer à la coupellation. Il permet d'extraire ces métaux de cuivres qui n'en contiennent que fort peu et d'utiliser ainsi des éléments qui autrefois étaient perdus. Leur valeur suffit souvent à couvrir et au delà la dépense de l'opération.

Procédés Ellmore. — L'électrolyse du cuivre peut être dirigée de manière à obtenir des dépôts solides ; elle constitue alors non seulement un moyen d'affinage, mais un procédé de travail pour mettre le métal sous une forme déterminée. C'est ce que l'on fait en France, à l'usine de Dives, où ont été appliqués et perfectionnés les procédés Ellmore. On dépose le cuivre sous forme de tuyau sur des mandrins en acier. Pour que le dépôt ait une cohésion suffisante, on le comprime d'une manière presque continue à mesure qu'il se forme ; un manchon en agate, pressé par des ressorts, vient frotter sans cesse tout le long du mandrin. C'est ce système très ingénieux de compression qui constitue l'originalité du procédé Ellmore. Il permet d'obtenir des tuyaux qui offrent une résistance supérieure à tout autre procédé et, comme ce cuivre est très pur, il est aussi d'une malléabilité remarquable. On peut le travailler indéfiniment sans qu'il s'écrouisse et devienne aigre, comme le font les cuivres ordinaires.

Autres applications de l'électrolyse. — On a essayé de transformer l'électrolyse du cuivre en un procédé d'extraction. Théoriquement le courant devrait donner du cuivre pur, même en faisant les anodes avec des composés de ce métal, par exemple, avec les

mattes ou sulfures doubles de cuivre et de fer; on pourrait même déposer le cuivre après avoir dissous les minerais par un acide, mais les nombreuses tentatives industrielles faites dans cette voie ont échoué. L'opération ne marche régulièrement que quand l'anode est faite avec du cuivre déjà assez pur, sans quoi les liqueurs s'altèrent rapidement, les anodes se désagrègent, les conditions de passage du courant se trouvent modifiées et la marche du phénomène est rapidement troublée.

On a essayé aussi d'appliquer l'affinage électrolytique à d'autres métaux, tels que le zinc et le plomb. Mais avec le zinc il est très difficile d'obtenir des dépôts cohérents, l'électrolyse exige plus de force et est plus coûteuse (1). Pour le plomb, elle ne présente pas d'avantages pratiques sur les procédés ordinaires.

En dehors du cuivre, l'électrolyse n'est guère appliquée qu'à certains alliages d'or et d'argent. Ces alliages sont électrolysés en présence d'une dissolution d'azotate d'argent; l'argent seul se dissout et se dépose, l'or reste en boue à l'anode.

(1) L'électrolyse du zinc commence à être appliquée soit comme moyen de galvanisation pour recouvrir de zinc les tôles et les tuyaux en fer, soit comme moyen d'affinage pour obtenir un zinc extra pur, en vue de la fabrication des laitons supérieurs.

CHAPITRE VII

EXTRACTION DES MÉTAUX RARES OU RÉFRACTAIRES

Métaux alcalins : procédés chimiques; procédés électrolytiques. — Métaux réfractaires : réduction au four électrique.

MÉTAUX ALCALINS

Il y a toute une classe de métaux qui échappent aux procédés ordinaires de la métallurgie. Ce sont ceux que les chimistes rangent dans les premières sections et qui sont caractérisés par leur grande affinité pour l'oxygène, c'est-à-dire les métaux alcalins, comme le potassium, le sodium; les métaux alcalino-terreux, comme le magnésium, le calcium, et les métaux terreux, comme l'aluminium.

Gisements. — Ces métaux forment la base essentielle de la plupart des roches terrestres. Ils s'y trouvent sous forme d'oxydes combinés avec la silice, comme l'alumine dans les argiles, avec l'acide carbonique, comme la chaux dans les calcaires. Ils se trouvent donc dans le sol en quantités beaucoup plus abondantes que les métaux usuels, mais ils n'ont encore reçu que peu d'applications, et au point de vue industriel on peut les considérer comme des métaux rares.

La même cause qui explique leur grande diffusion les rend très difficiles à extraire.

D'après les indications que nous donne la géologie pour reconstituer l'histoire de la terre, le sol qui nous porte peut être considéré comme une immense croûte de scories enveloppant une sphère métallique incandescente. Pendant la formation de cette scorie qui s'est épaissie par un refroidissement progressif, les

métaux les plus légers et les plus oxydables se sont scorifiés les premiers et sont venus se rassembler à la surface ; mais aussi leurs oxydes sont plus difficiles à décomposer que tous les autres et on est même arrivé presque jusqu'à ce siècle en ignorant leur véritable nature et sans se douter que les terres les plus communes renfermaient de véritables métaux.

PROCÉDÉS CHIMIQUES

Réduction des oxydes alcalins. — La réduction de ces oxydes par le charbon n'est pas, à proprement parler, impossible, comme on l'a dit souvent, mais il est très difficile d'en recueillir les produits. Il se passe un phénomène analogue à celui qui donne lieu à la formation des cadmies dans les hauts fourneaux. Dans les hauts fourneaux, le zinc se réduit, mais il se réoxyde presque immédiatement et va se déposer en poussière blanche au gueulard ; de même, quand on chauffe un alcali avec le charbon, il y a commencement de réduction, mais le métal à peine libre peut se réoxyder au contact de l'air, de l'acide carbonique ou de la vapeur d'eau. La réoxydation est si rapide qu'on n'arrive pas à l'éviter. On peut donc dire que la réduction n'est que momentanée : elle se fait, mais se défait tout de suite.

Pour recueillir du métal, il faut pouvoir le mettre immédiatement à l'abri de toute action oxydante. Il ne faut pas qu'il reste dans le four au contact des scories. Les métaux alcalins, comme le potassium et le sodium, sont les premiers qu'on soit arrivé à isoler, bien qu'ils dussent être, au point de vue de l'affinité chimique, les plus difficiles à réduire. Cela tient à ce qu'ils sont volatils et que leurs vapeurs peuvent être recueillies rapidement à l'abri de l'air.

Distillation du sodium. — Depuis longtemps on le préparait en petite quantité par les procédés de Sainte-Claire Deville, en chauffant les carbonates alcalins mélangés de charbon dans une

cornue. Cette cornue est munie d'une allonge en fer aplatie, par laquelle les vapeurs s'échappent sous forme de lames minces. Le métal se rassemble fondu au bas de ce récipient et coule immédiatement dans un réservoir, où il tombe sous une couche de pétrole (1).

Déplacement des métaux par le sodium. — Le sodium, par sa grande affinité pour l'oxygène et pour le chlore, a servi de réactif pour préparer les autres métaux non réductibles par le charbon ; ainsi on a obtenu le magnésium, l'aluminium en décomposant, à la température du rouge, les chlorures fondus de ces métaux par le sodium. Celui-ci se combine avec le chlore et prend la place du métal qu'on veut réduire, qui se sépare sous forme liquide au fond du bain.

Les oxydes devraient être aussi décomposables par le sodium, mais avec eux on n'arrive pas à obtenir couramment la réaction parce que l'oxyde est infusible : c'est pour cela qu'on est obligé de recourir au chlorure et de passer par une série d'opérations préalables pour préparer d'abord ce sel.

Ces procédés sont restés toujours très coûteux et la plupart des métaux de cette classe ne sont pas de véritables produits industriels. Leurs propriétés ne s'y prêtent pas du reste. Les métaux alcalins ne peuvent être conservés et maniés qu'à l'abri de l'air et ils n'ont d'intérêt que comme réactifs pour fabriquer certains produits chimiques. Le magnésium, qui est un peu moins altérable, s'emploie surtout parce qu'il brûle, quand on l'allume à l'air, avec une flamme éblouissante.

Aluminium. — L'aluminium, au contraire, a attiré rapidement l'attention parce qu'il se distingue des métaux précédents par sa résistance à l'altération ; il est comme eux très léger et néanmoins il possède les propriétés utiles des métaux usuels qui

(1) Le procédé et les appareils sont tout à fait analogues à ceux qui servent pour réduire les minerais de zinc.

sont trois fois plus lourds que lui ; aussi de grands efforts ont été faits pour rendre sa fabrication plus économique, et des résultats remarquables ont été obtenus. Le métal, qui coûtait plus de 100 francs le kilogramme, par les anciens procédés, peut se fabriquer aujourd'hui à moins de 4 francs. Il n'est pas beaucoup plus cher que n'était le cuivre il y a vingt ans. Il serait même moins cher à volume égal.

C'est l'électricité qui a résolu ce problème ; c'est du reste en décomposant la potasse par le courant électrique que Davy avait le premier découvert les métaux alcalins au début de ce siècle ; mais l'électricité était alors un moyen dispendieux, confiné dans les laboratoires. Aujourd'hui le développement de toutes les industries électriques permet d'employer le courant comme un agent de décomposition relativement économique.

PROCÉDÉS ÉLECTRIQUES

Electrolyse par fusion ignée. — La méthode qui sert partout à la fabrication de l'aluminium est directement inspirée de l'expérience classique de Davy. C'est ce qu'on appelle l'électrolyse par fusion ignée. On fait passer un courant très puissant à travers un sel fusible. La chaleur développée par le courant porte la masse au rouge. Une fois que le sel est fondu, l'électricité le traverse assez facilement comme une matière conductrice et y produit des décompositions analogues à celles que l'on observe à froid dans des dissolutions métalliques et qui servent de base à la galvanoplastie. Le métal est mis en liberté et se porte au pôle négatif. Les autres éléments comme le chlore ou l'oxygène se dégagent au pôle positif.

Extraction de l'aluminium. — L'aluminium se prépare dans de grandes cuves en tôle garnies à l'intérieur d'un revêtement en charbon. Le courant arrive par de gros cylindres en charbon qui plongent dans la cuve. Après avoir traversé la couche de sel

fondu, il sort par la base même de la cuve qui est reliée avec le pôle négatif.

C'est donc le fond de l'appareil qui sert de *cathode*. On charge

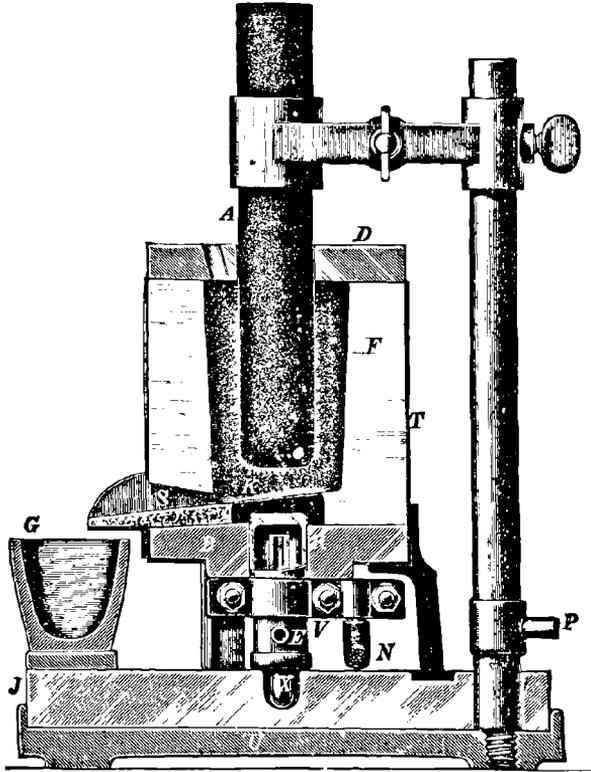


FIG. 58. — Four pour aluminium.

dans ces fours du fluorure double d'aluminium et de sodium (cryolithe), mélangé avec du sel marin pour le rendre plus fusible. Une fois que le bain est échauffé et fondu, la décomposition commence; l'aluminium libre se rassemble en couche liquide au fond de la cuve, d'où on peut l'extraire de temps en temps par un trou de

coulée; le fluor, le chlore se dégagent autour du cylindre de charbon qui sert d'*anode*. Pour entretenir le bain, il n'y a qu'à charger de temps en temps autour de ce cylindre de l'alumine pure avec peu de cryolithe. Cette alumine est attaquée par le fluor et se dissout dans le bain; celui-ci ne sert donc que de véhicule, il se régénère à mesure qu'il se décompose. Toutefois, il y a toujours une perte de fluor et l'on est obligé d'ajouter avec l'alumine une certaine quantité de fluor.

Dans ce mode de production, les dépenses principales sont la force motrice nécessaire pour obtenir le courant et la fabrication de l'alumine pure. L'alumine est très abondante dans la nature, et ses composés ne coûtent presque rien. Elle forme en proportion plus ou moins grande l'un des éléments constitutifs des argiles mais elle s'y trouve toujours avec de la silice, de l'oxyde de fer, et comme tous ces éléments seraient réduits par le courant électrique, on n'obtiendrait que de l'aluminium très impur.

On ne connaît aucun moyen de raffiner ce métal, parce qu'il est plus attaqué par n'importe quel réactif que les corps qui peuvent se trouver alliés avec lui. On est donc obligé de soumettre d'abord le minerai à des préparations chimiques, pour en extraire l'alumine à l'état de pureté. Ce produit coûte encore aujourd'hui plus de 30 centimes le kilogramme, et l'on en consomme environ 2^{gr},500 par kilogramme d'aluminium.

Comme force motrice, il faut environ 50 chevaux-heure pour réduire 1 kilogramme de métal, c'est-à-dire que, pour produire 1 tonne par jour, il faudra disposer d'une puissance totale de 2000 chevaux. Les quelques usines existantes sont établies près de grandes chutes d'eau; la plus importante d'Europe se trouve en Suisse auprès de la chute du Rhin; il y en a deux en Savoie. Aux États-Unis, cette fabrication a été installée aux chutes du Niagara.

Propriétés de l'aluminium. — Malgré le prix relativement modéré auquel il est descendu, l'aluminium n'a pas encore trouvé

autant d'emploi industriel qu'on l'espérait. C'est que sa résistance à l'altération n'est qu'apparente. L'aluminium, sous l'influence de l'air, se recouvre d'une pellicule oxydée extrêmement mince qui ternit à peine son éclat et qui le protège contre une altération ultérieure, de sorte qu'on peut en conserver des échantillons indéfiniment sans altération visible; mais dans la pratique, sous l'influence de l'air humide, l'aluminium industriel qui n'est pas rigoureusement pur se pique peu à peu et parfois se détruit rapidement.

Ce phénomène se produit même sous les enduits dont on cherche à le recouvrir; ce métal ne pourra rendre des services durables dans bien des cas que lorsqu'on aura trouvé moyen de protéger sa surface soit par des dépôts métalliques assez adhérents, soit par une peinture solide.

On peut préparer les métaux alcalins en électrolysant leurs chlorures fondus par des procédés calqués sur la fabrication de l'aluminium; seulement leur légèreté les rend plus difficiles à recueillir lorsqu'ils ne se rassemblent pas au fond du bain et, jusqu'à présent, leur production industrielle n'offre pas un grand intérêt, parce qu'on n'en consomme que des quantités insignifiantes.

RÉDUCTION AU FOUR ÉLECTRIQUE : MÉTAUX RÉFRACTAIRES

Effets de l'arc voltaïque. — Il existe un autre procédé électrique d'extraction des métaux, qui est susceptible d'une application générale à tous les oxydes. On sait que, quand on fait passer un courant puissant entre deux charbons séparés par un petit intervalle, l'électricité traverse cet espace en produisant une flamme éblouissante; c'est ce que l'on appelle l'*arc voltaïque*. La température qui s'y développe dépasse de beaucoup celle de tous les fourneaux industriels; on l'évalue à plus de 3000 degrés. A cette température formidable, tous les oxydes deviennent réductibles par le charbon; en outre, tous les corps deviennent fusibles.

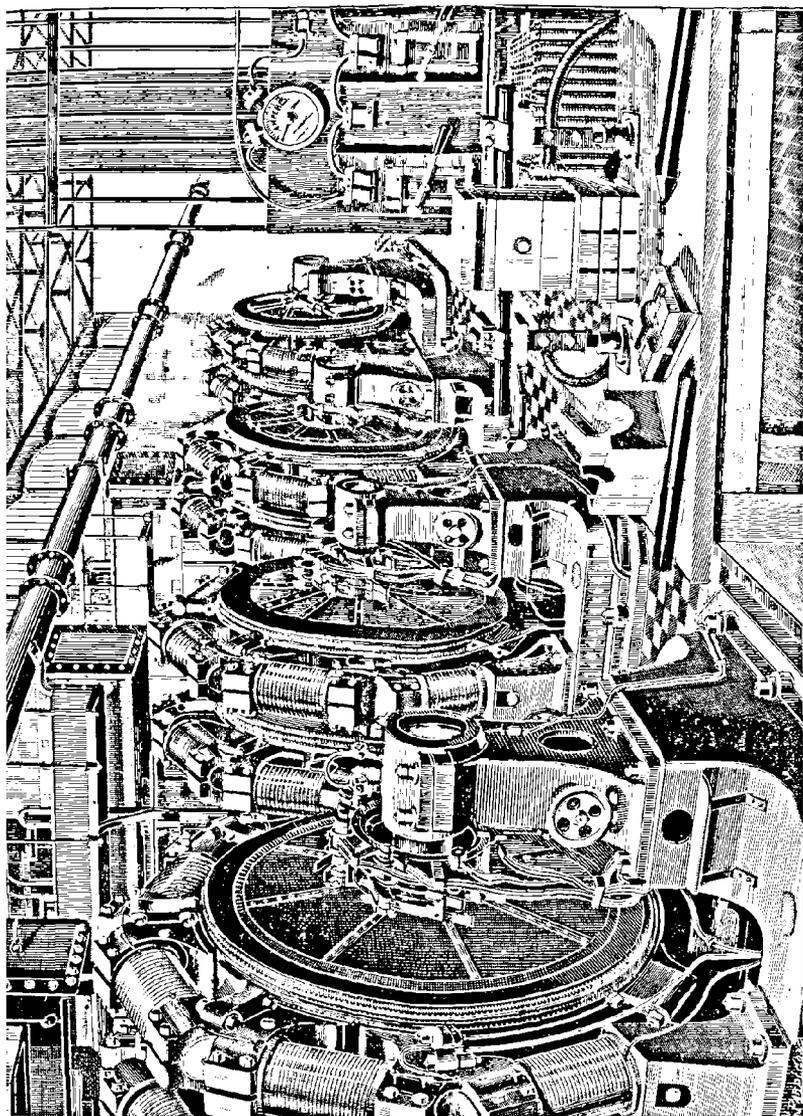


FIG. 59. — Four ayant servi aux essais de M. Moissan.

On voit, à droite, un four en travail; un autre, démonté, avec les électrodes à côté; à gauche, les dynamos qui fournissent le courant. On remarquera la grandeur des machines par rapport au four. Ici les machines remplacent les foyers des fours ordinaires. Toute l'énergie produite par l'appareil mécanique vient aboutir dans un espace très petit, où elle se transforme en chaleur. On comprend que la température locale qui s'y développe soit très considérable.

Ce procédé est précieux surtout pour obtenir les métaux très réfractaires dont les oxydes sont à la fois infusibles et difficiles à réduire.

Extraction des métaux réfractaires. — Il existe un grand nombre de métaux curieux, comme le tungstène, le molybdène, le vanadium, l'urane, le titane, qui étaient à peu près inconnus; non seulement leurs oxydes sont indécomposables, mais ces métaux sont infusibles aux températures ordinaires et l'on n'était arrivé à les obtenir qu'en poudres très impures. M. Moissan a pu les isoler et les fondre dans le four électrique, et faire ainsi une série de découvertes qui constituent le plus grand progrès réalisé depuis longtemps par la chimie des métaux.

L'appareil qu'il emploie est très simple. Il se compose de deux cylindres de charbon horizontaux que l'on peut rapprocher plus ou moins, et qui viennent se placer l'un en face de l'autre dans une espèce de boîte en cœur, faite de deux moitiés superposables. Cette matière est la seule qui ne fonde pas complètement sous l'influence de la chaleur développée à l'intérieur du four.

On place l'oxyde mélangé de charbon en poudre dans une sorte de coupelle, juste sous l'arc voltaïque qu'on fait jaillir entre les deux charbons, et, quand la matière est fondue, on la verse rapidement dans une lingotière.

On a imaginé un grand nombre de fours électriques pour faire ces opérations sur des masses un peu plus considérables et dans des conditions moins coûteuses. Jusqu'à présent ces procédés nouveaux n'ont pas eu de conséquences industrielles bien importantes. Le seul produit du four électrique qui ait aujourd'hui un intérêt commercial, sort du domaine de la métallurgie; c'est le carbure de calcium.

Fabrication du carbure de calcium. — En réduisant les oxydes par le four électrique, on obtient souvent le métal combiné au carbone. C'est ce qui arrive par exemple quand on traite la chaux;

on n'obtient pas le calcium pur, mais un carbure qui jouit de la propriété curieuse de se décomposer au contact de l'eau.

Le métal repasse à l'état de chaux en absorbant l'oxygène; ce carbone se combine à l'hydrogène en donnant un gaz, l'acétylène, beaucoup plus riche en carbone et beaucoup plus éclairant que le gaz ordinaire.

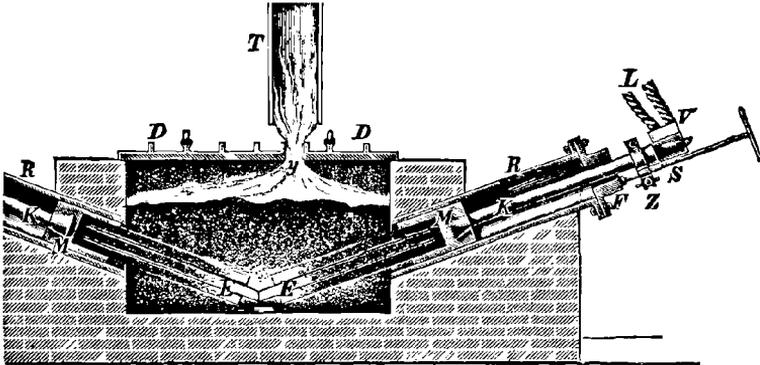


FIG. 60. — Four électrique Lowyser.

Ce four a servi aux premiers essais de fabrication électrique de l'aluminium. L'arc voltaïque jaillit entre les deux cylindres de charbon E, E, que l'on peut rapprocher à volonté.

On charge, dans le centre du four, un mélange d'alumine, de charbon et de grenaille de cuivre. L'aluminium se réduit et s'allie au cuivre fondu, en donnant un bronze d'aluminium. L'oxyde de carbone produit par la réduction vient brûler à la surface.

Emploi des métaux réfractaires. — En métallurgie, l'extraction au four électrique n'a de raison d'être que faute de mieux, quand on ne peut employer aucun des procédés ordinaires. Or les métaux réfractaires qui se trouvent dans ce cas sont très rares, leurs minerais sont presque des curiosités. Ils reviennent donc très cher, et malgré leurs propriétés intéressantes leur emploi est forcément très restreint. Jusqu'à présent on ne les utilise qu'en alliage avec le fer, et ces alliages, où ils n'entrent qu'en proportion très faible, peuvent être obtenus, comme nous le verrons, au haut fourneau. Cependant, si la préparation électrique devenait moins coûteuse, il pourrait être fort intéressant d'avoir quelques-uns de

ces métaux à l'état de pureté et non combinés avec le carbone comme dans les fontes préparées au haut fourneau. Leur emploi sous cette forme permettrait de fabriquer des alliages plus purs que ceux qu'on a étudiés jusqu'à présent, et qui présenteraient peut-être des propriétés utiles.

Un de ces métaux réfractaires pourrait avoir lui-même des applications importantes; c'est le tungstène, remarquable par sa grande densité; il est, à volume égal, le plus lourd de tous les métaux (sauf ceux de la famille du platine). Une balle en tungstène pèserait une fois et demie autant qu'une balle de plomb, ce qui lui donnerait une force de projection et de pénétration bien supérieure. Aussi a-t-il été plusieurs fois l'objet de recherches pratiques malgré la difficulté de le mouler; on se déciderait sans doute à l'essayer en grand, si l'on en connaissait des gisements assez productifs (1).

Avenir des procédés électriques. — Si les procédés électriques devenaient d'un emploi courant pour les métaux ordinaires, ils provoqueraient un déplacement général des centres métallurgiques. En effet, le principal agent dans ces réactions, c'est la force motrice, et toutes les fabriques d'aluminium se sont installées auprès de grandes chutes d'eau, afin d'utiliser les forces naturelles, c'est-à-dire qu'elles se trouvent dans les montagnes et souvent loin des grands districts industriels d'aujourd'hui. A ses débuts, la métallurgie s'était développée surtout dans les pays montagneux; c'est là, en effet, que se rencontraient le plus souvent les filons métallifères, on y trouvait le bois pour chauffer les fourneaux, les ruisseaux pour faire marcher les machines soufflantes primitives. Dans notre siècle tout a changé; lorsque la houille est devenue le combustible industriel par excellence, l'exploitation intensive des

(1) Le tungstène se rencontre surtout sous forme de wolfram, composé dur, à aspect métallique, qui est un tungstate de fer.

Dans un essai fait il y a quelques années, le tungstène pur préparé au four électrique est revenu à 5 francs le kilogramme, tandis que le plomb coûte 30 centimes.

grands gisements houillers permettait d'avoir les masses de charbon nécessaires pour alimenter de grandes usines, et la métallurgie est venue se grouper autour des bassins houillers, auxquels le progrès des moyens de transport permettait d'apporter de loin des minerais. Ce ne sont que les usines où l'on traite des métaux d'une certaine valeur, ou bien dans lesquelles la consommation de charbon est relativement faible, comme les usines à or, à plomb, qui sont restées souvent installées près des mines. Mais l'industrie du fer, celle du zinc ne sont possibles qu'avec les houilles à bon marché.

Aujourd'hui, l'électricité ne peut songer à lutter contre le charbon comme moyen de chauffage; elle n'est qu'un chauffage de luxe. Mais les choses pourront changer lorsqu'on aura épuisé les gisements de charbon fossile qu'on exploite aujourd'hui avec une activité fiévreuse; ces gisements représentent une sorte de réserve, que la terre avait amoncelée par la décomposition de matières végétales, pendant toute la suite des époques géologiques où elle était couverte de forêts et où les végétaux pourrissaient sur place sans être utilisés. Aujourd'hui, nous dévorons rapidement ce capital, et, à une époque plus ou moins éloignée, que l'on peut déjà entrevoir pour certaines parties de l'Europe, l'industrie n'aura plus pour s'alimenter d'autre combustible que celui qui se renouvelle annuellement par la croissance des végétaux. Comme il serait loin de suffire à nos besoins actuels, ce moment marquerait la décadence de la civilisation humaine, si l'on ne trouve pas d'autres ressources. Ces ressources, les forces naturelles hydrauliques peuvent les fournir, puisque l'électricité nous donne le moyen de transformer l'énergie mécanique en chaleur. On assistera alors à un nouvel exode de la métallurgie, qui sera obligée de remplacer tous ses fourneaux par des machines électriques, d'aller chercher la force motrice auprès des chutes d'eau et de revenir demander une nouvelle vie aux montagnes qui furent son berceau.

DEUXIÈME PARTIE

MÉTALLURGIE DU FER

CHAPITRE PREMIER

MINERAIS

Minerais de fer : procédés d'extraction. — Méthode indirecte. — Fabrication de la fonte au haut fourneau.

Le fer se rencontre dans presque toutes les roches et c'est son oxyde qui donne lieu aux colorations brunes ou rouges que présentent souvent les argiles ou les calcaires. Mais des traces de fer suffisent pour donner ces colorations ; la plupart des roches ordinaires en contiennent au plus de 2 ou 3 pour 100 et ne sauraient être considérées comme des minerais.

L'oxyde de fer se dépose spontanément au fond de certaines sources ferrugineuses. C'est probablement ce phénomène qui, dans les bassins des anciennes mers et des anciens lacs, a produit les amas d'oxyde qu'on rencontre dans certains terrains. L'oxyde se rencontre aussi cristallisé sous une autre forme, en filons dans les terrains anciens. Il forme des filons qui contiennent deux variétés de minerai : le fer oligiste ou sesquioxyde, et le fer magnétique qui contient relativement moins d'oxygène et qui est attirable à l'aimant. Ces différents minerais peuvent avoir des aspects très

variés. En masse ils sont souvent noirs ou ont un éclat métallique ; mais ils se reconnaissent facilement à la poussière rouge qu'ils donnent quand on les broie. Les minerais des formations les plus récentes ou ceux qui se trouvent à la surface des gîtes sont souvent hydratés, c'est-à-dire combinés avec une certaine proportion d'eau. Ils donnent alors une poussière jaune. L'ocre jaune n'est pas autre chose qu'un minerai pauvre de fer hydraté, qui par sa texture se prête à être délayé dans l'eau et à servir de couleur. L'ocre rouge, la terre de Sienne sont aussi des couleurs à base d'oxyde de fer.

PROCÉDÉS D'EXTRACTION

Méthode catalane ou directe. — Le fer est infusible, mais il forme facilement avec le carbone un composé qui, tout en ayant encore les propriétés d'un métal, est plus cassant et fond au rouge blanc ; c'est ce qu'on appelle la *fonte*. C'est sous cette forme qu'aujourd'hui on extrait presque toujours le fer de ses minerais.

Jusqu'au début de ce siècle l'industrie du fer était encore disséminée un peu partout où se trouvent des gisements exploitables. On traitait le minerai directement dans des bas foyers. Cette industrie était notamment très développée dans les Pyrénées, où elle a survécu assez longtemps, et les foyers de ce genre sont souvent désignés sous le nom de *forges catalanes*.

Les tuyères qui arrivent sur le bord du foyer étaient actionnées par des machines à eau : là où l'on avait des chutes assez élevées, on employait une soufflerie rudimentaire d'un système très simple et facilement installé. On construisait avec des tuyaux en bois des espèces de trompes, où l'eau, tombant en colonnes de 10 mètres de hauteur, entraîne l'air par frottement. En versant peu à peu le minerai sur le foyer rempli de charbon incandescent, le fer se réduit ; si l'on prolongeait l'opération jusqu'à la fin complète, il se formerait de la fonte ; mais, tant qu'il y a un excès d'oxyde suffisant, le carbone se combine à l'oxygène au lieu de s'allier au fer.

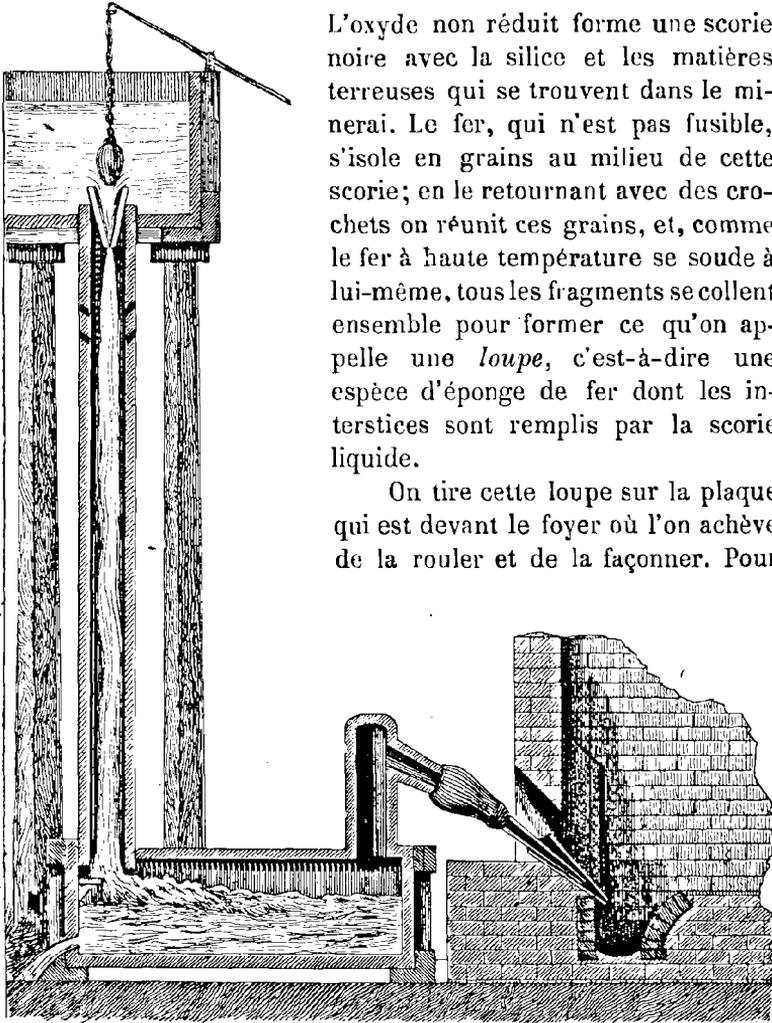


FIG. 61. — Forge catalane.

L'eau tombant du réservoir supérieur forme une veine étranglée ; à cet endroit, le tuyau en bois est percé d'orifices obliques par lesquels l'eau entre ; sous l'influence de la succion opérée par l'entraînement de l'eau, l'air est amené sous pression dans le réservoir inférieur, d'où l'eau s'échappe par le bas, et de là il se rend dans la tuyère du bas foyer.

L'oxyde non réduit forme une scorie noire avec la silice et les matières terreuses qui se trouvent dans le minerai. Le fer, qui n'est pas fusible, s'isole en grains au milieu de cette scorie ; en le retournant avec des crochets on réunit ces grains, et, comme le fer à haute température se soude à lui-même, tous les fragments se collent ensemble pour former ce qu'on appelle une *loupe*, c'est-à-dire une espèce d'éponge de fer dont les interstices sont remplis par la scorie liquide.

On tire cette loupe sur la plaque qui est devant le foyer où l'on achève de la rouler et de la façonner. Pour

la transformer en pièce de fer compact, il suffit de la marteler quand elle est encore très chaude. La scorie est expulsée comme l'eau d'une éponge qu'on presse.

On ne produit par cette méthode que des pièces de fer très petites. On ne peut traiter du reste que des minerais assez riches, puisqu'une partie notable du métal doit rester dans la scorie. C'est l'oxyde de fer qui perme. à cette scorie de fondre. Avec des minerais pauvres on obtiendrait des scories pâteuses où presque tout le métal resterait engagé.

Méthode indirecte. — En cherchant à économiser le charbon et à traiter des minerais moins riches, on a imaginé en Allemagne ce que l'on appelle *Stück-ofen*, qui est une espèce de four à cuve de petite hauteur où les minerais étaient chargés avec le charbon au sommet, où la température développée dans les foyers était plus élevée. On s'est aperçu alors que ce four, quand on pousse la température en le soufflant énergiquement, donnait de la fonte au lieu de fer.

Dès que la quantité de combustible est suffisante pour réduire la totalité du minerai, le carbone se combine au fer et détermine sa fusion. Sous cette forme, le métal se sépare bien mieux de la scorie et l'on peut obtenir son extraction à peu près complète; mais la fonte a alors besoin de subir une seconde opération, un affinage pour la transformer en fer pur. Cette méthode est désignée sous le nom d'*indirecte*.

Hauts fourneaux. — En agrandissant peu à peu le *Stück-ofen*, on est arrivé à construire des hauts fourneaux qui n'avaient d'abord que 6 à 8 mètres de haut et qui actuellement atteignent des hauteurs triples. Cet appareil permettant de développer des températures plus élevées, on a pu alors traiter tous les minerais.

Pendant longtemps la fabrication s'est faite au charbon de bois; les hauts fourneaux de petites dimensions et de production assez faible, donnant 5 à 10 tonnes par jour, étaient disséminés dans

chaque province. Ils traitaient presque exclusivement le minerai du pays en s'alimentant de combustible dans les forêts voisines. Dans ces conditions, chaque minerai, suivant les impuretés qu'il contenait, suivant la structure physique qui le faisait se comporter au feu d'une manière spéciale, donnait exclusivement certaine qualité de fonte, et l'on distinguait dans l'industrie les variétés de fer par le nom de leur provenance. En France, par exemple, suivant l'usage qu'on avait en vue, on prenait du fer de Champagne, ou du fer du Berri; ou du fer de Franche-Comté. Aujourd'hui on sait corriger les défauts du minerai et modifier l'allure du fourneau de manière à obtenir partout à volonté toutes les qualités de métal dont on a besoin.

L'emploi du coke est venu révolutionner et transformer complètement l'industrie de la fonte. C'est surtout en Angleterre, où les gisements de houille sont très abondants, que l'on a fait les premiers efforts pour utiliser ce combustible dans les hauts fourneaux.

La houille naturelle colle au feu et l'on ne pourrait la charger dans les hauts fourneaux, qu'elle obstruerait. On trouve cependant en Écosse des charbons que l'on peut employer directement au haut fourneau ; mais dans la plupart des bassins houillers le combustible doit être d'abord carbonisé de manière à le transformer en coke ; il a perdu alors les hydrocarbures fusibles auxquels il doit ses propriétés agglomérantes. Il se compose de carbone presque pur mélangé aux cendres du charbon primitif et il se comporte dans les hauts fourneaux à peu près comme le charbon de bois. Toutefois ses cendres sont beaucoup plus abondantes et moins fusibles, ce qui augmente beaucoup le volume des scories. De plus elles contiennent souvent du soufre, et ce corps en s'alliant au fer le rend cassant. On a donc rencontré de grandes difficultés au début pour faire marcher convenablement les hauts fourneaux avec ce nouveau combustible ; mais c'est en cherchant à les surmonter qu'on a été amené peu à peu à faire à cet appareil les modifications qui ont décuplé sa puissance. Ayant à fondre de plus

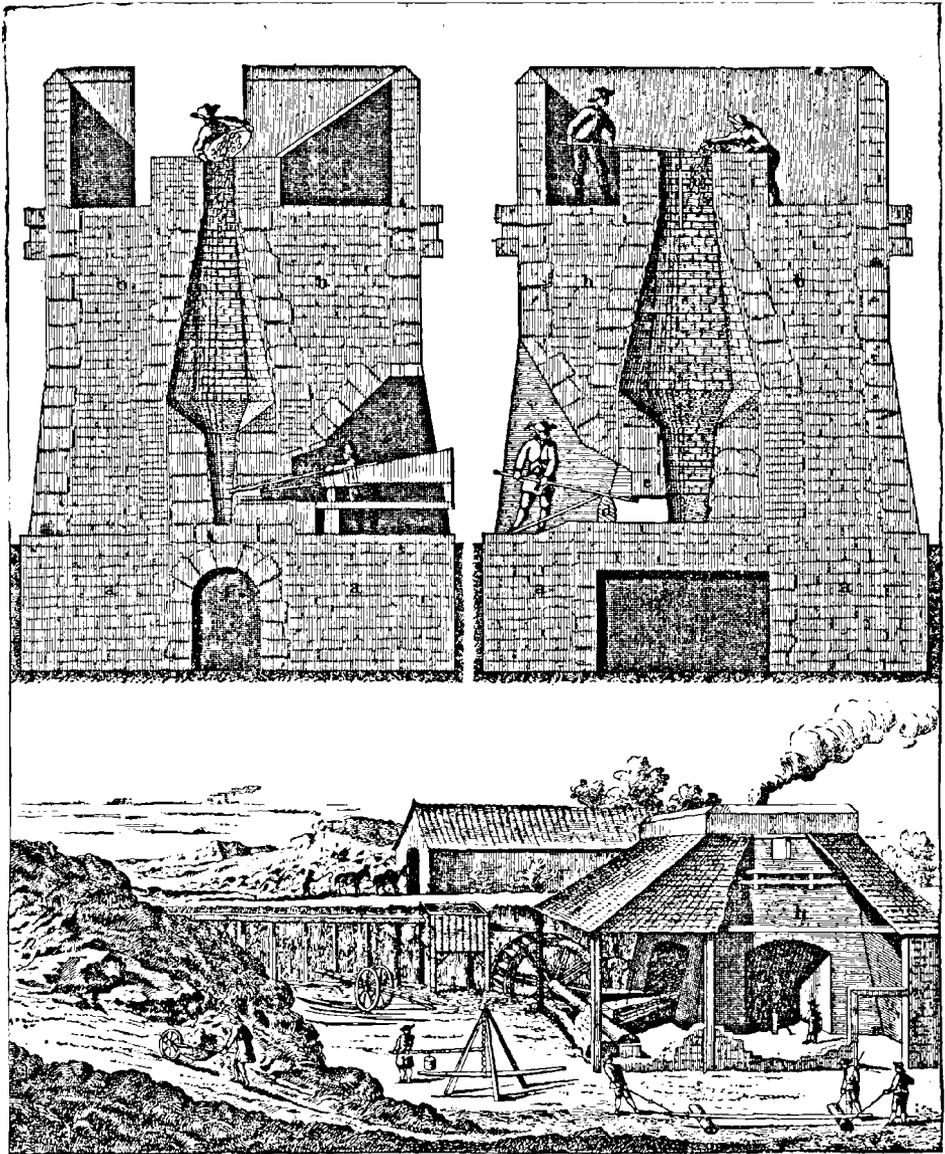


FIG. 62 et 63. — Haut fourneau ancien.

grandes masses de matières terreuses réfractaires, il a fallu réaliser

des températures plus hautes. On a augmenté progressivement le volume des fours et la pression des souffleries; puis on a eu l'idée de chauffer l'air injecté; après l'avoir chauffé d'abord à des températures modérées, dans des tuyaux en fonte, on a fini par construire d'immenses appareils en briques qui permettent de chauffer l'air à 700 ou 800 degrés.

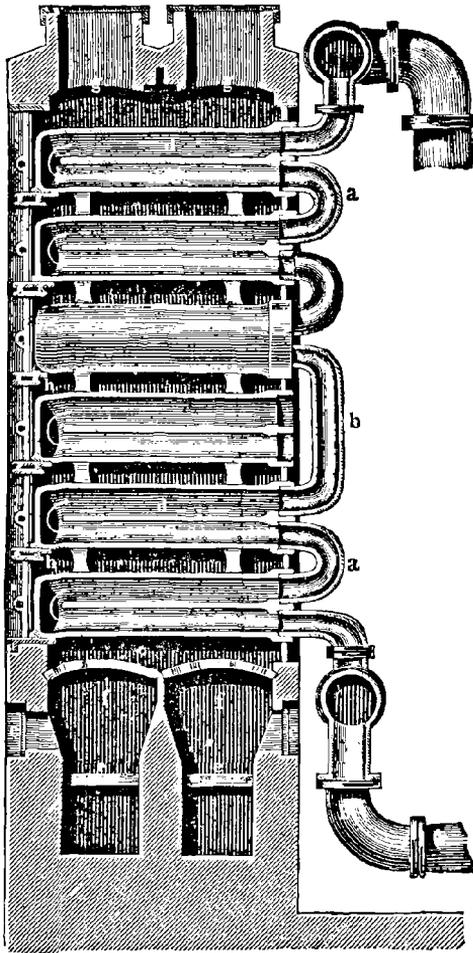


FIG. 64. — Appareil à air chaud en fonte.

En même temps que l'on réalisait ainsi des économies de combustible et qu'on arrivait à des productions beaucoup plus considérables, on apprenait peu à peu la chimie spéciale du haut fourneau; on arrivait à discipliner cet appareil qui faisait le désespoir des anciens métallurgistes par ses caprices et ses dérangements continuels. Ayant en main les moyens de fondre n'importe quels laitiers, on a pu fabriquer dès qualités de

fonte beaucoup plus variables. On a reconnu qu'en modifiant la composition du laitier, celui-ci exerçait sur le métal des réactions chimiques qui permettaient jusqu'à un certain point d'éliminer tel ou tel corps nuisible ou au contraire d'y faire passer certains corps étrangers nouveaux.

En même temps que l'industrie de la fonte acquérait un

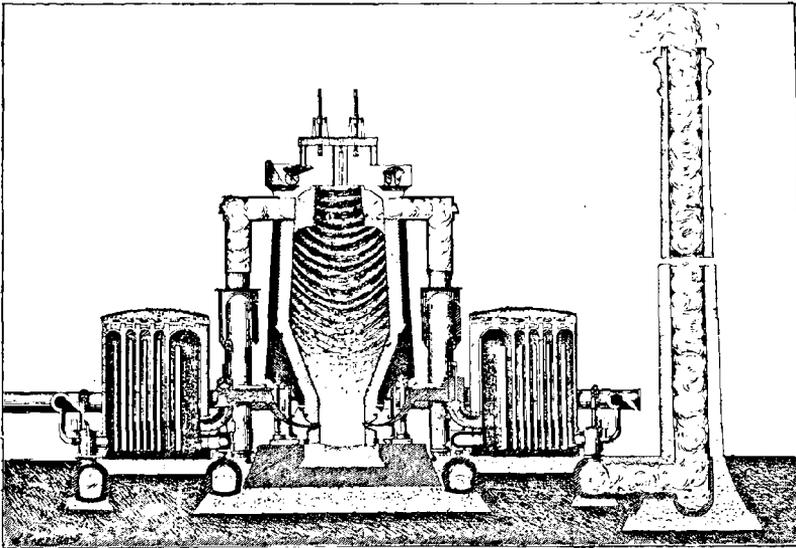


FIG. 65. — Haut fourneau entouré de ses appareils à air chaud en briques.

développement et une puissance considérables, elle entraînait ainsi dans une phase scientifique. Aux recettes locales que l'on se transmettait autrefois dans chaque usine sans se les expliquer, se sont substitués des principes généraux et raisonnés. Chaque haut fourneau maintenant est doublé d'un laboratoire où l'on analyse journallement les matières premières et les produits obtenus et où l'on dose d'une manière méthodique les charges, pour régler a priori l'allure de la fabrication.

Il a fallu de longs efforts pour arriver à ces résultats. Pendant longtemps le fer au coke a été décrié comme de qualité inférieure et les forges au bois de nos pays ont essayé de lutter contre l'invasion de cette industrie nouvelle qui menaçait leur existence ; mais la concurrence est devenue impossible. La fabrication au bois n'existe plus en Europe que dans certains pays reculés comme la Suède, la Russie, certaines provinces de l'Autriche, où on trouve encore de grandes forêts et où l'on produit avec des minerais très purs des fers spéciaux ; mais là même elle perd du terrain, et de grands hauts fourneaux au coke ont commencé à s'installer, ne laissant aux anciens appareils que le domaine restreint des fers de qualités supérieures.

Cette transformation a eu pour effet de déplacer l'industrie de la fonte et de concentrer sur un certain nombre de points favorisés les hauts fourneaux que l'on rencontrait autrefois presque partout. Il n'y a plus de place pour les petites usines, et les grandes ne peuvent s'établir qu'à condition d'avoir à la fois le minerai et le coke à bon marché ; ainsi en France la plus grande partie de la production de la fonte se fait dans le district de la Moselle, où l'on exploite au milieu des terrains secondaires des couches de minerai de fer régulières sur de grandes étendues. L'extraction y est si peu coûteuse qu'on peut avoir le minerai de fer à 3 francs la tonne amenée au gueulard du haut fourneau. Le coke arrive facilement des bassins houillers du Nord, de Belgique et du Luxembourg.

En dehors de ce bassin favorisé il existe des hauts fourneaux dans le Nord et sur quelques points des côtes de France, comme à Isbergue, sur la Manche, près de Saint-Nazaire, près de Bayonne. Ces usines peuvent s'alimenter facilement avec les minerais de Bilbao en Espagne et les charbons anglais qui arrivent par mer à très peu de frais. Dans le bassin houiller de Decazeville on traite des minerais qui se trouvent en filons dans les montagnes environnantes ou en couches au milieu même du terrain houiller.

Mais les hauts fourneaux qui avaient été établis près des

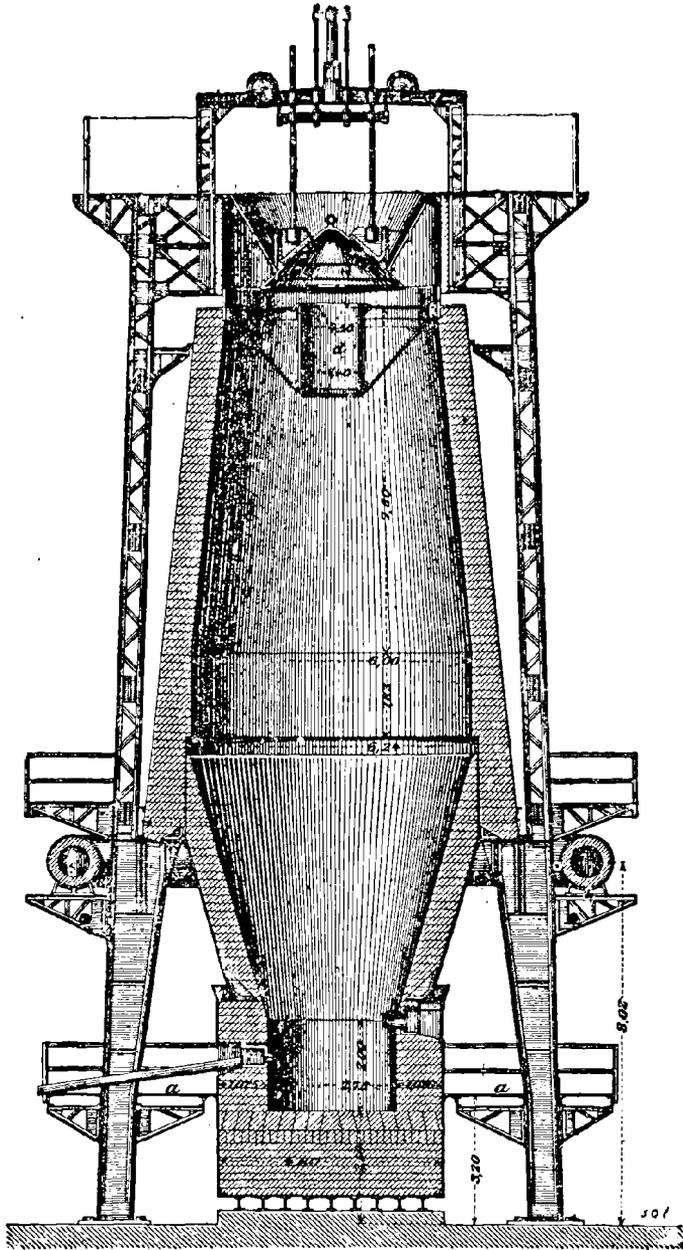


FIG. 68. — Haut fourneau (construction actuelle).

autres bassins du centre, à Montluçon, dans la Loire, au Creusot, sont pour la plupart éteints : les gisements de minerai locaux qui les alimentaient sont épuisés, les minerais d'Algérie ou d'Espagne ne peuvent leur arriver qu'après des transports coûteux, et ils se trouvent aujourd'hui dans des conditions économiques trop défavorables pour lutter avec les usines de l'Est.

Construction du haut fourneau. — Les hauts fourneaux actuels sont formés par de grandes cuves ayant l'aspect extérieur d'une tour conique soutenue à la base par des colonnes ou des supports en fonte isolée ; au centre de ces colonnes se trouve la partie active du fourneau, c'est-à-dire l'ouvrage et le creuset formé par un cylindre de diamètre plus faible. Autour de la base de la cuve circule un large tuyau qui distribue l'air soufflé aux tuyères disposées sur tout le pourtour de l'ouvrage. Un orifice percé sur un des côtés de l'ouvrage laisse écouler les laitiers fondus qui se déversent à mesure qu'il s'en est amassé une quantité suffisante dans le creuset.

On les reçoit, en général, dans des wagons qui les emportent immédiatement, et souvent on les utilise pour faire des pavés, ou on les broie pour fabriquer du ciment et des briques ; un autre orifice percé un peu plus bas sert à couler la fonte. Il est fermé avec un tampon d'argile ; on le perce de temps en temps. La fonte liquide sort alors comme un ruisseau de feu et vient se répandre dans une série de rigoles creusées dans le sable de l'aire qui s'étend devant la fournaise ; elle s'y solidifie en grands lingots allongés que l'on appelle des *saumons*.

Toute la partie inférieure du fourneau est entourée de plaques métalliques et d'un réseau de conduites d'eau qui viennent distribuer des courants d'eau sous pression pour rafraîchir les parois à l'extérieur. Ce n'est que par ce moyen qu'on arrive à les empêcher de se ronger sous l'influence des scories et de la température extrêmement élevée qui règne au centre.

La cuve est serrée par des cercles en fer ou même maintenue

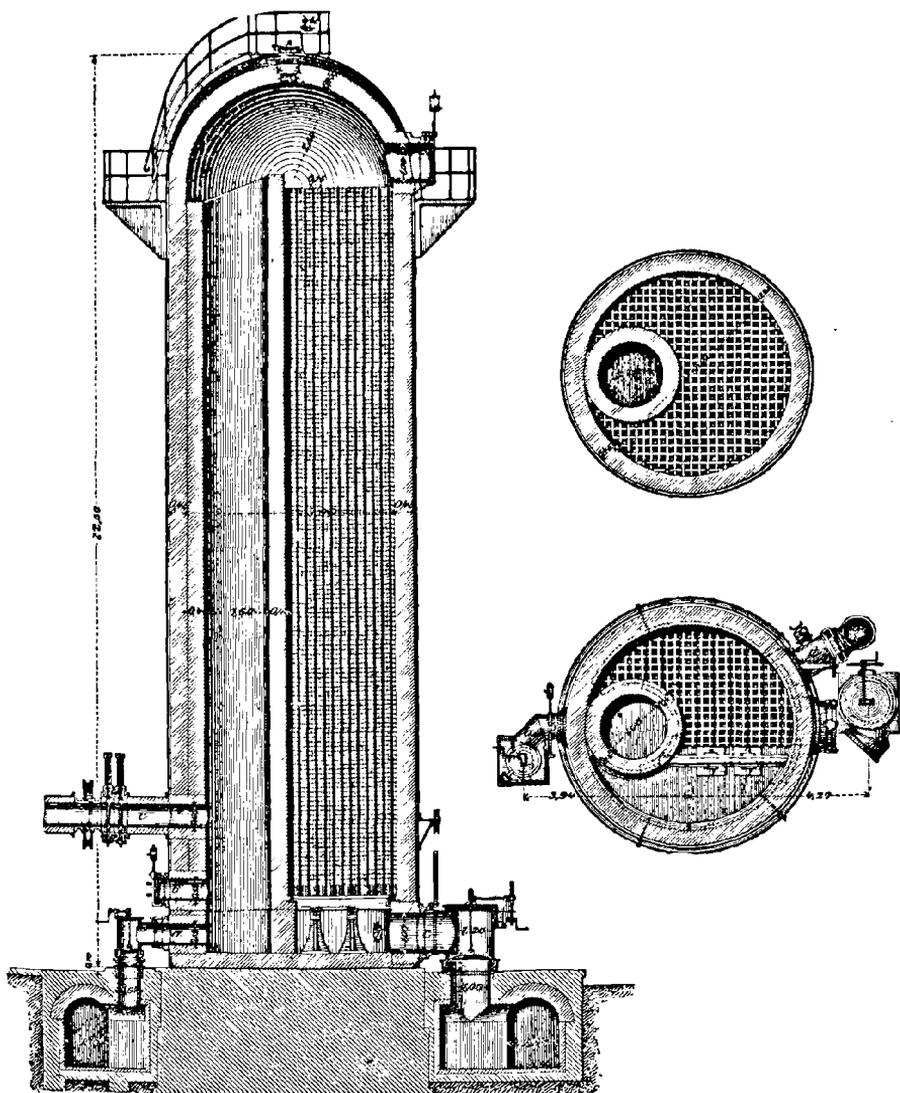


FIG. 67. — Appareil Cowper pour le chauffage du vent.

par une enveloppe complète en tôle ; elle supporte une plateforme qui entoure le gueulard et qui sert au chargement.

Le gueulard est fermé par une trémie en tôle au centre de laquelle se trouve un cône que l'on peut abaisser. Des wagons viennent déverser des charges de minerai et de coke entre le cône et la trémie, puis on fait tomber ces charges dans le fourneau en laissant descendre un peu le cône, ce qui ouvre tout autour un intervalle par où tombent les charges.

Au-dessous de cette fermeture les parois du fourneau sont percées d'orifices communiquant avec de grands tuyaux verticaux qui soutirent les gaz produits par la combustion. Lorsque l'air est injecté dans l'ouvrage au milieu d'une masse considérable de charbon incandescent, il se produit exclusivement de l'oxyde de carbone, c'est-à-dire que le charbon n'a absorbé que la moitié de l'oxygène auquel il est susceptible de se combiner. Ce gaz est combustible ; on le recueille au sortir du fourneau. Il sert à chauffer les chaudières de la machine soufflante et les appareils à air chaud.

Ces derniers sont des espèces de grandes ruches en briques construites tout autour du fourneau et presque aussi hautes que lui. L'air, injecté par des machines de plusieurs centaines de chevaux de force, arrive dans ces ruches, qui ont été préalablement chauffées jusqu'au blanc, et les traverse lentement avant d'être envoyé aux tuyères. Il circule à un moment donné dans une partie seulement de ces appareils et il rapporte aux fourneaux toute la chaleur qu'il leur emprunte.

Lorsque les briques ont été refroidies par le courant d'air, on modifie la distribution au moyen de valves et l'on met l'appareil en chauffage, c'est-à-dire qu'on y envoie les gaz venus du gueulard, qui s'y brûlent et le ramènent au bout d'un certain temps à sa température primitive. Les appareils à air chaud alternent donc leurs rôles ; les uns sont en refroidissement et reçoivent l'air, pendant que les autres sont en chauffage et reçoivent le gaz.

Les hauts fourneaux actuels ont des volumes de 250 à 300

mètres cubes et peuvent produire entre 60 et 120 tonnes de fonte par jour. La production est d'autant plus forte que le minerai est plus riche, plus facile à traiter et que la qualité de fonte à produire exige moins de chaleur.

Hauts fourneaux à production intensive. — Aux États-Unis, on construit des hauts fourneaux ayant jusqu'à 500 mètres cubes de volume et pouvant produire plus de 300 tonnes de fonte par jour.

On avait autrefois essayé en Angleterre de construire de ces fourneaux monstres, mais leur marche n'avait pas été satisfaisante. Si l'on a mieux réussi en Amérique, cela tient en partie à la forme que l'on a adoptée. Au lieu d'élargir démesurément le ventre du fourneau, ce qui donne lieu à une descente irrégulière des charges, on a conservé à la cuve une forme élancée. La largeur ne diminue que régulièrement et progressivement depuis le ventre jusqu'aux deux extrémités.

En outre on a augmenté beaucoup la pression de l'air. On emploie des machines plus puissantes, qui sont réglées de manière à envoyer toujours le même volume d'air, quelle que soit la résistance du fourneau. La pression augmente autant qu'il le faut pour forcer cet air à traverser la cuve; on évite ainsi les dérangements qui se produisent lorsque les charges trop tassées dans les hauts fourneaux de grand volume obstruent le passage de l'air et que la machine, ne pouvant dépasser une certaine pression, se trouve incapable de surmonter ces résistances.

Conduite du haut fourneau. — La bonne marche du fourneau dépend surtout de la manière dont on dose le lit de fusion, c'est-à-dire le mélange des différentes matières que l'on y charge. Il faut ajouter au minerai des fondants capables de saturer la silice et de former un laitier fusible dans lequel le fer ne doit pas être retenu. C'est le plus souvent du calcaire qui joue ce rôle. Les laitiers sont essentiellement des silicates doubles d'alumine et

de chaux. Ils sont fusibles à condition que ces trois corps s'y trouvent dans de certaines proportions. Si l'un des trois vient à dominer par trop ou au contraire à disparaître, le silicate devient réfractaire.

Comme la silice et l'alumine composent à peu près exclusivement les cendres du coke, on est presque toujours obligé d'ajouter de la chaux. Avec le charbon de bois, dont les cendres sont en très petite quantité et naturellement fusibles, les additions à faire étaient moins considérables et l'on n'avait qu'un faible poids de laitiers. Dans les hauts fourneaux à coke, le poids des laitiers surpasse presque toujours celui de la fonte. Parfois il en est le double ou le triple.

On est amené à charger presque toujours les laitiers en chaux parce que ce corps jouit de la propriété d'absorber le soufre sous forme de sulfure de calcium et il empêche cet élément nuisible de passer dans la fonte ; ainsi, quand on veut épurer les fontes, les laitiers ne contiennent le plus souvent que 30 à 35 pour 100 de silice et au moins 40 pour 100 de chaux.

Il reste presque toujours dans les laitiers un peu d'oxyde de fer et d'autres métaux. La quantité qu'ils en contiennent est d'autant plus faible que la température du fourneau est plus élevée et la consommation de combustible plus grande. La chaux, qui se comporte comme une base chimique énergique, contribue à saturer la silice, elle se substitue en quelque sorte à l'oxyde de fer et l'empêche de rester dans les laitiers.

On peut donc distinguer deux types d'allures opposées suivant la manière dont le fourneau est conduit : l'allure chaude lorsque l'on charge beaucoup de combustible et qu'on réalise des températures élevées, et l'allure froide quand on économise le combustible et que la température atteint sa limite inférieure.

Fabrication des différentes espèces de fontes. — En allure chaude, les laitiers sont généralement calcaires, d'aspect pierreux, de couleur blanche ou grisâtre ; ils ne contiennent presque pas de

métaux. En allure froide, les laitiers deviennent verts ou noirs, leur cassure est plutôt vitreuse ; ils sont alors plus fusibles et retiennent une proportion sensible de fer parce que la réduction est incomplète.

Ces deux allures donnent deux qualités de fonte très différentes : les *fontes grises* en allure chaude et les *fontes blanches* en allure froide.

La fonte grise est caractérisée au point de vue chimique par la présence d'une certaine quantité de silicium qui peut aller jusqu'à 2 pour 100. La haute température et l'excès de combustible amènent la réduction d'un peu de silice, et le silicium mis en liberté se combine au métal : ce corps a pour effet indirect de provoquer la cristallisation du carbone, qui s'isole en paillettes de graphite. Ce sont ces paillettes noires qui, disséminées dans la masse, donnent à la cassure une couleur grise caractéristique et un grain plus ou moins grossier.

Quand la proportion de silicium est plus faible, les paillettes de graphite deviennent moins nombreuses et le grain devient de plus en plus fin. Quand les parties grises se présentent sous forme de taches mélangées à des parties blanches, la fonte prend le nom de *truitée*.

Dans la fonte blanche, tout le carbone est combiné ; le métal a une cassure brillante homogène, qui devient lamelleuse et cristalline quand il contient en outre du manganèse.

La fonte grise fond franchement au feu et devient bien liquide ; la fonte blanche se ramollit progressivement et reste toujours un peu pâteuse, tant que la température n'est pas extrêmement élevée. C'est donc la première variété qui convient pour faire des moulages, car la seconde ne serait pas assez fluide pour bien remplir tous les recoins du moule.

Quand on a en vue la fabrication du fer, la fonte grise est souvent aussi préférable, soit parce qu'elle se prête mieux à certains modes d'affinage, comme nous le verrons plus tard, soit parce qu'elle contient moins de soufre. Ce corps, à haute température,

passé dans les laitiers calcaires, tandis qu'en allure froide il se combine plutôt au fer.

La fonte blanche est de fabrication moins coûteuse, et on l'emploie de préférence comme fonte d'affinage, c'est-à-dire pour la fabrication du fer forgé, toutes les fois qu'il n'y a pas de motif spécial pour choisir la fonte grise. Suivant les cas, on peut du reste préparer toute espèce de variétés entre ces deux types extrêmes.

C'est surtout en faisant varier la proportion entre le minerai et le coke chargés au gueulard, qu'on règle la qualité de la fonte : plus on emploiera de combustible, plus elle sera grise. On peut aussi rendre l'allure plus chaude en augmentant la température du vent injecté.

La composition du lit de fusion n'est du reste pas indifférente; pour pouvoir surchauffer le métal, il faut que les charges ne fondent pas trop tôt, sans quoi le laitier coulerait dans le creuset avant que le travail fût achevé; il n'aurait pas le temps de se réduire et retiendrait de l'oxyde de fer: or, tant que le laitier est ferrugineux, le silicium, beaucoup moins réductible que le fer, reste à l'état de silicate et ne passe pas dans la fonte. Ainsi faut-il, pour réaliser une bonne allure chaude, avoir des laitiers peu fusibles, des lits de fusion réfractaires : c'est le plus souvent en chargeant un excès de calcaire (substance tout à fait infusible par elle-même) qu'on y arrive, et cette circonstance facilite l'élimination du soufre.

Influence des corps étrangers. — Le phosphore, qu'on rencontre en petites quantités dans beaucoup de minerais, ne s'élimine pas au haut fourneau; il passe presque entièrement dans la fonte. Pour la fonte destinée à être moulée, la présence du phosphore est plutôt un avantage, il augmente la fluidité. Mais, quand il s'agit de fabriquer du fer, le phosphore peut devenir un inconvénient grave, parce qu'il suffit d'une très faible dose pour rendre le métal cassant. Aussi, autrefois, les minerais phosphoreux étaient désignés sous le nom d'*impurs*; ils ne pouvaient donner

que des fers de qualité inférieure. Aujourd'hui, on sait éliminer le phosphore pendant l'affinage que subit la fonte pour fabriquer l'acier fondu, et l'infériorité des minerais phosphoreux est devenue beaucoup moins sensible. Les fontes très phosphoreuses sont même recherchées, comme nous le verrons plus tard.

Le manganèse, qui se rencontre en proportions plus ou moins fortes dans un certain nombre de minerais de fer, joue un rôle utile à plusieurs points de vue. Il est moins réductible que le fer et il en reste toujours dans les laitiers ; comme il a une grande affinité pour le soufre, il entraîne ce corps avec lui dans le laitier et en facilite l'élimination. Une partie du manganèse passe dans la fonte et contribue à l'améliorer en la rendant plus résistante. Aussi, les fontes d'*hématite* fabriquées avec des minerais purs et un peu manganésifères, sont-elles recherchées pour faire les moulages mécaniques qui doivent offrir une certaine résistance.

Ce sont aussi de bonnes fontes d'affinage, car le manganèse continue à jouer un rôle bienfaisant pendant les opérations ultérieures qui transforment la fonte en fer, et il facilite l'épuration de ce métal. C'est même, comme nous le verrons, un auxiliaire indispensable pour la fabrication de l'acier fondu.

Fontes spéciales. — Quand on traite des minerais riches en manganèse, on obtient des fontes spéciales, très manganésées, qu'on utilise comme réactifs, en addition avec les fontes ordinaires, pour la fabrication de l'acier. On appelle *Spiegeleisen* ou *fonte miroitante* (à cause de leur structure en grandes lamelles) celles qui contiennent de 15 à 20 pour 100 de manganèse, *ferro-manganèse* celles qui ont des teneurs supérieures (pouvant aller jusqu'à 80 pour 100). Leur fabrication est difficile, et d'autant plus pénible qu'on veut obtenir un produit plus riche : le manganèse est dur à réduire et passe en grande partie dans les laitiers ; pour en extraire une proportion suffisante, il faut une température très élevée, sous l'action de laquelle le four se ronge vite. On dépensera deux ou trois fois plus de combustible que pour une fonte ordinaire, et la production

journalière sera beaucoup plus faible, parce que les charges ont besoin de séjourner plus longtemps pour bien se réduire. On comprend donc que ces fontes soient coûteuses : leur fabrication courante au haut fourneau a été une des conquêtes importantes et difficiles de la métallurgie moderne.

On fabrique encore au haut fourneau d'autres fontes spéciales dont l'obtention présente le même genre de difficultés, comme le ferro-silicium, le ferro-chrome, etc. Nous verrons plus loin leurs usages dans la fabrication de l'acier.

Travail du haut fourneau. — Le travail matériel des hauts fourneaux est très simple et se répète toujours régulièrement.

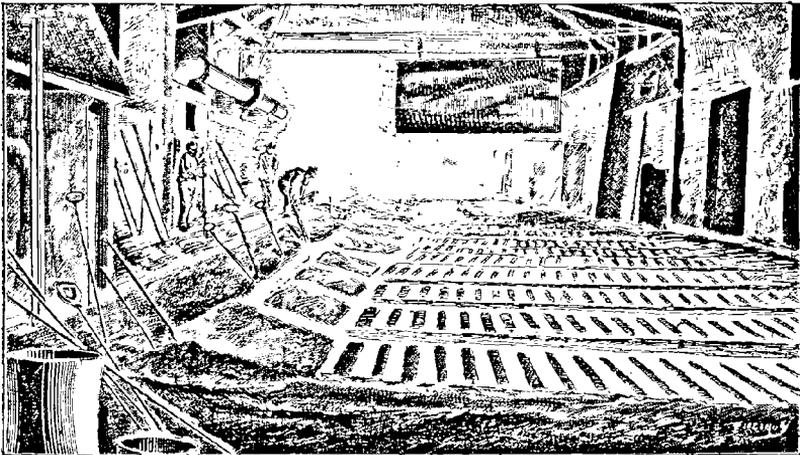


FIG. 68. — Coulée de la fonte.

Les chargeurs placés en haut reçoivent par un monte-charges les wagonnets de minerai, de castine, de coke, qu'ils culbutent alternativement au gueulard, de manière à maintenir le four plein.

Les fondeurs placés en bas débouchent à des intervalles réguliers, par exemple toutes les six heures, le trou de coulée.

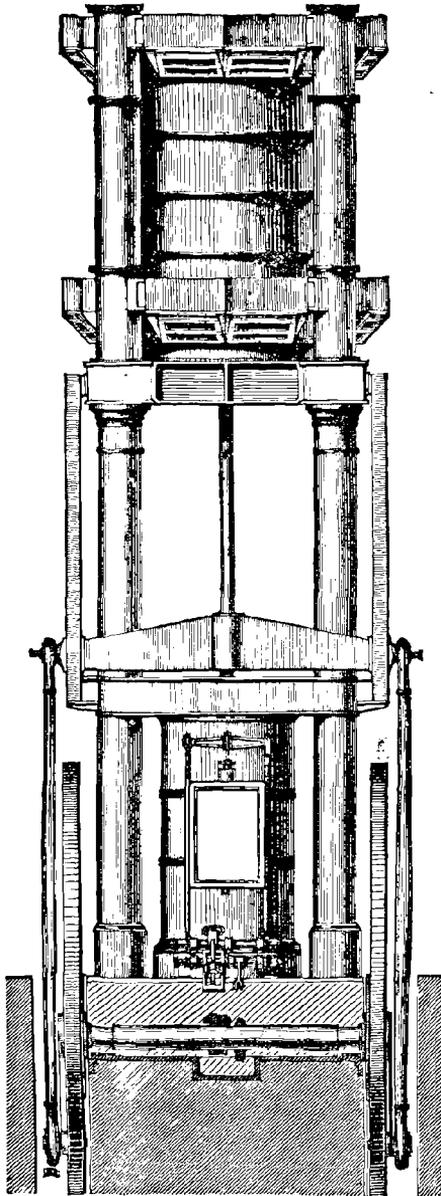


FIG. 69. — Machine soufflante verticale.

La fonte accumulée dans le creuset s'échappe. On la reçoit le plus souvent dans une série de rigoles en sable, où elle se solidifie sous forme de pains allongés, en saumons.

La bonne marche dépend essentiellement du dosage des matières chargées et de la régularité d'allure de la soufflerie. Il est important d'avoir des machines soufflantes puissantes, capables de donner au besoin un supplément de travail et de fournir toujours la quantité d'air nécessaire, lors même que le tassement des charges oppose une résistance au passage du vent.

Les anciens fourneaux étaient souvent arrêtés par suite de corrosions des parois dans la partie la plus chaude. Aujourd'hui les tuyères sont toujours à enveloppes creuses refroidies par un courant d'eau ; les étalages et l'ouvrage sont souvent entourés de plaques refroidies, et avec une surveillance attentive on peut éviter les corrosions.

Conditions économiques. — Les anciens petits hauts fourneaux au bois produisaient à peine 10 tonnes par jour. Les hauts fourneaux au coke ont reçu tout de suite des proportions beaucoup plus grandes : leur production a été progressivement augmentée. Aujourd'hui, les fourneaux ordinairement employés en Europe produisent entre 60 et 100 tonnes par jour, suivant leur dimension et l'allure à laquelle on les fait marcher. En Amérique, on a dépassé 300 tonnes et même 500, et l'on commence depuis peu à imiter cet exemple en Europe.

Le plus souvent une usine comprend au moins deux fourneaux, à cause des arrêts forcés et des réparations. Autour de chaque fourneau se groupent trois, quatre ou cinq appareils à air chaud, des monte-charges, des machines soufflantes, des magasins à coke et à minerai, etc. L'organisation de tous les services accessoires d'approchage et d'enlèvement des matières est essentielle pour l'économie. Une usine bien organisée, comprenant deux fourneaux de dimensions ordinaires, n'occupera guère plus d'une centaine d'ouvriers. Les frais de fabrication, non compris le coût des ma-

tières premières, ne dépasseront pas 5 francs par tonne de fonte.

La consommation de coke descend souvent au-dessous de

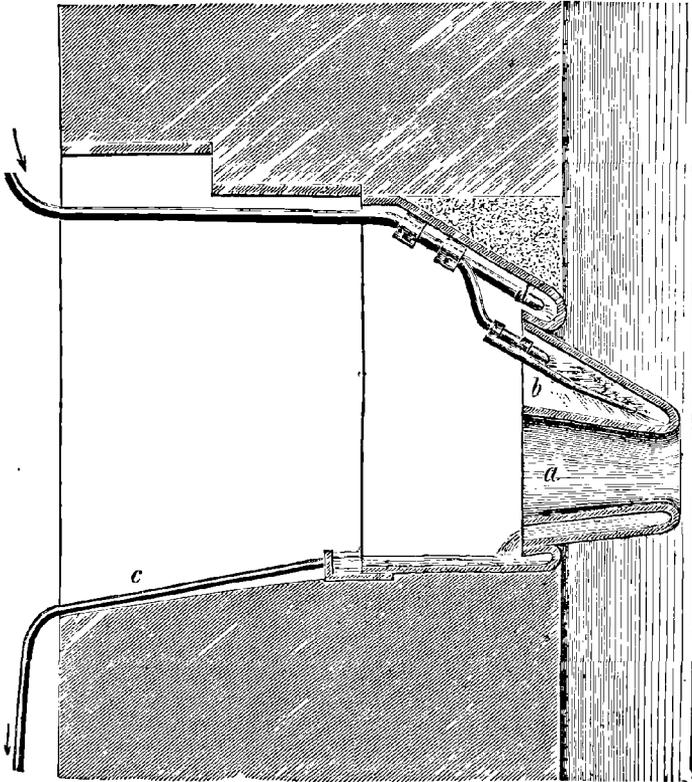


FIG. 70. — Tuyère refroidie.

1000 kilogrammes par tonne de fonte ; elle dépasse rarement 1200. Elle est naturellement d'autant plus forte que les minerais sont plus pauvres et l'allure plus chaude. Elle augmente aussi quand on emploie des coques plus cendreuse. Comme il faut en général 2 ou 3 tonnes de minerai pour 1 tonne de fonte, c'est surtout le

prix du minéral qui influe sur les conditions économiques. Les minerais très riches peuvent seuls supporter un certain transport et les usines les mieux placées sont celles qui se trouvent au voisinage des mines de fer facilement exploitables. Dans ce cas, comme il arrive dans le district de la Moselle, le prix de revient de la tonne de fonte peut s'abaisser au-dessous de 50 francs, tandis qu'il s'élève facilement à 80 francs quand les minerais sont éloignés ou plus coûteux.

CHAPITRE II

EMPLOI DE LA FONTE

Emploi de la fonte. — Moulage. — Affinage pour fer forgé : affinage au bois ; puddlage. — Fabrication de l'acier.

FONTE MOULÉE

La fonte peut être dans certains cas employée telle quelle ; elle est cassante et ne peut se forger, mais on peut l'utiliser sous forme de moulages. On coule le métal fondu dans des moules en sable où il se solidifie. Le moule se prépare en battant fortement un sable plastique qui, sous la pression, s'agglomère et prend une certaine solidité. Ce sable est battu autour d'un modèle qui représente la pièce à reproduire et dont la forme s'y imprime exactement ; on prépare ainsi des blocs de sable qui sont tenus dans des châssis et qui portent chacun l'empreinte d'une partie du modèle. Ces châssis réunis et assemblés avec des brides en fer constituent le moule ; quand la fonte s'y est solidifiée, il est facile de démonter le moule en séparant les châssis pour en retirer l'objet fini.

Pour les pièces de grande dimension et de forme simple on peut creuser la totalité ou une partie du moule dans une couche de

sable que l'on a bien foulé sur le sol. On peut souvent se passer de modèle; ainsi le moule d'une jante de roue ou d'un volant se fera en faisant tourner, autour d'un axe vertical, une planche découpée formant *gabarit* qui vient creuser dans le sable une rigole circulaire suivant le profil voulu.

Quand les pièces comportent des creux, comme par exemple un tuyau, on façonne avec du sable argileux ce que l'on appelle un noyau, c'est-à-dire une pièce présentant exactement l'intérieur du tuyau supposé rempli. Ce cylindre en argile se prolonge aux deux bouts par deux saillies que l'on appelle portées et qui servent à l'ajuster entre les châssis formant le moule extérieur.

L'art du mouleur est très délicat; lorsque les formes deviennent complexes, il faut une série de châssis multiples, il y a à faire tenir à l'intérieur plusieurs noyaux, le sable doit être très régulièrement foulé et l'on peut craindre divers accidents si la préparation du moule n'a pas été soignée; la fonte liquide en y tombant peut dégrader les parois ou déplacer les noyaux. Si le sable est un peu humide, la vaporisation subite de l'eau peut produire des explosions souvent dangereuses. Il faut que le sable soit à la fois solide et poreux, afin de laisser passage aux gaz qui se dégagent dans l'intérieur de la masse. On obtient ce résultat en mêlant au sable des matières telles que le charbon, la paille et aussi en épingleant la masse de sable tout autour du moule, c'est-à-dire qu'on y enfonce des broches de fer qu'on retire tout de suite et qui y ménagent d'étroits canaux communiquant avec la surface.

La préparation d'un moule demande beaucoup de temps et de travail quand il s'agit d'objets d'art comme les statues; il n'est pas rare que le moulage d'une grande statue prenne plusieurs années.

La fonte sert dans l'industrie surtout à faire des bâtis de machines ou les grandes pièces qui ne sont pas exposées à des chocs, comme les cylindres, les volants, les poulies, les tuyaux. Cependant les quantités que l'on emploie de cette manière sont très inférieures à celles que les hauts fourneaux livrent aux forges pour être transformées en fer ou en acier.

PROPRIÉTÉS DU FER ET DE L'ACIER

Le fer, lorsqu'il est à peu près pur, est à la fois résistant et malléable. C'est le plus résistant de tous les métaux usuels. On ne peut pas le fondre et l'amener à être assez liquide pour se mouler : les températures qu'on peut produire dans les fours ordinaires ne suffisent qu'à le ramollir ; mais chauffé au rouge il devient plastique, se déforme sous la pression ou sous le choc, et on peut le façonner en le forgeant.

Quand le fer est combiné avec de très faibles proportions de carbone, quelques millièmes seulement, sa résistance augmente progressivement. Lorsque la dose dépasse 4 ou 5 millièmes, ce métal mérite alors le nom d'acier. Il est deux fois plus résistant que le fer, et il est en outre plus dur, beaucoup moins susceptible de se déformer. On peut néanmoins encore le forger lorsqu'il est chauffé au rouge ; mais, si on le plonge encore rouge dans l'eau froide, il prend la *trempe*, c'est-à-dire que sa résistance et sa dureté augmentent dans de fortes proportions et il devient absolument indéformable. C'est cette propriété que l'on utilise dans la fabrication de tous les outils destinés à entamer des corps durs et qui fait de l'acier l'auxiliaire indispensable de presque toutes les industries humaines.

La faculté de tremper s'accroît à mesure que la proportion en carbone augmente. Au-dessous d'une certaine limite de carburation la trempe ne produit qu'un effet peu sensible, et ces métaux, qui ont à peu près les propriétés du fer, sont désignés sous le nom d'aciers doux ou extra-doux. Avec une dose de carbone modérée, entre 4 et 7 millièmes par exemple, l'effet de la trempe devient notable. Toutefois, le métal n'est pas encore trop aigre, il est susceptible de résister aux chocs ; c'est ce qu'on appelle les aciers mi-durs, dont l'emploi, comme nous le verrons, a pris un développement considérable dans l'industrie moderne.

Au delà de cette dose commencent les aciers durs ou aciers à outils, seuls connus et utilisés autrefois.

Quand la teneur en carbone approche de 1 pour 100, on a les aciers extra-durs, qui ne peuvent plus servir que pour la fabrication des outils spéciaux, parce qu'après la trempe leur dureté extrême les rend cassants, susceptibles d'éclater aux chocs. Un métal, en général, ne résiste aux chocs qu'à condition d'avoir une certaine capacité de déformation qui lui permet d'amortir les efforts trop brusques. Quand la déformation est absolument impossible, comme dans les aciers durs trempés, un choc violent provoque nécessairement la rupture.

L'acier fond plus facilement que le fer, et cette différence est d'autant plus accusée qu'il contient plus de carbone. Aussi, il y a longtemps que l'on sait fondre les aciers durs, tandis que le fer n'était connu que sous la forme de métal forgé. Depuis quelque temps, les progrès de la métallurgie ont permis de fondre des aciers de moins en moins carburés et d'appliquer ce procédé de préparation même aux plus doux, qui ne diffèrent pas sensiblement du fer pur : on a obtenu ainsi de nouveaux produits dont l'apparition a révolutionné l'industrie dans la seconde moitié de ce siècle, et qui prennent de plus en plus la place de l'ancien fer forgé.

Nous aurons à examiner trois catégories de procédés :

1° La fabrication du fer forgé, qui a été jusque vers 1865 le seul moyen de produire ce métal ;

2° Les anciens procédés de préparation de l'acier, qui ne servaient que pour de très petites quantités de métal, destiné à la fabrication des outils, et qu'on emploie encore pour les petites pièces en acier dur ;

3° Les procédés actuels, permettant d'obtenir en grande masse, à l'état de fusion, les aciers de toutes nuances, jusqu'aux plus doux qui méritent le nom de fer fondu et remplacent peu à peu le fer dans toutes ses grandes applications.

Toutes ces fabrications emploient comme matière première la fonte, que l'on soumet à des élaborations convenables, pour éli-

miner le carbone et les autres impuretés. On peut les réunir sous le nom général de procédés d'*affinage de la fonte*.

Fonte malléable. — Avant de décrire la fabrication du fer et de l'acier, nous indiquerons un procédé spécial d'affinage qui peut s'appliquer aux pièces de fonte moulées et qui permet de leur donner, jusqu'à un certain point, la malléabilité du fer. Le métal ainsi préparé s'appelle *fonte malléable*.

Les moulages sont empilés dans des caisses au milieu d'une masse d'oxyde de fer en poudre qui remplit tous les intervalles libres. On chauffe ces caisses pendant plusieurs jours au rouge cerise. Le carbone qui se trouve près de la surface réagit sur l'oxyde de fer voisin et se brûle lentement. Cette action oxydante pénètre peu à peu dans les couches intérieures et jusqu'à une certaine profondeur. L'objet ainsi traité devient beaucoup moins cassant ; il s'est presque transformé en fer, sans se déformer.

La fonte malléable est moins compacte que le fer forgé, légèrement poreuse ; mais pour certaines applications elle offre néanmoins assez de résistance et peut remplacer le fer. On se sert beaucoup de ce procédé pour de petits objets à bon marché, comme les clefs, les étriers, etc. Mais on ne peut traiter avec succès que des pièces de faibles dimensions. Dès que l'épaisseur dépasse 1 centimètre, la décarburation n'atteint plus le centre, qui reste à l'état de fonte cassante. Cette fabrication, qui ne présente que l'avantage du bon marché, est peut-être destinée à disparaître à mesure que se développera le moulage direct de l'acier et du fer fondus.

AFFINAGE DE LA FONTE

Fabrication du fer forgé. — Pour transformer la fonte en fer, il faut éliminer le carbone et le silicium qui y sont alliés. On peut y arriver par simple oxydation de ces éléments à l'air.

Si l'on fond la fonte et qu'on la maintienne surchauffée au contact de l'air, le silicium s'oxyde le premier. Il se produit aussi une certaine quantité d'oxyde de fer qui se combine à la silice pour former une scorie fusible. Le carbone ne commence à s'oxyder qu'après le silicium. Comme l'action de l'air ne peut s'exercer qu'à la

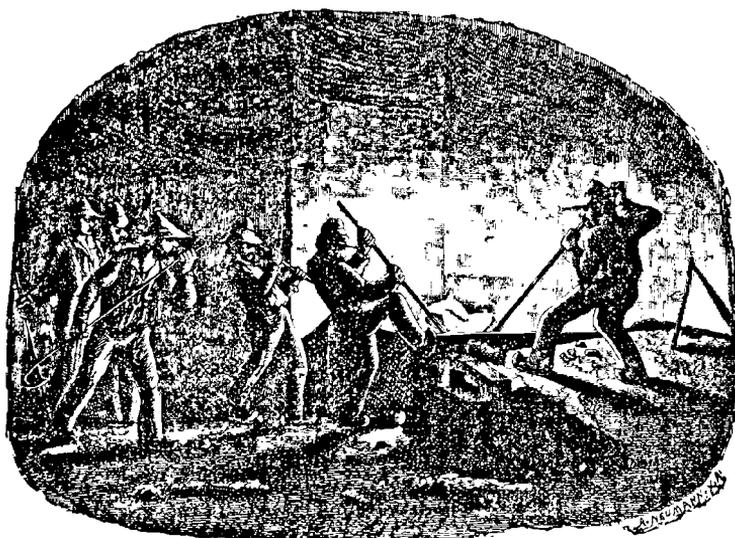


FIG. 71. — Ouvriers retirant la loupe du bas foyer.

surface, il faudrait très longtemps pour brûler ainsi tout le carbone : mais, si l'on brasse la fonte avec la scorie silicatée produite pendant la première phase de l'opération, le carbone réagit sur cette scorie pour réduire le fer qu'elle contient ; il se produit alors une espèce d'ébullition par suite du dégagement subit de l'oxyde de carbone gazeux : lorsque le carbone est à peu près éliminé, le fer devient infusible et sa présence se dénote par la formation de grumeaux solides.

On rassemble ces grains en les roulant les uns sur les autres de façon à former une espèce de boule qu'on appelle *loupe*. La

loupe retient des scories interposées, on les expulse par un martelage qui exprime ces scories liquides comme l'eau d'une éponge. que l'on presse, et qui achève de souder toutes les parcelles ferreuses en un bloc compact.

Affinage au bas foyer. — Autrefois cette opération se faisait au *bas foyer* (voir fig. 2). On charge la fonte en bloc au-dessus

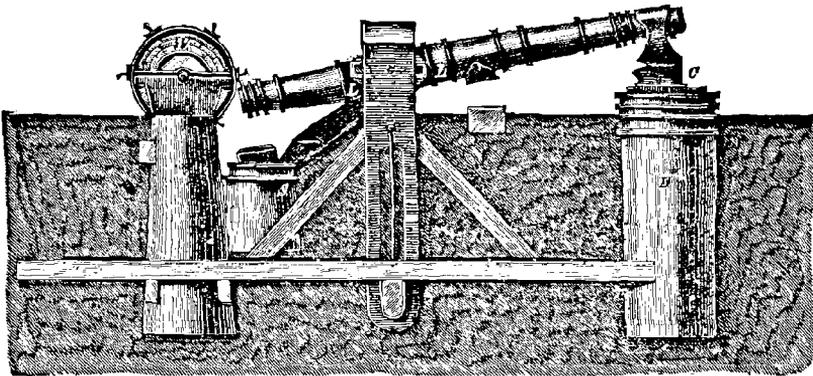


FIG. 72. — Marteau à queue.

La roue à lames que l'on voit à gauche vient appuyer sur la queue du marteau et le soulever à intervalles réguliers.

du charbon incandescent qui remplit le foyer. Elle fond goutte à goutte et tombe au bas du foyer en passant devant la tuyère où elle s'oxyde.

Quand toute la fonte est fondue, elle forme une couche liquide au-dessous du charbon. Cette couche s'épaissit peu à peu par oxydation progressive; lorsqu'elle est devenue pâteuse, on soulève le métal avec des crochets de façon à l'exposer au vent de la tuyère jusqu'à ce que le carbone soit entièrement brûlé, puis on le replonge dans le foyer et on le roule avec des crochets pour former la loupe. La loupe était martelée dans les anciennes forges sous des martinets à manche en bois, que venait soulever une roue hydraulique.

Ce mode d'affinage s'est conservé pendant longtemps pour la fabrication des fers supérieurs; on ne brûlait dans ces bas foyers que du charbon de bois, qui n'apporte aucun corps nuisible, et dont les cendres alcalines donnent des scories très fusibles qui permettent l'épuration très complète du fer. Mais l'opération est très coûteuse par suite de sa lenteur et du prix élevé auquel revient aujourd'hui le charbon de bois dans la plupart des pays industriels.

PUDDLAGE

Quand on a voulu remplacer ce combustible par la houille, il a fallu soustraire le métal au contact direct du charbon, parce que la houille contient presque toujours des proportions notables de soufre. On imagina alors le *four à puddler*, où la fonte est chargée sur une sole chauffée au moyen d'un foyer latéral (voir fig. 8).

On commence par entasser sur la sole les saumons de fonte de manière à les chauffer entourés de tous côtés par la flamme. Ils s'oxydent sur toute leur surface en même temps qu'ils entrent peu à peu en fusion. Une fois que le bain est fondu, on le brasse avec des crochets que l'on introduit par la porie de travail. L'ouvrier manœuvre le crochet de manière à tracer dans la couche liquide une série de sillons.

L'oxydation tranquille continue jusqu'au moment où tout le silicium est éliminé. Puis le carbone brûle à son tour: il commence à se dégager des bulles d'oxyde de carbone de toute la surface du bain. Tant que celui-ci reste bien liquide, l'oxydation est encore lente et l'ébullition modérée. Mais, quand la fonte décarburée s'épaissit, le brassage la mélange bien mieux avec les scories: l'oxyde de carbone se produit dans toutes les parties de la masse pâteuse. Alors peu à peu tout le bain monte, soulevé par l'ébullition plus violente. Lorsqu'elle s'apaise, par suite de la disparition presque complète du carbone, on voit surgir par places des champignons de fer incandescent; le puddleur les détache avec son crochet et les roule les uns sur les autres pour les agglutiner en loupes.

Puddlage froid et puddlage chaud. — L'opération dure entre une ou deux heures, suivant la nature de la fonte. La fonte blanche ne devient jamais tout à fait liquide, elle reste plus ou moins pâteuse et s'oxyde rapidement. La période d'ébullition n'est pas alors très marquée, le métal reste presque tout le temps en grumeaux ; c'est ce que l'on appelle le *puddlage froid* ou le *puddlage*

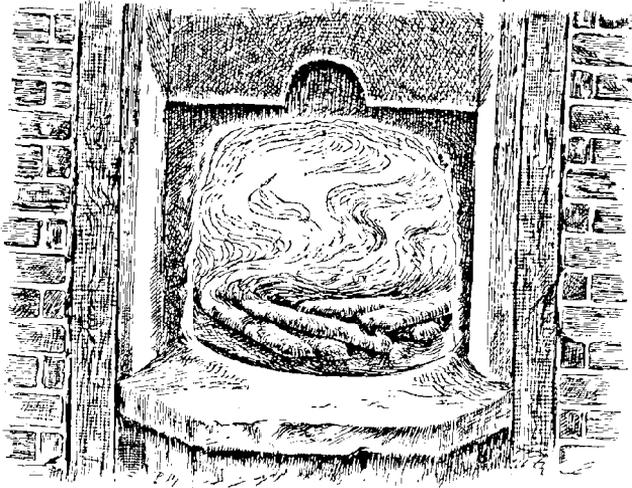


FIG. 73. — Porte du four à puddler, ouverte, laissant voir les saumons de fonte empilés.

en sable. Avec la fonte grise l'opération est beaucoup plus longue, parce que le bain devient tout à fait fluide et qu'alors l'air n'agit plus qu'à la surface. Il se forme du reste beaucoup plus de scories, parce que la fonte contient plus de silicium. C'est ce qu'on appelle le *puddlage chaud* ou *puddlage bouillant*, à cause de la période d'ébullition, qui est alors bien marquée.

Lorsque la fonte est de qualité intermédiaire, on peut à volonté faire le *puddlage* de l'une ou l'autre des deux manières en chauffant

le four plus ou moins, pour liquéfier la fonte ou pour la laisser un peu pâteuse.

Au début on a eu de grandes difficultés à réaliser le puddlage chaud, parce que les soles sont rapidement attaquées et rongées par les scories ferrugineuses liquides. Le puddlage en sable était le seul pratique tant que l'on n'a pas eu l'idée de remplacer la sole en briques par une plaque de fonte posée sur des supports isolés. La plaque se trouve toujours léchée par l'air sur sa face inférieure : cela suffit pour la refroidir et l'empêcher de fondre. Au-dessus elle est recouverte d'un garnissage en oxyde de fer presque pur, que l'on répare après chaque opération. Quand le puddlage se fait très chaud, les parois du four doivent être formées aussi de caisses de fonte qui sont refroidies à l'intérieur par des courants d'air ou par des courants d'eau.

Le puddlage en sable est naturellement plus économique, il dure moins longtemps et la fonte blanche sur laquelle on opère revient moins cher que la fonte grise ; mais il donne en général des fers de qualité inférieure. Certains corps nuisibles, le phosphore principalement, ne peuvent s'éliminer qu'avec le puddlage chaud. Le phosphore peut s'oxyder et passer à l'état de phosphate dans les scories. Mais, pour qu'il y soit bien absorbé, il faut qu'il y ait une certaine masse de scories bien liquides.

En dehors de ces impuretés, le fer peut être souillé par des parcelles d'oxyde qui y restent interposées. C'est cet oxyde qui forme dans le métal des pailles. Pour qu'il s'élimine bien au martelage, il faut que la scorie soit assez liquide. Il faut en outre qu'il reste dans le métal un peu de carbone capable de réduire partiellement l'oxyde interposé.

En effet, le fer est susceptible de deux degrés d'oxydation. Le protoxyde, celui qui contient le moins d'oxygène, donne des silicates fusibles ; mais le sesquioxyle, qui se forme par suroxydation du premier à l'air, reste toujours infusible. Il faut donc empêcher sa formation. Tel est le rôle du petit excès de carbone qu'on laisse dans le fer. On n'a pas le choix entre un fer un peu

carburé ou bien un fer oxydé et pailleux. Pour conserver dans le métal la dose voulue de carbone, il faut que le bain soit liquide et recouvert par une couche de scories qui le protège contre l'oxydation directe.

Puddlage pour fer supérieur et pour acier. — On obtient les fers tout à fait supérieurs en puddlant des fontes manganésées ou en ajoutant un peu de manganèse à la charge. Ce métal forme des silicates très fusibles et a pour effet de rendre la scorie plus fluide; tel est aussi le principal secret de la fabrication de l'acier par les anciens procédés. Quand on affine au bas foyer ou par le puddlage une fonte assez riche en manganèse, on obtient une scorie très liquide et l'opération est très longue : ainsi le puddlage pour acier peut durer trois heures. Grâce à ces circonstances, on peut arrêter l'opération lorsque le métal retient juste les quelques millièmes de carbone qui sont nécessaires à la constitution de l'acier. C'est ainsi qu'on fabriquait autrefois au bas foyer ce qu'on appelle l'acier naturel. Ce nom lui a été donné parce qu'on ne pouvait préparer ce produit qu'avec certains minerais auxquels on attribuait une sorte de vertu naturelle pour donner de l'acier.

On sait aujourd'hui quelles sont les conditions chimiques à réaliser pour obtenir ce résultat; il suffit d'avoir une certaine teneur en manganèse et d'employer des fontes pures. La pureté est une qualité indispensable parce que les corps étrangers exercent une influence beaucoup plus fâcheuse sur l'acier que sur le fer. Comme l'acier est par lui-même déjà un peu aigre, des traces de phosphore suffisent à le rendre cassant, alors qu'elles sont supportables dans le fer, qui est naturellement doux.

La fabrication de l'acier par ces procédés était forcément très coûteuse par suite de la longueur de l'opération et de la nécessité d'employer des matières premières de qualité exceptionnelle; aussi ce métal n'était produit qu'en très faible quantité et son emploi était restreint aux outils qui exigent une grande dureté, avant la découverte des nouveaux procédés d'affinage dont nous parlerons plus loin.

Puddlage mécanique. — Le travail du puddleur est fatigant ; il exige des ouvriers robustes et les plus forts s'y usent assez vite. On a cherché bien des moyens de suppléer à l'action de l'homme par une force mécanique. On a construit des fours où l'agitation du bain est produite par des crochets que mettent en mouvement

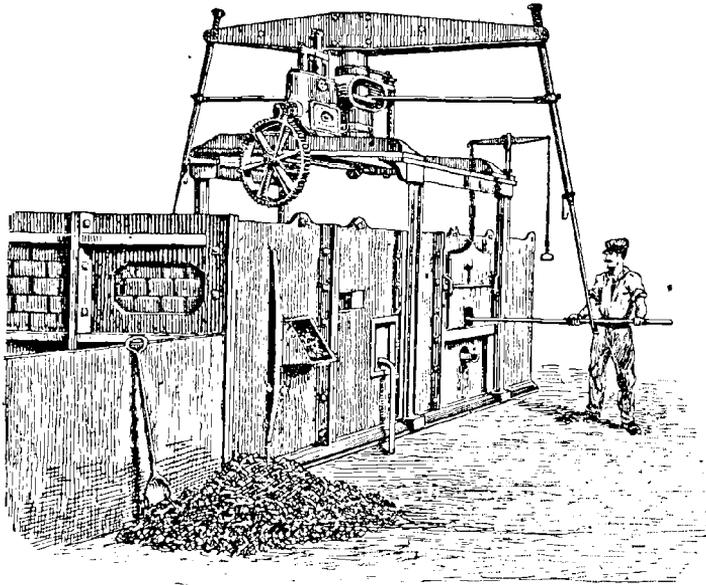


FIG. 74. — Four à puddler mécanique.

L'ouvrier n'a qu'à tenir le crochet, dont les oscillations dans tous les sens sont assurées par le mécanisme placé au-dessus du four.

des mécanismes appropriés ; l'ouvrier n'intervient alors que pour déterminer la confection des loupes. On a essayé aussi de faire le puddlage dans des fours rotatifs, dans de grands cylindres que l'on fait tourner d'une manière continue. Le métal reste toujours dans la partie la plus basse du cylindre ; il est soulevé par le mouvement de rotation et retombe sans cesse en se roulant sur lui-même. La loupe se forme spontanément, mais elle entraîne

beaucoup plus de scories que dans le travail à la main ; de plus, comme toute la charge s'agglutine ensemble, elle ne se trouve pas divisée en plusieurs boules comme cela arrive dans le puddlage ordinaire ; il faut des outils plus puissants pour la marteler, et l'on arrive difficilement à l'élimination complète des scories.

Les essais de puddlage mécanique qui avaient été entrepris un peu partout ont perdu à peu près tout intérêt depuis que l'on sait obtenir par d'autres procédés le fer fondu. Ce dernier produit prend peu à peu la place du fer forgé et dans le siècle prochain le puddlage n'aura peut-être plus qu'un intérêt historique.

Travail du fer. — Le fer puddlé s'appelle aussi fer brut ; il est encore loin d'être pur. L'affinage de la fonte n'est que le premier acte de la fabrication du fer marchand. Les loupes sorties chaudes du four vont directement au *cinglage*.

Il s'agit de les comprimer et d'en faire sortir les scories. Les martinets des petites forges au bois auraient été trop faibles pour traiter les loupes volumineuses que donne le four à puddler. L'industrie du fer n'a pu prendre sa grande extension que lorsqu'elle a été dotée de marteaux plus puissants et plus actifs. L'invention du marteau-pilon a été une date importante dans l'histoire de la métallurgie.

Les premiers pilons à vapeur ont été construits à peu près en même temps en Angleterre et en France. Dans cet appareil la panne du marteau, au lieu d'être suspendue en porte-à-faux à un manche oscillant, est fixée à l'extrémité de la tige d'un piston à vapeur qui la soulève, puis la laisse retomber quand on ouvre l'échappement de la vapeur. La masse frappante glisse entre des montants de fonte qui la guident dans sa chute ; on peut lui donner un poids très considérable. Les pilons de cinglage pèsent quelques milliers de kilogrammes. Ceux des grosses forges, destinés à travailler des grandes pièces d'acier, vont parfois jusqu'au poids de 100 tonnes.

Ce genre de marteau réunit la souplesse et la puissance ; au

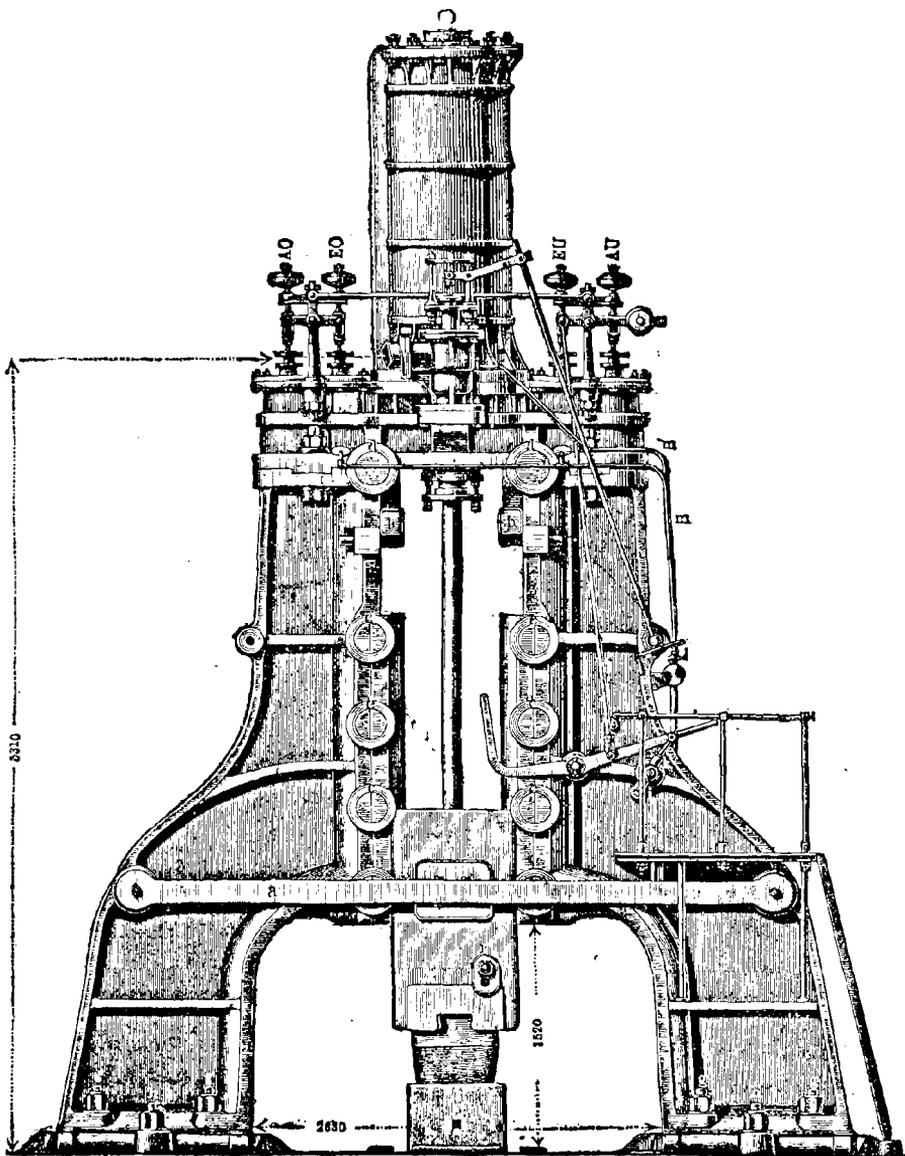


FIG. 75. — Marteau-pilon.

La panne du marteau est soulevée par la tige du piston à vapeur placée au-dessus. Les manettes et leviers qu'on voit à droite servent à admettre ou laisser échapper la vapeur à volonté.

moyen d'un robinet que l'ouvrier manœuvre à volonté, on envoie sous le piston plus ou moins de vapeur ; le marteau se soulève ; il suffit d'ouvrir une soupape pour que la vapeur s'échappe et que la panne retombe en vertu de son poids. On peut donc la faire tomber de la hauteur que l'on veut. Si l'on désire modérer la chute, il suffit de renvoyer sous le piston, avant qu'il soit arrivé en bas, un peu de vapeur, qui forme coussin. On peut arrêter net le marteau pendant qu'il retombe, on peut graduer sans difficulté ses coups.

En retournant plusieurs fois la loupe sous le marteau, on peut l'aplatir, l'allonger dans le sens que l'on veut et la façonner en barre, mais ce travail est long ; pour l'activer, on l'achève au laminoir. Lorsque la loupe a pris corps sous le marteau, que les scories sont expulsées, on passe le bloc de fer rouge entre des rouleaux creusés de cannelures qui le compriment en l'allongeant. On le fait passer successivement par plusieurs cannelures de plus en plus étroites.

Corroyage. — Les barres cinglées et laminées ne sont pas encore un produit définitif. Le fer qui les constitue a une structure irrégulière, un grain grossier. Les barres doivent subir une seconde élaboration ; on les coupe à des longueurs assez faibles, on les classe suivant l'aspect de leurs cassures, qui permettent de juger de leur qualité. Lorsqu'on veut obtenir des barres de fer marchand, on réunit en paquet plusieurs barres de fer brut, on chauffe le paquet au blanc dans un four à réverbère et on le passe dans une série de laminaires ; la pression soude les barres ensemble et les réunit en un seul bloc, que le laminoir allonge et façonne. Ces laminaires finisseurs peuvent avoir des cannelures de formes très variées suivant les pièces qu'il s'agit de fabriquer.

Si l'on veut obtenir des pièces de grande dimension, comme des rails, des poutrelles, des blindages, il faut encore réunir plusieurs barres en paquet et les souder par un nouveau réchauffage suivi d'un travail de forge au marteau ou au laminoir. Les grosses

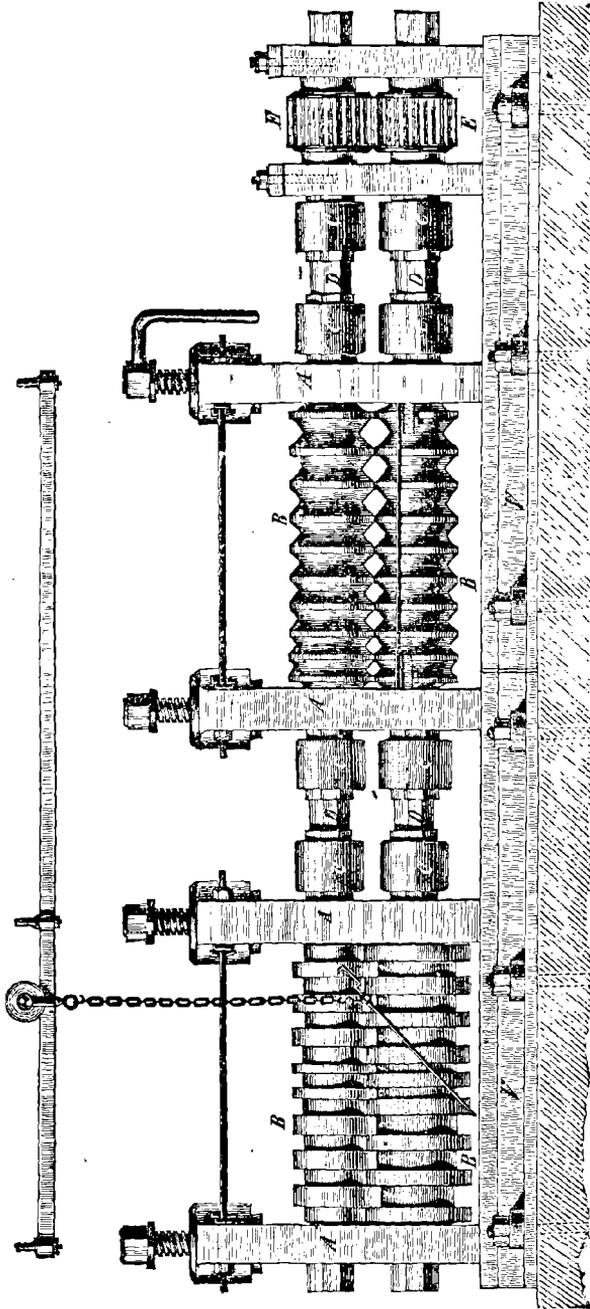


Fig. 76. — Laminoir à *ex.*

La barre est passée successivement dans les différentes cannelures de droite à gauche. Les deux trains sont réunis par des allonges avec manchons mobiles qui donnent à l'assemblage une certaine souplesse. Le crochet suspendu sert à recevoir les barres à la sortie, pour les déplacer et les faire repasser de l'autre côté;

fabrications sont alors fort longues ; ainsi les blindages ne se faisaient que progressivement en empilant peu à peu les uns sur les autres plusieurs paquets de barres qu'il fallait réchauffer et souder un grand nombre de fois. Aujourd'hui presque toutes les pièces de gros de forge se font d'un seul bloc en métal fondu ; ce n'est guère que pour les tôles que l'emploi du fer forgé subsiste à côté de l'acier doux.

Pour fabriquer les tôles, on prépare en général d'abord des couvertes qui se font en laminant le paquet de fer puddlé entre des cannelures larges et plates. On obtient ainsi de longues plaques que l'on réunit deux par deux en plaçant entre elles un paquet de barres. On réchauffe ce paquet et on le lamine entre des cylindres lisses qui peu à peu l'aplatissent et l'allongent en feuilles. A la fin du travail, ces feuilles deviennent très minces et très longues et, pour achever de les laminer, on les réchauffe dans des fours *dormants*. Ce sont de longs compartiments voûtés chauffés seulement au rouge saure et où l'on place la feuille de tôle directement sur la couche de charbon qui recouvre la grille. Il faut en effet éviter l'oxydation qui se produirait rapidement sur une feuille mince offrant beaucoup de surface à l'air si on la chauffait à une trop haute température.

On remarquera que, pendant tout ce travail de forge, le métal continue à s'affiner ; à chaque réchauffage il y a oxydation de la surface et combustion partielle du carbone qui pouvait rester dans le métal. Aussi, lorsque le travail doit être très prolongé, il faut employer du fer de plus en plus jeune, c'est-à-dire légèrement carburé pour qu'à la fin il ne devienne pas trop oxydé et pailleux. Outre les dépenses de main-d'œuvre et de combustible, chaque réchauffage occasionne un certain déchet en fer par suite de l'oxydation. Aussi les progrès de l'industrie des forges ont amené l'emploi d'outils de plus en plus puissants pour mener le travail plus vite et arriver à pousser le façonnage le plus loin possible, sans laisser au métal le temps de se refroidir.

ACIER

Acier cémenté. — Nous avons vu que la fabrication de l'acier naturel est délicate et exige des conditions spéciales. On n'obtient ainsi qu'une certaine qualité d'acier ; généralement ce sont des aciers peu carburés, c'est-à-dire doux. Pour fabriquer des aciers exactement au degré de carburation voulu, on emploie le procédé de *cémentation*. On prend des barres de fer pur et on leur incorpore une certaine quantité de carbone en les chauffant longtemps au milieu d'une masse de charbon de bois en poudre. Au rouge cerise les deux corps se combinent ensemble et le carbone pénètre peu à peu jusqu'à une certaine profondeur dans la barre. Il s'y introduit et y chemine progressivement, bien que le métal reste solide.

Le mécanisme de ce phénomène n'est pas encore bien connu, il est probable qu'il se fait un échange entre les couches successives : les zones riches en carbone qui se forment d'abord à la surface en cèdent une partie aux couches intérieures qui leur sont immédiatement contiguës. Ainsi la cémentation gagne de proche en proche.

Cette opération se fait dans de grandes caisses où les barres de fer plates sont empilées avec des lits alternatifs de charbon en grains. Ces caisses sont placées sur des banquettes recouvertes d'une espèce de hotte.

Après avoir chargé les caisses, on ferme les portes du four, on les lute avec soin et on les chauffe au moyen d'un foyer placé entre les banquettes.

On maintient le four chaud plusieurs jours, car il faut très longtemps pour que la cémentation se fasse sentir jusqu'à une certaine profondeur. L'opération est naturellement d'autant plus longue qu'on veut avoir un acier plus carburé. A la fin, on laisse refroidir lentement, on ouvre les caisses, puis on casse les barres et on examine leur grain, c'est-à-dire l'aspect de la cassure,

pour les assortir et les classer en catégories suivant leur degré de dureté.

Fusion de l'acier au creuset. — L'acier cémenté est souvent poreux à la surface; il n'est pas très homogène, il ne peut s'employer directement. Les aciers durs sont très difficiles à souder; mais ce métal est plus fusible que le fer, et, pour obtenir des

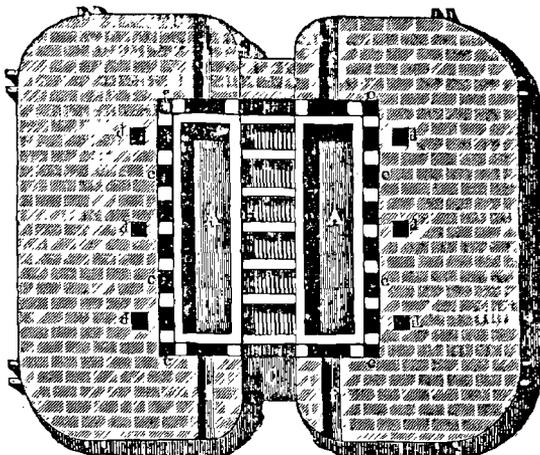


FIG. 77. — Four de cémentation (plan).

pièces compactes homogènes, on réunit des fragments d'acier cémenté ou d'acier puddlé assortis de manière à donner la composition voulue et on les fond ensemble. La température de fusion de l'acier est très supérieure à celle de la fonte; il faut le blanc éblouissant pour l'obtenir; le seul moyen connu autrefois était la fusion en creusets.

En effet, on ne peut pas placer directement le métal dans un feu de forge: il y absorberait du carbone, du soufre (provenant de l'impureté des charbons) et il se dénaturerait complètement;

d'autre part, dans les fours à réverbère, où le foyer est séparé, la température du laboratoire est toujours trop faible. Quand les fragments de métal sont renfermés dans un creuset en terre bien couvert et protégés ainsi contre le contact du combustible, on peut chauffer le creuset au sein d'une masse de coke incandescente en activant la combustion par un très fort tirage. On appelle ces foyers des fours à vent. Le four forme comme une espèce de

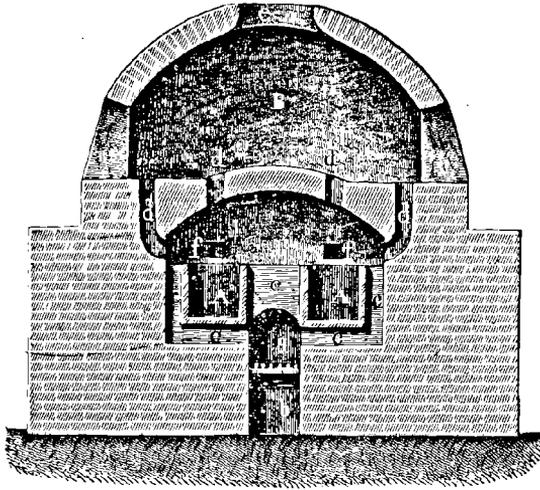


FIG. 78. — Four de cémentation (coupe).

caisse verticale fermée en haut par un couvercle en briques, au fond par une grille sur laquelle on place le creuset; tout l'intervalle libre est rempli de coke jusqu'en haut : ce foyer communique de côté avec une cheminée presque aussi large que lui et très élevée, pour avoir un très fort tirage.

Le creuset ainsi entouré de tous côtés par les charbons est à l'abri de toute cause de refroidissement. On atteint de cette manière les températures les plus élevées que puisse produire la combustion naturelle du charbon.

L'acier fondu au creuset peut être coulé dans des moules en sable très réfractaire; on peut le mouler comme la fonte. Mais, quand on veut qu'il ait toute la résistance dont il est susceptible, il faut le forger. On le martèle à une température qui ne doit pas dépasser le jaune orange, parce que, si on le chauffe trop, il se brûle et se dénature; au voisinage de sa température de fusion, il

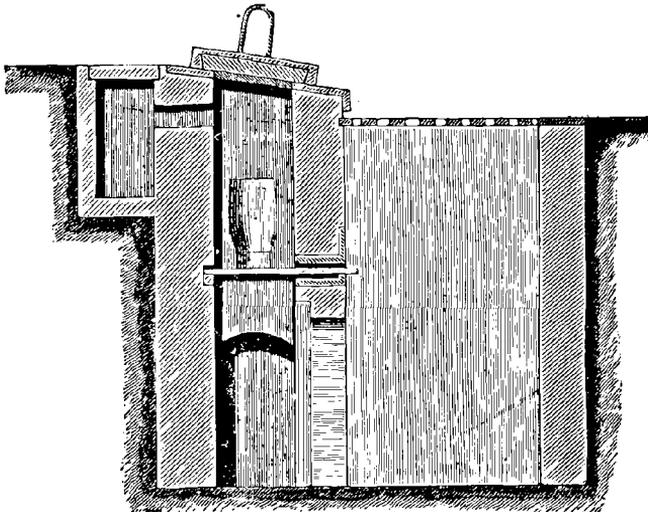


FIG. 79. — Four à vent à creuset.

Le conduit placé à gauche communique avec la cheminée.

devient pâteux et cristallise en prenant un grain très grossier. Les pièces forgées et fines sont souvent réchauffées une dernière fois pour les tremper, ce qui donne au métal son maximum de dureté.

On ne peut fondre au creuset que de petites quantités d'acier à la fois, 40 ou 50 kilogrammes, par exemple. Pour avoir des pièces plus grandes il faut réunir la charge de plusieurs creusets et l'on a de la peine à conduire les fours de manière que tous les creusets soient prêts à couler en même temps. Aujourd'hui on possède des fours capables de développer une température suffisante pour

fondre directement l'acier en grande masse dans un bassin. Ce sont les fours Siemens, dont nous allons parler au chapitre suivant.

Le creuset n'est plus employé que pour les aciers de qualité tout à fait supérieure destinés à fabriquer de petits outils, et, au lieu de le chauffer dans les fours à vent, on place souvent des creusets sur la sole des fours Siemens. Ils sont alors chauffés au milieu d'un courant de gaz et ne se détériorent pas aussi vite qu'au contact du coke. Ce mode de chauffage est, du reste, beaucoup plus économique.

La fabrication de l'acier cimenté exige qu'on emploie comme matière première des fers de qualité tout à fait supérieure, car les impuretés qui pourraient s'y trouver seraient bien plus nuisibles dans l'acier que dans le fer : elles rendraient tout à fait cassant ce métal qui a déjà des tendances naturelles à être aigre. En France et en Angleterre on fait souvent l'acier cimenté avec des fers de Suède. Si l'on veut employer des fers puddlés, il faut un puddlage très soigné ; la fonte doit être de première qualité, et même on la soumet parfois à une épuration spéciale pour éliminer le soufre.

La cémentation et la fusion de l'acier ont été installées en Angleterre au commencement de ce siècle, avant d'être connues sur le continent. Ce sont les soins apportés à cette fabrication et la grande expérience acquise qui conservent encore la réputation des aciers de Sheffield.

CHAPITRE III

FABRICATION DE L'ACIER ET DU FER FONDUS

Fabrication de l'acier et du fer fondus. — Procédés Bessemer et Martin. —
Déphosphoration.

Nouveaux procédés d'affinage pour fer fondu. — Les procédés que nous venons de décrire étaient les seuls employés dans les forges jusque vers 1865. Lorsqu'on voulait fabriquer de grandes pièces de fer, on était toujours obligé de passer par un grand nombre de réchauffages et de forgeages intermédiaires pour souder peu à peu ensemble des séries de paquets de fer puddlé. L'acier était un métal de luxe ; on n'en fabriquait que dans un petit nombre d'usines, il ne représentait pas la vingtième partie de la production totale du fer. L'industrie sidérurgique est entrée dans une phase toute nouvelle le jour où l'on a su fondre l'acier en masses considérables.

Ce progrès a été réalisé presque à la fois de deux manières différentes. En France, Martin, partant des procédés ordinaires de fabrication de l'acier, a cherché à le fondre directement sur sole au moyen des fours Siemens, dont la découverte récente permet d'obtenir des températures plus élevées. Une fois le problème résolu, l'affinage de la fonte se trouvait placé dans les mêmes conditions que celui des métaux fusibles, comme le cuivre, et l'on pouvait obtenir le produit sous forme de bain liquide sur la sole d'un four susceptible de recevoir de grandes dimensions.

En Angleterre, Bessemer a conçu et réalisé avec une audace et une persévérance remarquables un procédé entièrement nouveau et original de fabrication de l'acier. Sa méthode développée et amplifiée a permis non seulement de fabriquer l'acier beaucoup

plus vite qu'autrefois, mais d'obtenir spontanément des températures assez élevées pour fondre les aciers les plus doux et même le fer à peu près pur.

Principes du procédé Bessemer. — Si l'on injecte de l'air sous pression dans un bain de fonte fondue, cet air oxyde tout d'abord le silicium, puis le carbone ; la réaction est beaucoup plus vive qu'au four à puddler, où elle ne se produit que sur la surface, l'affinage marche beaucoup plus rapidement.

Telle a été l'idée première du procédé Bessemer. Sa réalisation présenta d'abord de grandes difficultés : sous l'action de l'air, la fonte tend à se refroidir et les orifices par lesquels on injecte le vent peuvent s'obstruer. En cherchant à surmonter cette difficulté, Bessemer se trouva amené à découvrir le principe qui fait la grande originalité et la fécondité de ses procédés ; les réactions qui se produisent pendant l'affinage de la fonte sont ce que les chimistes appellent exothermiques, c'est-à-dire qu'elles dégagent de la chaleur. Le carbone et le silicium brûlent et jouent ici le rôle de véritables combustibles : pour que la température s'élève, il suffit de se placer dans des conditions convenables pour utiliser ce dégagement de chaleur spontané.

Quand on insufflait le vent dans des fours ordinaires, à travers une couche de fonte peu épaisse, le bain se refroidissait bientôt : la plus grande partie de la chaleur se perdait par rayonnement. Pour conserver cette chaleur, il faut diminuer la surface exposée au refroidissement, opérer sur une masse de métal épaisse et présentant peu de surface extérieure par rapport à son volume. On a donc dû changer complètement la forme des fours, et la réussite est devenue d'autant plus facile qu'on a osé opérer sur de plus grandes masses.

Mais ce n'est pas tout. Il ne suffit pas de conserver la chaleur, il faut en produire assez. Pour cela, il faut que les fontes traitées contiennent une proportion suffisante de ces corps étrangers alliés au fer, qui jouent ici le rôle de combustibles.

Tant qu'on a cherché à traiter les fontes ordinaires, l'opération ne marchait pas. Il faut employer des fontes très chaudes et riches en silicium. Ce corps se brûle plus vite que le carbone, il dégage plus de chaleur, et, comme il forme un produit solide, cette chaleur ne se perd pas dans les gaz qui sortent de l'appareil, comme cela arrive en partie pour le carbone.

Le silicium joue donc dans les fontes traitées par le procédé Bessemer le rôle d'allumeur. C'est lui qui, dès les premiers instants, donne assez de chaleur pour porter le bain de fonte au blanc et le rendre bien fluide; à partir de ce moment le carbone se brûle à son tour avec vivacité et la température ne cesse de s'accroître.

Marche de l'affinage au convertisseur. — Le convertisseur Bessemer est une grande cornue en forme de poire, suspendue sur deux tourillons et pouvant osciller autour de son centre. Le fond est percé d'une série de petits orifices, et au-dessous se trouve une boîte à vent où arrive l'air soufflé à haute pression, qui vient de la machine en traversant l'axe de rotation de l'appareil. On couche d'abord la cornue horizontale et l'on verse dans le bec la fonte liquide et très chaude qui peut venir directement du haut fourneau ou qui a été refondue et surchauffée dans un cubilot; on relève la cornue et l'on donne du vent.

Le métal forme dans l'appareil une couche de plus de 50 centimètres d'épaisseur; le vent comprimé à plus d'une atmosphère la traverse violemment par petites bulles qui s'élèvent de toutes les parties du fond. Le silicium s'oxyde et forme une scorie avec un peu d'oxyde de fer et de manganèse. Pendant cette période il ne se dégage que des étincelles dues aux parcelles métalliques projetées. Si la fonte était trop froide ou pauvre en silicium, le bain deviendrait pâteux et serait alors projeté en gros morceaux par le vent.

Au bout d'un certain temps la combustion du carbone commence et l'on voit sortir au sommet une flamme éblouissante qui

grandit peu à peu ; vers la fin, lorsqu'il ne reste plus que très peu de carbone, la flamme tombe tout d'un coup. Il faut arrêter parce

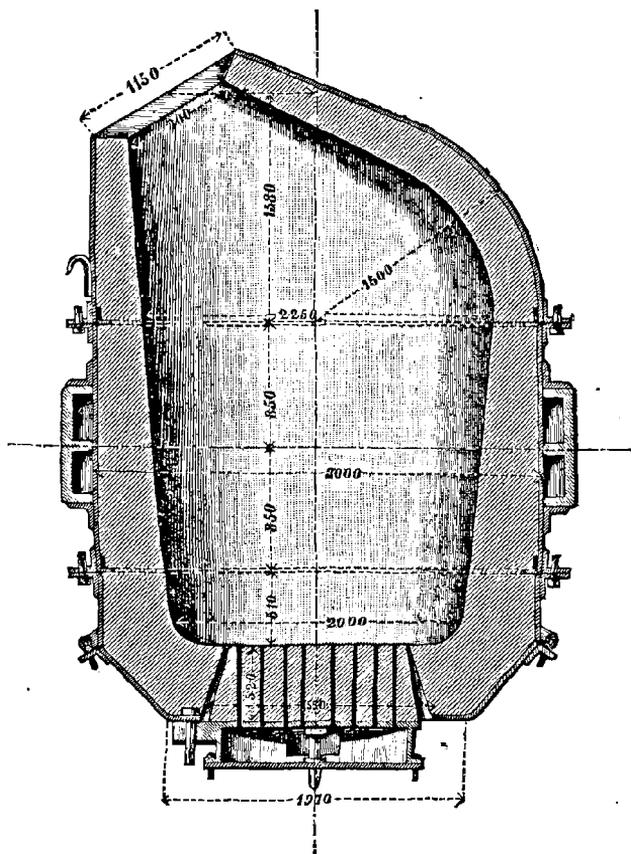


FIG. 80. — Cornue Bessemer.

qu'à partir de ce moment il n'y a plus d'élément combustible, la masse se refroidirait ou l'on brûlerait du fer.

A ce moment, si l'on coulait tout de suite l'acier fondu qui reste dans la cornue, il serait de qualité détestable ; ce n'est pas

un métal pur, c'est une sorte d'émulsion de fer et d'oxyde qui y sont restés mélangés et dissous. Ici, comme dans tous les procédés ordinaires d'affinage des métaux, il faut compléter l'opération en réduisant l'oxyde que l'on a produit en excès.

Rôle du manganèse. — Le procédé Bessemer n'est devenu pratique que lorsqu'on a découvert l'agent de raffinage indispensable, c'est-à-dire un corps capable de jouer ce rôle réducteur par rapport à l'oxyde de fer. C'est le manganèse que l'on introduit sous forme de *Spiegeleisen* ou de ferro-manganèse; cette fonte contient à la fois du manganèse et du carbone et joue un double rôle. Le manganèse réduit l'oxyde de fer et se substitue à ce métal dans la scorie qui devient plus fusible. C'est donc lui qui opère le raffinage. Le carbone se dissout dans le bain et s'allie au fer de manière à régénérer un acier dont on peut régler la composition par la dose de réactif que l'on ajoute.

On verse dans la cornue le *Spiegeleisen* préalablement fondu ou on l'y jette en morceaux que l'on a chauffés à blanc. On lève l'appareil un instant pour donner un peu de vent et opérer une sorte de brassage, puis on peut le renverser et couler l'acier dans de grandes lingotières en fonte rangées tout autour d'une fosse. Ces lingotières ont en général la forme de grands prismes de section à peu près carrée; le bloc qui s'y solidifie est repris ensuite pour être martelé et forgé.

Les premières cornues Bessemer employées ne contenaient que de 3 à 5 tonnes de fonte; aujourd'hui, on en fait de 10 à 12 tonnes. Chaque opération dure moins d'une demi-heure. Toutes les manœuvres se font mécaniquement; les tourillons de l'appareil sont actionnés par un mécanisme hydraulique.

Le contremaître, placé sur un banc qui domine tout l'atelier, a sous la main les robinets qui lui permettent de régler les admissions d'eau et de renverser ou de redresser à volonté la cornue. A la fin, on verse toute la charge dans une poche qui est portée aussi par une grue hydraulique, et cette poche vient se

placer successivement au-dessus de chaque lingotière pour la remplir.

La grande masse sur laquelle on opère, la rapidité des réactions expliquent pourquoi la chaleur produite est utilisée, tandis qu'elle se perdait complètement dans les anciens fours. Au four à puddler on met plus d'une heure à affiner 220 kilogrammes. Dans le convertisseur, on traite pendant le même temps 20, 30, quelquefois 40 tonnes de fonte. On produit donc cent fois plus de chaleur du même

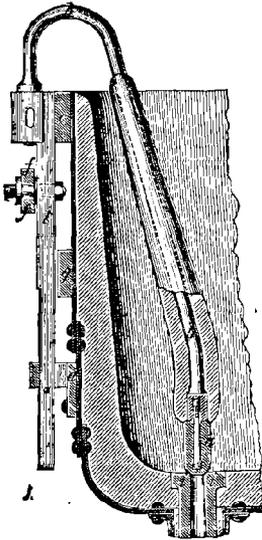


FIG. 82. — Levier à quenouille.

coup, et cependant l'appareil ne présente pas beaucoup plus de surface extérieure au rayonnement; cette

cause de refroidissement n'a donc plus qu'une action insignifiante. Tandis que le four à puddler, qui rayonnait dans l'air plus de chaleur que ne lui en fournissaient les réactions intérieures, avait besoin d'être réchauffé par un foyer sans pouvoir cependant atteindre la température de fusion du fer, le convertisseur, qui ne perd par rayonnement qu'une très faible partie de la chaleur produite, n'a plus besoin d'en emprunter à un foyer auxiliaire et peut s'échauffer spontanément jusqu'à des températures que des foyers ordinaires n'atteignent pas.

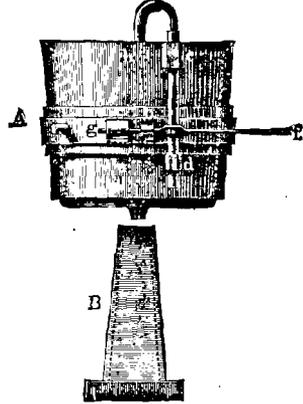


FIG. 81. — Poche pour la coulée de l'acier Bessemer.

La poche vient se placer successivement au-dessus de chaque lingotière (B). Le levier à quenouille, tige de fer recourbée et revêtue d'un manchon d'argile réfractaire, sert à déboucher ou à fermer l'orifice par lequel s'écoule l'acier. On soutire ainsi le métal en laissant les scories, qui surnagent à la surface du bain.

La rapidité de la réaction s'explique du reste par le contact intime du vent qui pénètre le métal fondu de tous les côtés et forme avec lui une sorte d'émulsion.

Il faut remarquer que, si l'appareil marche sans foyer, il exige une force motrice considérable et qu'il faudra brûler du charbon aux chaudières ; c'est la machine soufflante qui ici devient en quelque sorte la créatrice de chaleur en activant les réactions par son travail mécanique.

Fabrication des diverses nuances d'acier. — Au début, le procédé Bessemer ne pouvait guère donner que des aciers de dureté moyenne. Au moment où l'on arrête le soufflage, le métal contient environ 2 millièmes de carbone et on lui en ajoute encore sous forme de fonte manganésée. Comme il faut une certaine quantité de manganèse pour réaliser le raffinage et que ces fontes contiennent forcément 5 pour 100 de carbone, il est difficile d'obtenir des aciers très peu carburés, c'est-à-dire très doux. Pour réduire la proportion définitive de carbone, il faut employer un réactif relativement très riche en manganèse.

C'est pour cela que l'on a cherché aux hauts fourneaux à fabriquer des fontes manganésées de plus en plus riches. On est arrivé, après de grandes difficultés, à obtenir des ferro-manganèses jusqu'à 80 pour 100. On peut alors en ajouter très peu et par suite n'introduire que des traces de carbone supplémentaire. C'est de cette manière qu'on est arrivé progressivement à fabriquer des aciers qui contiennent parfois moins de 2 millièmes de carbone et que l'on peut considérer à peu près comme du fer fondu.

Il faut remarquer que ces métaux contiennent toujours une certaine proportion de manganèse et en général d'autant plus qu'ils sont moins riches en carbone. Les aciers doux tiennent, d'ordinaire, plus de 5 millièmes de manganèse. C'est donc une sorte de métal nouveau ; il ne prend pas la trempe lorsqu'il est très peu carburé ; il a presque la douceur du fer, mais il possède une résistance un peu plus grande.

Les aciers ordinaires ou mi-durs que l'on emploie pour la plupart des travaux de grosse forge, comme par exemple pour les rails, doivent leur dureté à la fois au carbone et au manganèse, et c'est par un dosage convenable de ces deux corps que l'on obtient les qualités les plus propres à chaque usage. On peut ainsi obtenir toute une gamme de métaux offrant toutes les nuances de dureté, au lieu des deux types extrêmes, l'acier dur et le fer doux, qui étaient les seuls que possédât l'ancienne industrie.

Conditions économiques. — Grâce au développement progressif de l'outillage, l'acier Bessemer, qui, dans les premiers temps, coûtait beaucoup plus cher que le fer, s'obtient aujourd'hui à des prix à peu près égaux, même quelquefois un peu inférieurs. Il ne faut guère plus de 20 francs pour transformer 1 tonne de fonte en acier, et, quand il s'agit de produits courants fabriqués en quantités considérables, comme les rails, le métal Bessemer peut revenir à moins de 11 francs les 100 kilogrammes, alors que les pièces en fer forgé coûtent rarement moins de 14 francs.

PROCÉDÉ MARTIN.

Four à régénérateurs. — Le procédé Martin, qui s'est développé parallèlement avec le Bessemer, en est le complément indispensable. Il a d'abord été une méthode de fusion de l'acier.

Le four Martin-Siemens est une espèce de four à réverbère dont la sole creusée en forme de bassin repose sur un grand soubassement en maçonnerie dans lequel sont pratiquées quatre chambres pleines de briques empilées à claire-voie. Ces chambres sont les régénérateurs destinés à utiliser la chaleur perdue du four pour surchauffer le gaz et l'air. A chaque instant, deux de ces chambres, celles de droite, par exemple, sont traversées par les flammes qui sortent du four et qui circulent à travers l'empilage de briques avant d'arriver à la cheminée. Les briques sont ainsi

portées peu à peu jusqu'au blanc. Les deux autres chambres qui ont été chauffées pendant une période précédente sont traversées l'une par les gaz combustibles qui viennent d'une batterie de gazogènes située à une certaine distance du four, l'autre par l'air

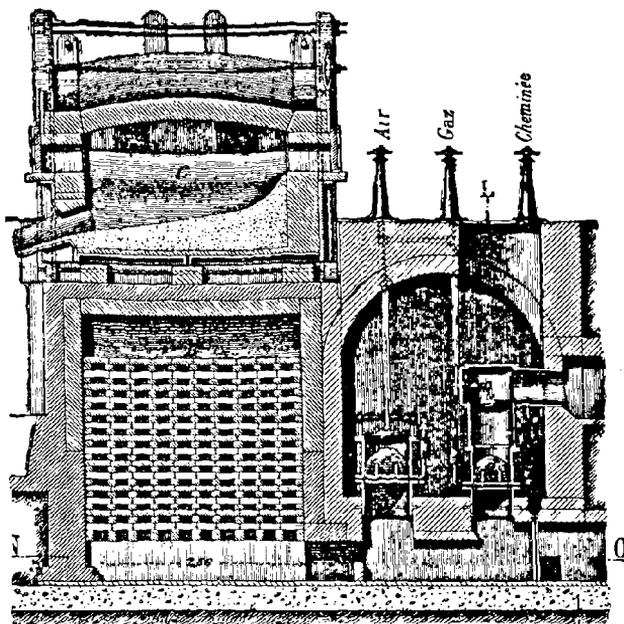


FIG. 83. — Four Martin, Coupe transversale.

qui doit servir à la combustion. Cet air et ce gaz sortent des chambres par des conduits séparés qui viennent déboucher dans le four; ils s'y réunissent et s'y allument en produisant une flamme très longue et très chaude, grâce à la température élevée que les gaz possédaient déjà.

Des valves spéciales permettent à volonté de retourner le sens du courant. Au bout d'un certain temps on enverra les flammes

dans les chambres de gauche pour les réchauffer, tandis que l'air et le gaz traverseront les chambres de droite et y emprunteront, pour la rapporter dans le four, la chaleur qu'elles ont emmagasinée pendant la période précédente.

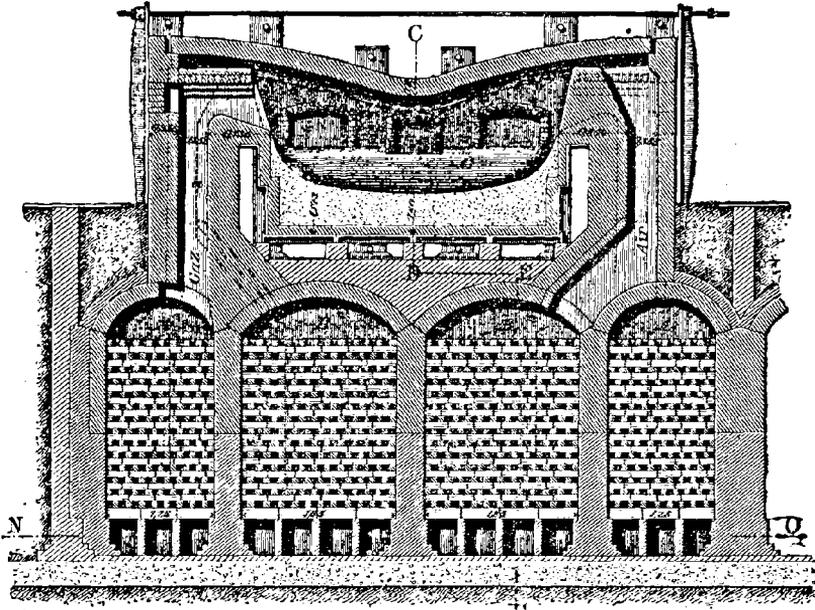


FIG. 84. — Four Martin. Coupe longitudinale.

Cet appareil permet de chauffer de grandes enceintes jusqu'au blanc éblouissant et de fondre dans le bassin de grandes masses d'acier. Les fours Martin ordinaires peuvent fondre à la fois une dizaine de tonnes. On en a construit qui contiennent jusqu'à 30 et même 50 tonnes. La fusion s'obtient avec une consommation de combustible relativement faible. On est arrivé à brûler dans les gazogènes moins de 500 kilogrammes par tonne d'acier fondu. -

Marche de l'opération. — Si l'on charge dans le four Martin des lingots d'acier, ils fondront lentement et l'on obtiendra un bain dont la composition sera à peu près celle du métal chargé. Néanmoins il y aura un peu moins de carbone parce que l'atmosphère dans le four est toujours un peu oxydante et une partie des éléments les plus combustibles s'y brûlent.

Au lieu de charger des lingots d'acier, on charge, en général, un mélange de fonte et de fer, dosé de manière à assurer la teneur moyenne de carbone que l'on veut obtenir. Une fois le bain en fusion, on prolonge l'opération jusqu'à ce que le carbone soit réduit à quelques millièmes, ce dont on s'assure en prenant des éprouvettes. L'opération est du reste très lente, et il faut huit ou dix heures pour traiter une charge; il se produit une certaine quantité de scories à cause du silicium de la fonte. Mais ici on cherche à employer les fontes les moins siliceuses, puisque le four est chauffé et que l'on n'a pas besoin que la fonte apporte par elle-même les éléments calorifiques nécessaires comme au Bessemer. Une fois le métal suffisamment décarburé, on ajoute du ferro-manganèse pour le raffiner et on le coule en perçant un trou pratiqué dans la paroi à la hauteur du fond du bassin.

Sous cette forme, le four Martin est un appareil de fusion plutôt que d'affinage; il devient le complément du Bessemer, parce qu'on peut y repasser tous les déchets d'acier, comme les scraps ou gâteaux solidifiés que l'on retrouve au fond des couches de coulée, les chutes, c'est-à-dire tous les fragments que l'on est obligé de couper aux pièces finies pendant le travail de forge; mais on ne peut pas se servir de ce procédé pour affiner de la fonte seule, l'oxydation serait démesurément longue. Il faut ajouter une certaine proportion de fer, c'est-à-dire de métal déjà affiné par une autre méthode pour diminuer la teneur du mélange en carbone.

Ore-process. — On a cherché à augmenter la quantité de fonte que l'on peut charger au four Martin, en y ajoutant du fer oxydé qui hâte l'élimination du carbone. Les riblons de forge sont

généralement rouillés et introduisent déjà une certaine proportion d'oxyde; cet oxyde réagit sur le carbone de la fonte comme dans le puddlage et il se réduit avec dégagement d'oxyde de carbone. On peut activer davantage encore la décarburation si l'on charge dans les fours des minerais purs; c'est ce qu'on appelle l'*ore-process*, pratiqué surtout en Angleterre. On peut alors, à la rigueur, supprimer toute addition de fer.

Après avoir fondu la fonte, on lui incorpore progressivement des morceaux de minerai. Il se forme une grande quantité de scories et le carbone s'élimine par réaction sur l'oxyde de ces scories. La méthode devient alors un véritable affinage de la fonte combiné avec une sorte de réduction directe des minerais. On peut obtenir le fer ou l'acier sans employer d'autre matière première que les minerais et la fonte, et par suite une partie des minerais les plus riches, chargés directement dans le four Martin, donnent du fer qui n'a pas passé par l'état intermédiaire de fonte.

L'*ore-process* est assez difficile à réussir dans les fours ordinaires parce que l'oxyde de fer ronge rapidement les soles en sable siliceux, mais il ne présente plus aucune difficulté avec les fours basiques.

Conditions économiques et avantages du procédé Martin. — L'affinage au Martin coûte un peu plus cher qu'au Bessemer, mais la différence n'est pas très grande. Dans des conditions comparables on peut compter 30 francs au lieu de 20 par tonne. En revanche, le procédé est peut-être plus souple et plus facile à manier : par suite de la lenteur des réactions, on les règle avec plus de sûreté et l'on obtient plus exactement la qualité voulue. On peut prendre des éprouvettes et arrêter juste au moment opportun parce que le métal se modifie lentement; le four étant chauffé permet les tâtonnements, les additions successives de réactifs, tandis qu'au Bessemer il faut saisir rapidement et du premier coup l'instant psychologique de la coulée, car il est impossible

d'y laisser séjourner le métal une fois que les éléments combustibles sont brûlés.

Le four Martin est donc en général préféré pour les fabrications délicates, comme celle des tôles de qualité supérieure,

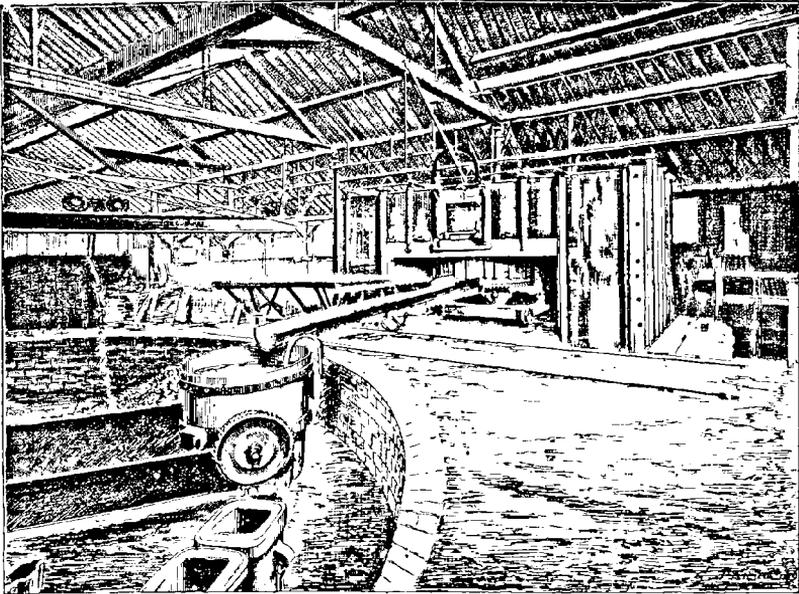


FIG. 85. — Four Martin-Pernod au moment de la coulée.

Dans ce four, la sole est amovible et indépendante du reste du four. Elle est constituée par une sorte de boîte cylindrique en tôle qui peut tourner autour de son axe, et portée sur un chariot qui vient se placer entre les conduites communiquant avec les chambres à gaz.

L'acier coule par un chénel dans la poche qui le distribue aux lingotières.

tandis que le procédé Bessemer sert surtout aux fabrications courantes où l'on cherche l'économie. Il est aussi plus facile de fondre dans le four Siemens des masses très considérables d'un seul coup. C'est par ce procédé que l'on fait le plus souvent l'acier destiné aux canons et aux blindages.

Types de fours récents. — Depuis leur invention, les fours Martin ont subi d'assez grandes transformations, qui cependant ne portent pas sur le principe, mais seulement sur les détails de forme et de construction. Autrefois, on faisait les voûtes surbaissées de manière à rabattre la flamme sur la sole; aujourd'hui, on donne aux voûtes une assez grande hauteur, ce qui facilite le chargement : la température sur la sole est tout aussi élevée; le gaz et l'air traversent le four beaucoup plus lentement, ils s'y mélangent et s'y brûlent bien mieux que dans les laboratoires bas, où ils formaient un courant rapide par suite de la faible section offerte à leur passage; les voûtes, dans ces conditions, résistent beaucoup plus longtemps.

Dans beaucoup de fours modernes, au lieu de placer les chambres en brique au-dessous, on les a placées des deux côtés, dans des constructions indépendantes. Parfois le four est entouré de quatre grandes tours contenant les quatre régénérateurs, qui ont alors la forme de ruches circulaires analogues aux appareils à chauffer l'air des hauts fourneaux. Les gaz passent de ces régénérateurs dans les fours au moyen de conduits en brique entourés de tôle, qui viennent déboucher dans la voûte du four. Toutes les parties de la construction sont alors indépendantes, plus faciles à visiter et à réparer.

En Amérique, on a construit d'immenses fours Martin où le laboratoire a la forme d'une espèce de berceau porté sur des galets. On peut le faire osciller de manière à incliner la sole et à verser successivement la scorie et le métal par la porte; on évite alors les pertes de temps qui se produisent dans les fours ordinaires quand il faut percer le trou de coulée.

Développement de l'emploi de l'acier fondu. — Ce n'est qu'après l'invention de Bessemer que la plupart des grandes usines se sont organisées pour appliquer ce procédé, et le métal nouveau s'est tout d'abord substitué au fer pour la fabrication des rails. Après la guerre de 1870, l'acier fondu a trouvé un nouveau débou-

ché dans la fabrication des canons et des blindages. Jusqu'à cette époque les canons étaient en fonte ou en bronze. Les fameux canons Krupp, en acier fondu, qui ont fait la grande supériorité de l'armement prussien, étaient coulés avec de l'acier fabriqué au creuset.

Grâce à la discipline merveilleuse qui règne dans ses usines, Krupp était arrivé à organiser des ateliers où l'on chauffait à la fois dans plusieurs fours une véritable armée de creusets qui se trouvaient prêts tous ensemble pour verser à un signal donné leur contenu dans une fosse de coulée commune. Aussitôt que l'on eut pu voir de près ces canons, les usines françaises se mirent à l'œuvre pour les imiter, et pendant la guerre même on improvisait chez nous cette fabrication nouvelle, mais avec des procédés plus pratiques, et l'on arriva rapidement à obtenir au Bessemer ou au Martin les qualités de métal nécessaires pour fondre d'un seul bloc les canons de dimension moyenne, et les plus grands avec le contenu de deux ou trois fours Martin.

Depuis cette époque naquirent et se développèrent les grandes forges d'acier du centre de la France, comme celles du Creusot, de la Loire et de Montluçon.

Pendant un certain temps cette industrie resta confinée dans les districts où l'on traitait des minerais relativement purs. Le phosphore a été longtemps pour l'acier un ennemi intransigeant; quelques millièmes de phosphore suffisent à rendre l'acier cassant, et ce corps, qu'on savait éliminer à peu près au four à puddler, restait incorporé à l'acier produit par les procédés Bessemer ou Martin.

DÉPHOSPHORATION. — De longues recherches ont été faites pour réaliser la déphosphoration de l'acier.

Ce n'est que vers 1875 qu'elles ont abouti à un résultat réellement industriel par le procédé Thomas-Gilchrist, qui est une modification du Bessemer ordinaire.

Principes de l'affinage basique. — Pour éliminer le phosphore il faut le faire passer dans des scories basiques. Au four à puddler, il se forme des scories qui contiennent plus de 60 pour 100 d'oxyde de fer. Le phosphore s'y absorbe à l'état de phosphate. L'acide phosphorique y est combiné à l'oxyde de fer et y joue le même rôle que la silice dans les silicates. Pour que cette combinaison soit stable, il faut qu'il y ait un excès de base. Si, au contraire, ces phosphates se trouvent à chaud en présence d'une certaine quantité de silice, celle-ci se substitue à l'acide phosphorique, et ce dernier, n'étant plus retenu par son affinité pour les bases, peut être réduit par le charbon ; le phosphore libre repasse dans le fer. C'est ce qui se produisait forcément dans la cornue Bessemer ; le revêtement y est fait avec des terres siliceuses, qui sont les seules assez réfractaires pour résister à ces hautes températures. La scorie le ronge peu à peu et se sature toujours de silice.

Construction des convertisseurs basiques. — Le convertisseur Thomas-Gilchrist diffère des anciens appareils parce qu'il est construit en matériaux basiques, dans lesquels il n'entre presque pas de silice ; aussi désigne-t-on souvent ce procédé sous le nom de Bessemer basique, par opposition au Bessemer acide ou procédé ancien. La grande difficulté a été de construire un revêtement basique assez solide.

La chaux, qui est par excellence la matière à la fois basique et infusible que l'on peut trouver en grande quantité dans la nature, est friable ; elle tombe facilement en poudre. Thomas et Gilchrist ont réussi à préparer un garnissage résistant par l'emploi de la dolomie, c'est-à-dire des calcaires magnésiens ; comme ces matériaux contiennent toujours un peu de silice, en présence des deux bases, chaux et magnésie, il se forme un silicate triple qui est un peu moins infusible que les silicates de chaux simples. Ce composé se ramollit à une très haute température et sert de ciment pour agglomérer l'excès de chaux. La matière se fritte, c'est-à-dire qu'elle s'agglutine sans fondre complètement.

On commence par calciner les dolomies à très haute température, de façon à éliminer l'eau et l'acide carbonique. La chaux magnésienne qui en résulte est malaxée avec du goudron bouilli ; on ne peut pas en effet préparer la pâte avec de l'eau comme dans les constructions ordinaires, parce qu'en présence de l'eau la chaux se délite et tombe en poudre. On obtient ainsi un mélange plastique que l'on bat par couches pour garnir les parois des cornues, puis on le chauffe au blanc dans la cornue même, en y brûlant du coke avec le vent forcé. Cette calcination élimine les éléments volatils du goudron et provoque le frittage de la couche. On peut aussi mouler la pâte de dolomie en briques que l'on cuit dans des fours spéciaux et dont on se sert pour faire les fonds des convertisseurs.

Procédé Thomas-Gilchrist. — Une fois en possession d'un appareil dans lequel les scories basiques ne trouvent plus d'éléments siliceux pour les dénaturer, il est facile de conduire l'affinage de manière à déphosphorer le métal. L'opération se fait à peu près comme à l'ordinaire, sauf que l'on ajoute dans la cornue des fragments de chaux chauffés au rouge : cette base se combine à la scorie et sature la silice produite par l'oxydation du silicium de la fonte. De temps en temps, on fait écouler ces scories, qui sont en très grande quantité.

La combustion du carbone se produit comme dans les opérations ordinaires ; mais, à la fin, lorsque la flamme tombe, le phosphore n'est pas encore tout à fait éliminé, il faut prolonger l'opération et souffler encore pendant quelque temps : c'est ce qu'on appelle le *sursoufflage*. Le phosphore ne brûle complètement qu'après le départ du carbone, et pendant cette dernière période c'est lui seul qui joue le rôle d'agent calorifique.

Aussi se présente-t-il un fait inattendu : le procédé ne réussit bien que si les fontes sont assez riches en phosphore. S'il y avait très peu de phosphore, on n'arriverait pas à l'éliminer parce qu'on ne pourrait pas sursouffler ; le bain se refroidirait. S'il y a assez de

phosphore, sa combustion pendant le sursoufflage permet de prolonger l'opération sans inconvénient.

Aucun phénomène extérieur n'avertit du départ complet du phosphore. On prélève de temps en temps, avec une sorte de cuillère portée au bout d'une longue tige, de petits fragments de métal, on les martèle en forme de disques, que l'on plie et brise au marteau : l'aspect de la cassure permet de voir le moment où le fer est pur, l'acier phosphoreux ayant un grain cristallin caractéristique.

Quand le résultat est obtenu, on coule les scories et l'on ajoute du ferro-manganèse. Cette fin de l'opération est délicate : le carbone du réactif tend à réduire les phosphates et à réintégrer du phosphore dans le métal. Il faut donc que les scories aient été d'abord coulées avec grand soin, que le bain soit parfaitement décrassé. Cette difficulté est d'autant plus grande qu'on ajoute plus de carbone. Aussi le procédé Thomas se prête-t-il tout spécialement à la fabrication des aciers extra-doux parce qu'il est plus facile de bien déphosphorer quand on emploie comme addition du ferro-manganèse et que l'on introduit très peu de carbone.

Le procédé Thomas a coûté au début un peu plus que le Bessemer ordinaire ; les opérations sont un peu plus longues, exigent l'emploi de matériaux basiques de premier choix dont on fait une consommation assez considérable. Mais, depuis qu'on a eu l'idée d'utiliser comme engrais les scories phosphatées, la vente de ce sous-produit a permis de réaliser une économie très sensible et le prix de revient ainsi diminué est devenu souvent inférieur à celui de l'acier Bessemer.

C'est là un motif de plus qui donne aux fontes très phosphoreuses, tout à fait décriées autrefois, une valeur spéciale. Plus il y a de phosphore, plus les scories acquièrent de valeur pour l'agriculture ; avec des fontes trop peu phosphoreuses les scories seraient pauvres et ne pourraient plus se vendre comme engrais.

Déplacement de l'industrie de l'acier en France. — L'apparition de ce nouveau procédé a provoqué encore une transformation

et un déplacement de la métallurgie de l'acier. Autrefois, en France, le district de l'Est ne faisait que du fer forgé, parce qu'il ne possédait que des minerais phosphoreux. La plupart des grandes usines à acier se trouvaient dans le Centre ou près des côtes. Elles utilisaient principalement les minerais riches et purs qu'on faisait venir d'Algérie, d'Espagne, de l'île d'Elbe, et que l'on traitait dans les bassins houillers disposant de combustibles propres au travail des forges.

Avec le procédé Thomas-Gilchrist, les minerais purs ont perdu leur supériorité. Un grand nombre d'aciéries ont surgi dans la région de Nancy, où les minerais phosphoreux ne coûtent presque rien. Les grands hauts fourneaux s'y sont multipliés, et ceux du centre se sont éteints. Les anciennes aciéries, qui ne pouvaient produire la fonte qu'à beaucoup plus grands frais, s'alimentent aujourd'hui avec des fontes venues de la Moselle ; souvent même elles ne font plus que travailler des lingots d'acier fabriqués dans les aciéries de ce dernier pays. Si elles peuvent encore lutter, c'est grâce aux fabrications spéciales où leur expérience et leur puissant outillage leur assurent encore la supériorité.

Quand il s'agit de forger des lingots de 100 tonnes, la consommation de charbon est considérable. Les manœuvres sont difficiles ; il faut un outillage colossal et un personnel bien dressé. Il faut aussi des tours de main et une expérience consommée pour réussir certaines fabrications difficiles, pour satisfaire aux exigences de la guerre et de la marine, qui réclament des qualités d'acier multiples, déterminées chacune par des conditions et des essais rigoureux. Tout cela ne s'improvise pas. Les nouvelles aciéries n'ont pas encore cherché à enlever aux anciennes la fabrication des canons, des blindages, des obus, mais elles ont accaparé complètement celle des produits courants, comme les rails. Il est à prévoir qu'elles continueront à se développer et prendront progressivement le pas dans toutes les branches de l'industrie.

Il ne faudrait peut-être qu'une période d'arrêt dans la fièvre d'armement qui sévit en Europe pour que les grandes forges du

Centre fussent obligées de fermer ou, du moins, de réduire beaucoup leur production. Le Creusot, qui était autrefois un grand producteur de métal, s'est transformé plutôt en usine de construction. La fabrication des machines de toute espèce est devenue la branche principale de son activité.

Qualités particulières des aciers basiques. — Les procédés Thomas-Gilchrist ont aussi produit une variété de métal un peu nouvelle. L'affinage basique permet d'obtenir du fer fondu plus doux; par suite du sursoufflage, on oxyde plus de fer et l'on brûle la totalité du carbone. On arrive alors à obtenir des métaux qui contiennent à peine 1 millième de carbone. Ce sont ceux qui se rapprochent le plus du fer forgé par leur composition chimique.

Ils allient à une douceur extrême les avantages de l'homogénéité propre aux métaux fondus. Ils sont aussi malléables et un peu plus résistants que le fer ordinaire. Ce genre de métal convient très bien pour les poutrelles, pour toutes les pièces employées dans les constructions métalliques, ainsi que pour les tôles où l'on recherche aussi la douceur.

Aujourd'hui, l'acier Thomas représente à peu près la moitié de l'acier fondu en France. On le fabrique presque exclusivement dans l'Est. Les usines du Nord (Denain, Valenciennes) et les aciéries situées sur les côtes, comme celles d'Isbergues (près Boulogne), de Trignac (près Saint-Nazaire) et du Boucaut (près Bayonne), continuent à employer le Bessemer acide, parce qu'elles sont alimentées avec les minerais purs d'Espagne. Leur situation leur permet encore d'avoir la fonte assez bon marché; ce mode de fabrication convient surtout aux aciers mi-durs, comme ceux qui sont employés pour les rails.

Déphosphoration sur sole. — Les revêtements basiques peuvent s'appliquer au four Martin comme au convertisseur Bessemer, ils s'y adaptent même plus facilement. Le garnissage de la sole n'a pas à résister aux mêmes causes de destruction que les parois

verticales des cornues, il est bien soutenu et n'a à supporter qu'un bain de métal immobile au lieu des soubresauts et des chocs que donne dans le convertisseur la fonte soulevée par le vent. On garnit les soles du Martin basique avec de la dolomie ou encore de la magnésie pure ; on arrive même à faire des revêtements qui tiennent avec un mélange de chaux et d'oxyde de fer.

Dans le four ainsi garni, on peut travailler avec des scories très peu siliceuses et réaliser la déphosphoration ; il suffit d'ajouter une certaine quantité de chaux pour saturer la silice et de prolonger le chauffage quelque temps après la décarburation. Ce système s'est rapidement répandu en France, plus vite même que le procédé Thomas-Gilchrist. Il est actuellement employé presque partout. Il sert spécialement à traiter les fontes peu phosphoreuses qui, pour les raisons indiquées plus haut, ne réussiraient pas au convertisseur, et qui, traitées par les procédés acides, donneraient du métal de mauvaise qualité.

Même lorsqu'on a des fontes relativement pures, l'affinage basique peut être préférable ; il donnera des aciers de meilleure qualité, parce qu'il est rare que les minerais les plus purs soient tout à fait exempts de phosphore. En outre, il se prête mieux que l'affinage sur sole acide à l'obtention d'acier extra-doux ; cela, parce que l'oxydation y est plus complète. Enfin, les fours basiques atteignent des températures un peu supérieures à celles des fours acides, probablement parce que leurs revêtements sont moins perméables à la chaleur et la conservent mieux. Il est plus facile d'y fondre le fer presque pur, opération exigeant une température qui représente pour ainsi dire la limite de l'énergie calorifique du four Siemens. C'est au Martin basique que l'on fabrique le plus souvent les tôles de chaudière, pour lesquelles il faut un métal d'une douceur exceptionnelle.

CHAPITRE IV

TRAVAIL DE L'ACIER

Laminage. — Martelage au pilon et à la presse. — Effets du travail sur la qualité de l'acier. — Trempes et recuits.

Forgeage de l'acier. — Le plus souvent l'acier fondu est coulé en lingots prismatiques et c'est par un travail de forge, quelquefois très long, qu'on donne aux pièces leur forme définitive. Le forgeage de l'acier exige relativement plus de force que celui du fer, et les réchauffages doivent se faire à une température un peu plus modérée. Ce métal se brûle quand il est chauffé au blanc. Sa structure et ses propriétés se modifient sous l'influence d'une température exagérée.

L'outillage employé pour forger l'acier est à peu près le même que pour le fer ; mais il a fallu augmenter sa puissance à mesure qu'on travaillait des blocs de plus en plus volumineux.

Réchauffage. — Les fours à réchauffer sont souvent des fours à gaz ; ils sont munis de grandes portes, occupant presque tout un côté ; parfois la voûte est faite en deux parties, qui peuvent se déplacer sur des rouleaux, de manière à l'ouvrir complètement et à retirer les lingots par le haut. Lorsque les lingots ne sont pas trop volumineux, comme dans la fabrication des rails, on emploie des fours allongés où on les introduit par l'extrémité, et on les rapproche peu à peu du foyer en les faisant basculer sur leurs arêtes chaque fois qu'on les avance, de manière à les chauffer progressivement et d'une manière égale sur chaque face. Quand il s'agit de grandes masses, comme les blindages et les canons, on les place sur des supports isolés, sur des dés en terre réfractaire,

de manière que la flamme puisse passer au-dessus et au-dessous. L'uniformité et la lenteur du réchauffage ont une grande

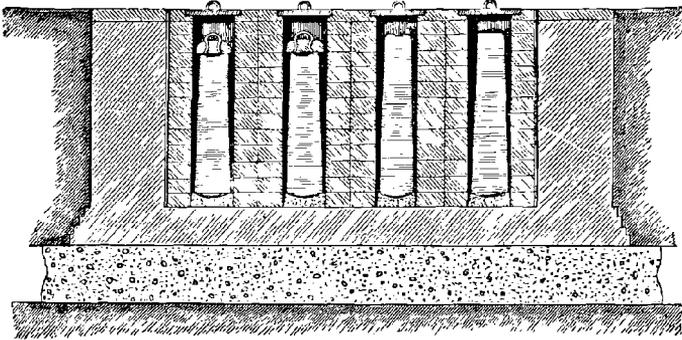


FIG. 86. — Puits Giers (coupe).

importance ; si ces conditions n'étaient pas réalisées, on brûlerait les arêtes extérieures avant que la chaleur eût pénétré jusqu'au cœur.

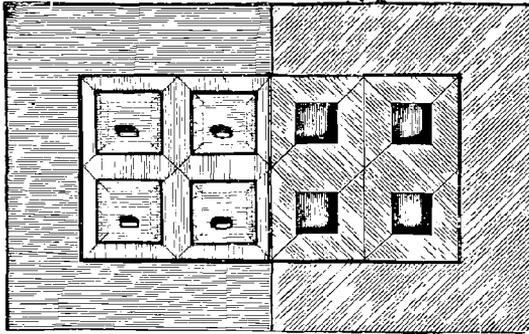


FIG. 87. — Puits Giers (plan).

On est arrivé pour certaines fabrications à supprimer à peu près le premier réchauffage et à utiliser la chaleur que contient l'acier fondu au sortir du four.

On ne peut pas travailler directement le lingot encore rouge aussitôt après sa solidification, parce que sa température serait inégale et irrégulière, et, si l'on entasse les lingots chauds dans des cellules en maçonnerie enterrées dans le sol, leur chaleur s'y conserve et s'y égalise. Au bout d'un certain temps, toute la masse de maçonnerie énergiquement chauffée constitue un régulateur ; elle conserve toujours la même température et, après avoir séjourné dans ces cellules, le lingot se trouve exactement au point convenable pour être forgé ; on peut l'y reprendre quand on veut, suivant les besoins du travail. Ces appareils sont connus sous le nom de puits-Giers.

Les procédés de travail peuvent se diviser en deux catégories principales, le laminage et le martelage.

LAMINAGE

Parmi les fabrications industrielles les plus importantes il y en a qui peuvent se faire complètement au laminoir ; c'est le cas des pièces de forme régulière, comme les tôles ou les fers profilés, tels que les rails et les poutrelles ; les tôles se font en comprimant le lingot par le laminage entre deux cylindres lisses. On le fait passer un grand nombre de fois en rapprochant peu à peu le cylindre supérieur au moyen de vis de pression. A chaque passage, la tôle s'allonge et s'amincit. Dans les anciens laminoirs, les cylindres tournaient toujours dans le même sens ; après les avoir traversés, la tôle devait être envoyée de l'autre côté, en la faisant passer par-dessus le cylindre supérieur, avant de pouvoir l'engager pour un second laminage. Aujourd'hui on emploie pour les grosses tôles des laminoirs réversibles, c'est-à-dire qu'après chaque passage on change le sens de rotation ; la tôle revient en arrière et se lamine alternativement dans les deux sens. De chaque côté du laminoir se trouvent des tabliers munis de rouleaux sur lesquels la tôle peut rouler facilement. Souvent ces rouleaux peuvent être mis tous en mouvement par une machine,

de manière qu'ils charrient la tôle automatiquement, l'approchent du train et la remportent.

Les rails et les fers profilés se font dans des laminaires à cannelures, c'est-à-dire que les deux cylindres se touchent et sont creusés d'encoches de forme déterminée entre lesquelles on peut faire passer la pièce à laminer.

Chaque train porte une série de cannelures dont les dimensions diminuent à mesure que leur forme se rapproche du profil définitif. Le lingot est présenté d'abord aux plus grandes cannelures, que l'on appelle cannelures ébaucheuses, qui le compriment et l'allongent en barres. Puis il passe dans une série de cannelures de plus en plus petites qui continuent à l'allonger et à lui donner la forme voulue. On peut employer aussi, pour activer le travail, des laminaires réversibles, ou encore des trios, c'est-à-dire des trains composés de trois cylindres superposés à travers lesquels la barre va et vient, passant dans un sens entre les deux cylindres inférieurs et dans l'autre entre les deux cylindres supérieurs.

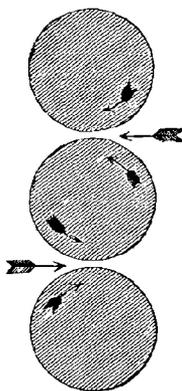


FIG. 88.
Laminage en trio.

Dans les installations les plus récentes, tous les mouvements nécessaires au transport des lingots et aux manipulations pendant le laminage se font mécaniquement. Le lingot est placé sur de grandes tables à rouleaux mobiles qui le charrient jusqu'au laminaire, des crochets le saisissent après chaque passage pour le pousser de côté en face de chaque cannelure qu'il doit traverser.

Le mouvement de va-et-vient s'obtient en changeant le sens des rouleaux porteurs; au lieu de mettre comme autrefois un grand nombre de cannelures sur chaque cylindre, on emploie plusieurs trains placés en face les uns des autres, et les lingots sont charriés automatiquement à travers toute cette suite de laminaires, de manière qu'il peut y en avoir plusieurs en travail à la fois.

Grâce à ces différents moyens, on a pu activer le travail, éviter les réchauffages intermédiaires qui étaient nécessaires et duraient assez longtemps pour laisser la barre se refroidir.

On est arrivé à construire des laminoirs qui peuvent passer plusieurs centaines de tonnes par jour. Mais ces installations coûteuses ne sont naturellement possibles que pour les fabrications où l'on a à faire en très grande quantité des pièces de même nature.

On a réalisé aussi de grandes économies en travaillant des lingots de plus en plus volumineux et en laminant des barres très longues que l'on débite ensuite avec des scies ou des cisailles. C'est ainsi qu'on lamine les rails en triple longueur, c'est-à-dire qu'on fabrique un rail de 20 ou 30 mètres de long dans lequel on en découpe trois. Dans les forges américaines on a étendu ce principe aux tôles : au lieu de laminer comme autrefois chaque feuill^e aux dimensions demandées, on part d'un lingot de 10 tonnes pour faire une plaque énorme où l'on découpe à la cisaille des feuilles de n'importe quelle forme. On y trouve un double avantage : le travail de ces gros lingots est relativement plus économique et plus rapide, car un train produit d'autant plus de tonnage qu'on y fait passer de plus grandes masses ; en outre, on diminue les déchets, car on est toujours obligé de couper les bords, les extrémités qui sont irrégulières et mal laminées : c'est ce qu'on appelle les chutes, et la proportion en est d'autant plus faible que la pièce sur laquelle on les prélève est plus grande.

Laminoir universel. — Pour les plaques très épaisses, comme les blindages, on emploie le laminoir universel, composé de deux paires de rouleaux, l'une horizontale, l'autre verticale ; devant les cylindres horizontaux sont placés deux cylindres verticaux entre lesquels la plaque s'engage aussitôt en sortant des deux premiers ; elle se lamine ainsi sur ses faces latérales. Ces quatre rouleaux peuvent se rapprocher progressivement et permettent de fabriquer des plaques de dimensions déterminées dont les faces

latérales sont parfaitement dressées au lieu d'être irrégulières comme il arrive quand on emploie seulement deux cylindres horizontaux.

Le même principe a été appliqué au laminage des fers profilés de grandes dimensions. En employant quatre rouleaux qui peuvent se rapprocher et s'engager les uns dans les autres, on peut laminer, sans cannelures, des poutrelles, des fers en croix : la disposition se comprend d'après les figures ci-jointes. Elle se prête à faire des pièces de dimensions variées avec le même train, en rapprochant plus ou moins les rouleaux, tandis qu'avec le procédé ordinaire il faut une série de cannelures et des cylindres spéciaux pour chaque type; elle convient du reste mieux pour les grands profils, car il n'est pas possible de creuser dans un cylindre des cannelures trop profondes.

On a créé encore une série de laminoirs spéciaux, pour les bandages, les tubes, etc. Mais la description de ces machines complexes nous entraînerait trop loin.

Fabrication des fils. — Le laminoir joue un rôle important dans la fabrication des fils. On commence par laminer des barres minces qui arrivent à prendre une très grande longueur; à la température à laquelle on travaille, c'est-à-dire au-dessus du rouge, une tige de fer mince et souple se plie facilement; aussi on termine le laminage *en serpentant*. Dès que la verge est assez amincie, on la saisit avec des pinces, on la replie sur elle-même pour engager l'extrémité dans de nouvelles cannelures; elle se trouve ainsi prise dans plusieurs cannelures à la fois et traverse plusieurs trains en décrivant une série de contours.

C'est un travail délicat et dangereux, qui exige des ouvriers très agiles; on l'a simplifié parfois en plaçant en face les uns des autres une série de laminoirs que la verge peut traverser tout en restant droite. A la sortie du dernier, elle s'enroule sur une bobine.

Le laminoir n'est pas un outil assez précis pour descendre la

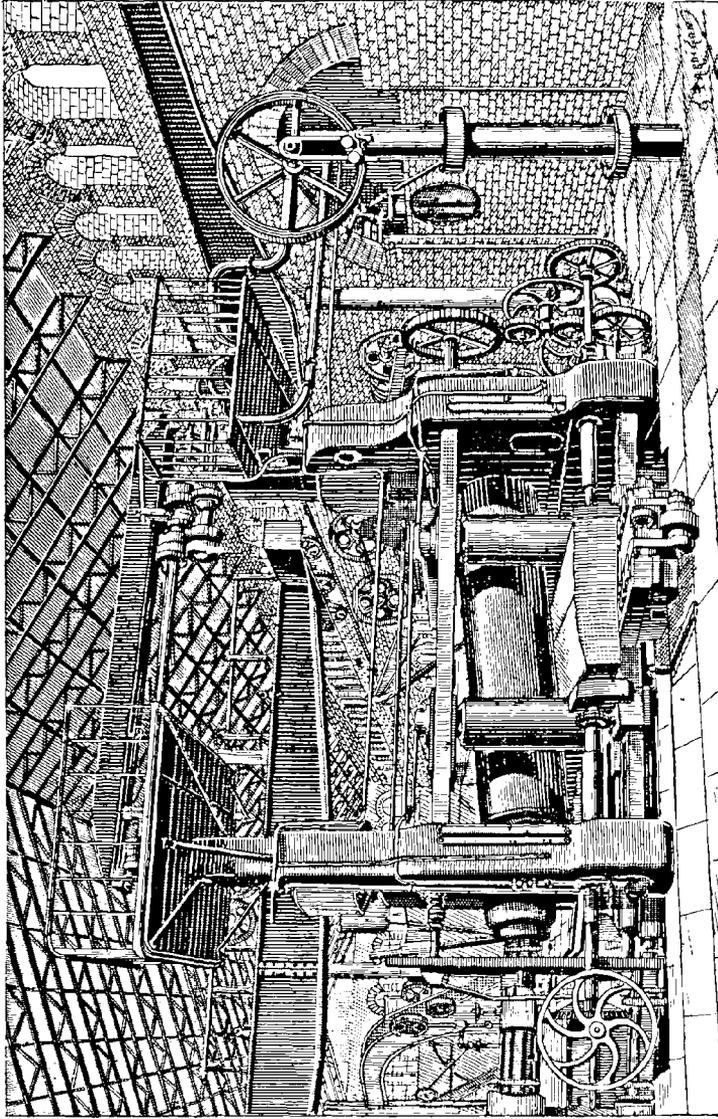


FIG. 89. — Laminoir universel de l'usine Saint-Jacques.

Les quatre rouleaux peuvent se rapprocher deux à deux; leurs consignes sont portés par des chariots à vis qu'on manœuvre avec les roues placées à droite. Le mécanisme de gauche permet de renverser le sens du mouvement de rotation pour repasser la plaque. — Ce train sert spécialement à laminier les blindages.

verge au-dessous de 6 à 7 millimètres de diamètre. Les gros fils ainsi ébauchés sont ce qu'on appelle la *machine*. Pour l'amener à l'état de fils fins, on l'étire à travers des filières, c'est-à-dire des plaques d'acier dur percées de trous étroits. Le fil enroulé sur une bobine est aminci à la lime par une extrémité, on l'engage dans la filière, on le saisit avec une pince et on le fixe à une autre bobine que l'on met en mouvement et sur laquelle le fil vient s'enrouler pendant que l'autre bobine se déroule. Ce travail se fait à froid, car un fil mince ne pourrait rester chaud à l'air, et, en outre, sa surface s'oxyderait trop. On ne réduit le diamètre que très progressivement et il faut un grand nombre de passages par des trous de plus en plus étroits. Ce traitement fatigue le métal, qui s'écroute et se casserait si l'on n'interrompait pas fréquemment pour recuire le fil en plaçant les bobines dans des boîtes en tôle, sur la sole d'un four chauffé au rouge faible. Souvent aussi on soumet le fil rouge à une trempé qui augmente sa résistance.

Ce travail, quand il est bien dirigé, donne au métal des qualités spéciales et une résistance bien supérieure à celle de l'acier en gros échantillons.

Étamage. — Les tôles minces et les fils reçoivent souvent dans les forges mêmes une dernière préparation : c'est la galvanisation ou l'étamage, qui consiste à revêtir le fer d'un enduit protecteur en le plongeant dans un bain de zinc ou d'étain, dont une couche mince se solidifie et adhère à la surface de la tôle. Les feuilles étamées, connues sous le nom de fer-blanc, s'emploient à faire des boîtes de toute sorte. Leur préparation, très simple en principe, exige des soins minutieux et des opérations multiples : si les feuilles n'étaient pas très bien dégrassées et parfaitement propres, l'enduit ne se formerait pas régulièrement. Autrefois l'étamage se faisait dans des petits ateliers spéciaux ; mais aujourd'hui la concurrence, la baisse des prix laissent si peu de marge au bénéfice que, pour s'assurer des débouchés, les grandes usines sont amenées à entreprendre peu à peu toutes les petites

fabrications et les élaborations accessoires de nature à mettre leur acier sous forme de produits marchands. Il y en a même qui ne se contentent pas d'étamer les tôles et qui les impriment en couleurs, pour livrer toutes prêtes les petites boîtes ornées d'inscriptions et de dessins dont le commerce fait grand usage aujourd'hui.

MARTELAGE

Le travail au marteau s'emploie pour les pièces de formes variées et irrégulières, qui ne pourraient pas être façonnées par l'action un peu automatique du laminoir. En retournant un bloc rouge sous le marteau, de manière à présenter successivement chaque point au choc, et en mesurant bien la force des coups, on peut obtenir n'importe quelle forme.

Parmi les grosses fabrications qui se font de cette manière, on peut citer les essieux, les arbres de machine, surtout les canons. C'est pour les gros canons de siège et de marine qu'on a été amené à construire des pilons monstres.

Travail à la presse. — Aujourd'hui on remplace souvent le pilon par la presse. En comprimant l'eau avec des pompes à haute pression dans un réservoir où se meut un large piston, on peut exercer un effort pour ainsi dire illimité. Si, par exemple, l'eau est comprimée à 100 atmosphères, chaque centimètre carré de surface du piston supporte un effort de 100 kilogrammes : un piston de 50 centimètres de diamètre transmettra dans ces conditions un effort total de 800 tonnes.

Les grandes presses à forger sont munies de jeux de pompe qui peuvent élever la pression de l'eau jusqu'à 400 atmosphères, et l'effort sur le piston peut s'élever à 4000 tonnes. Les plus grosses masses s'écrasent lentement sous ce poids formidable. La presse n'agit pas par chocs brusques comme le pilon : elle avance lentement et sans bruit, mais avec une force irrésistible : son action, au lieu de s'épuiser en un instant comme celle du pilon, est con-

tinué et ininterrompue, de sorte qu'en somme le travail avance plus vite.

L'appareil se compose de deux plates-formes massives réunies

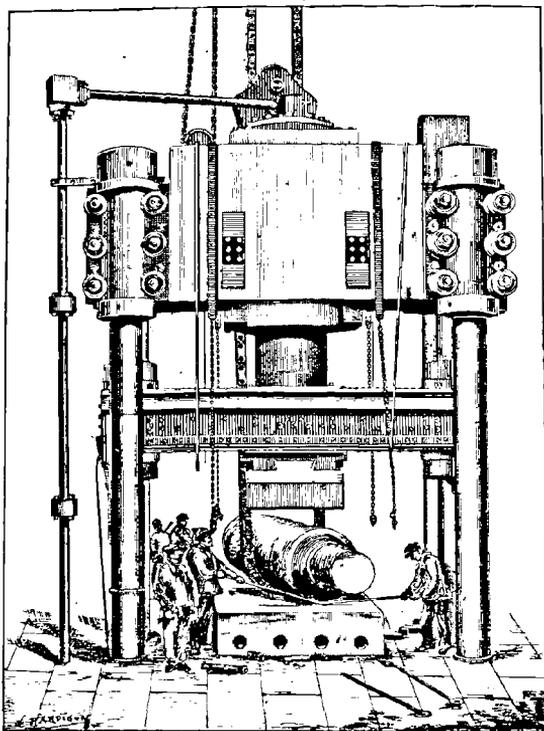


FIG. 90. — Presse de l'usine Saint-Jacques.

par quatre énormes montants. La plate-forme inférieure porte l'enclume, l'autre le cylindre hydraulique où se meut le piston, poussant une grande traverse qui glisse entre les montants et vient presser à volonté sur le lingot soumis au travail. Tous les efforts s'exerçant entre les deux plates-formes solidaires, les fondations

ne sont pas ébranlées comme par les chocs du pilon, et l'installation n'exige pas des substructions aussi coûteuses.

Outillage de manœuvre. — Le travail des grosses pièces exige un outillage spécial pour les manipuler. On soude au lingot une *queue* formée par une poutre de fer, sur laquelle on monte une grande roue à manettes; une équipe d'ouvriers s'y attelle pour guider la masse et la retourner sous le marteau. Des grues ou des ponts roulants supportent le fardeau et peuvent le transporter du four au marteau ou à la presse; il repose sur des chaînes pendantes que l'on peut enrouler, dérouler, de manière à soulever ou abaisser la pièce, à la faire tourner sur elle-même, etc. Pour la saisir ou la déposer dans le foyer, d'autres chaînes portent de grandes griffes articulées.

Toutes ces manœuvres sont lentes, et le succès et l'économie dépendent beaucoup de la précision avec laquelle elles sont exécutées. On ne peut marteler la pièce qu'un temps limité avant qu'elle se refroidisse, et ce temps ne permet de travailler qu'une partie, après quoi il faut la remettre au four avant de continuer; chaque réchauffage est très long; le forgeage d'une pièce de très grandes dimensions peut exiger dix, vingt réchauffages et durer autant de jours.

Utilité du forgeage. — On pourrait abréger ce travail fastidieux en coulant le lingot à des dimensions voisines de celles de la pièce finie; on ne le fait pas, parce que le forgeage a pour effet d'améliorer l'acier: il le rend plus compact, il écrase et referme les soufflures, les cavités qui se trouvent toujours dans un métal brut de coulée. Aussi on exige souvent que le lingot soit beaucoup plus large et moins long que la pièce finie, afin qu'il subisse un forgeage suffisant. Dans la fabrication des canons, on donne même au lingot un supplément de poids, et, après l'avoir allongé, on en coupe les deux extrémités avant d'achever le travail: on se débarasse ainsi des parties qui sont toujours moins bien venues à la

coulée. On éliminera encore, plus tard, les parties voisines de l'axe, qui sont celles où se rassemblent de préférence les soufflures lors de la coulée, car les canons sont forgés pleins, c'est en les forant avec des machines-outils qu'on pratique le vide intérieur.

Trempe et recuit. — Le travail mécanique n'est pas le seul moyen d'améliorer la qualité de l'acier. La trempe et le recuit jouent aujourd'hui un grand rôle dans beaucoup de fabrications.

Depuis longtemps on se sert de la trempe pour durcir les outils, les armes et toute sorte de petites pièces. On plonge l'acier dans l'eau froide après l'avoir chauffé au rouge cerise : ce refroidissement brusque donne aux aciers très carburés une dureté extrême ; on tempère cette dureté exagérée en recuisant le métal, c'est-à-dire en le chauffant lentement jusqu'à une température de 250 à 400 degrés. Suivant l'énergie et la durée du recuit, on corrige plus ou moins l'effet de la trempe.

Le mécanisme de ce phénomène mystérieux a été en partie élucidé par les recherches récentes, surtout par les travaux de MM. Osmond et Charpy. Dans l'acier très chaud, le fer et le carbone ne sont pas au même état que dans l'acier froid. Le fer n'est pas magnétique, et le carbone y est comme dissous ; il ne paraît pas y avoir combinaison chimique entre les deux éléments. Lorsque le métal se refroidit lentement, la combinaison se produit, le fer change d'état moléculaire et devient magnétique. Ces transformations se produisent à des températures déterminées qu'on appelle *points singuliers* et qui s'échelonnent, suivant la nature du métal, entre 600 et 750 degrés. Elles se manifestent par un dégagement de chaleur, et les aciers très carburés peuvent à ce moment se réchauffer spontanément et prendre tout à coup un vif éclat qui dure peu : c'est ce qu'on appelle la *recalcescence*. Ces phénomènes exigent un certain temps pour se produire. Si le refroidissement est instantané, si le métal ne reste pas un temps appréciable à ces températures critiques, les modifications ne se produisent

pas (1); l'acier reste à un état moléculaire anormal, avec des propriétés très différentes de l'acier ordinaire. Si on le recuisait au-dessus de 700 degrés, toutes les transformations se feraient cette fois et l'effet de la trempe serait détruit. Un recuit à température plus basse détruit seulement les effets nuisibles des tensions intérieures résultant d'une contraction trop brusque; si on le prolonge, les transformations se font très lentement à cette température insuffisante, et l'on tempère à volonté l'effet de la trempe.

Sur des aciers moins carburés, l'effet de la trempe est moins prononcé; il peut encore augmenter la résistance sans rendre le métal trop cassant. Pour les grosses pièces, comme les canons et les blindages, on emploie en général la trempe à l'huile, qui a une action plus douce, parce que le métal n'est refroidi qu'à 400 degrés, température où l'huile entre en ébullition. L'effet est à peu près celui d'une trempe suivie d'un recuit prolongé à 400 degrés. On a aussi employé la trempe au plomb fondu: le plomb est fusible à 320 degrés; on peut le surchauffer ainsi; la pièce plongée dans le bain de plomb se trouve re'roidie à une température que l'on peut fixer entre 400 et 600 degrés.

On trempe parfois les blindages ou les obus par aspersion, en arrosant d'eau la surface; si l'on interrompt l'arrosage, la chaleur conservée dans le reste de la pièce se communique à la surface, qui se recuit. On a à volonté une série de trempes superficielles alternant avec des recuits spontanés. On évite le danger de voir la pièce *taper à la trempe*, c'est-à-dire se fendre par suite d'une contraction trop brusque.

La trempe peut se combiner avec la cémentation: c'est ce qu'on appelle la trempe au paquet, employée depuis longtemps pour durcir la surface des limes, des coins de gravure ou d'autres petits objets. On chauffe la pièce empaquetée au milieu de charbon en poudre: les couches extérieures se carburent; puis on la

(1) Ce terme ne s'applique qu'à une partie des modifications, car l'acier redevient toujours magnétique à froid.

retire pour la tremper. On a ainsi une surface très dure, tandis que le corps reste moins carburé et ne devient pas cassant. On a appliqué récemment un procédé analogue au durcissement superficiel des blindages.

CHAPITRE V

EMPLOIS DIVERS DE L'ACIER

Aciers moulés. — Fabrication aux petits convertisseurs. — Aciers au nickel et au chrome. — Ferro-nickel. — Méthodes d'essai.

Moulages d'acier. — L'acier peut se mouler à peu près comme la fonte; cependant cette opération présente des difficultés qui ont longtemps empêché de faire de grands moulages: il faut des sables très choisis et bien préparés pour résister à la haute température où le métal doit être porté; les moulages sont souvent poreux; au moment où l'on verse l'acier fondu, il s'en dégage des gaz qui produisent une sorte d'ébullition, et quelque bulles peuvent rester au moment de la solidification, s'emprisonner dans le métal sous forme de soufflure. Cet inconvénient diminue quand l'acier est riche en manganèse et bien fluide. Si on laisse l'acier séjourner dans les creusets jusqu'à ce que l'ébullition se calme, on arrive à obtenir des moulages à peu près sains; c'est ce que les fondeurs anglais pratiquent depuis longtemps et ce qu'ils appellent *tuer l'acier*.

Pour les grands moulages coulés du four Martin, on a eu beaucoup plus de peine à réussir. On arrive jusqu'à un certain point à calmer l'ébullition en ajoutant à l'acier du ferro-silicium :

il est probable que le dégagement du gaz est dû à la réaction du carbone sur l'oxyde de fer dissous dans le bain; en réduisant cet oxyde par un corps qui donne un produit solide, comme le silicium, on empêche cette réaction.

On y réussit encore mieux avec l'aluminium, en plaçant des fragments d'aluminium dans la poche de coulée. Ce métal fond sous le jet d'acier chaud et s'élève peu à peu à travers le bain par suite de sa légèreté; avec des additions d'aluminium on est arrivé même à rendre fluide le fer pur.

Depuis quelques années, l'acier moulé commence à être employé couramment, même pour de grandes pièces. Les difficultés du moulage diminuent lorsqu'on obtient l'acier très chaud, ce qui permet de le laisser reposer un certain temps dans la poche de coulée avant de le verser dans les moules; c'est sans doute ce qui explique le succès, à ce point de vue, du convertisseur Robert.

Emploi des petits convertisseurs. — On a cherché souvent à affiner la fonte dans de petits convertisseurs afin de fabriquer directement l'acier destiné au moulage, car dans la plupart des cas la charge d'un grand convertisseur Bessemer serait beaucoup trop forte pour pouvoir être employée de cette manière. Il faut préparer à volonté, suivant les cas, de petites charges d'acier pour chaque espèce de moulage. On est obligé alors de prendre l'acier tout fait en lingots et de le fondre au creuset, ce qui est dispendieux.

Les premiers essais faits pour affiner directement la fonte dans de petites cornues ont médiocrement réussi, parce que ces appareils se refroidissent trop facilement. La grande masse qui se trouve réunie dans une cornue Bessemer est, comme nous l'avons vu, une des conditions qui favorisent le développement d'une haute température.

Le problème est aujourd'hui résolu avec un plein succès par M. Robert. Il emploie une cornue où les tuyères, au lieu d'être placées au fond, se trouvent sur le côté. Grâce à cette disposition on peut laisser l'air à peu de distance au-dessous de la surface du

bain. On règle la hauteur des tuyères à volonté, en inclinant plus ou moins la cornue.

L'air rencontre donc moins de résistance ; il produit un broyage énergique de la masse liquide qu'il fait tourner. On traite dans cette cornue des charges de 1 tonne environ et la température y est si élevée que l'acier peut rester ensuite plus d'un quart d'heure dans la poche de coulée sans cesser d'être parfaitement fluide.

Au point de vue de la fabrication même du lingot, ces appareils sont forcément moins économiques que les grandes cornues, mais ils peuvent rendre de très grands services dans les petites usines spécialement destinées à faire des moulages variés. Ils peuvent aussi être très commodes pour la fabrication des aciers spéciaux dont nous parlerons tout à l'heure et qui se font en général en petites quantités.

Nous signalerons encore le procédé adopté par M. Vallerand pour résoudre la même question : il opère dans un convertisseur ordinaire de très petites quantités où la charge peut être réduite à 300 kilogrammes. Vers la fin de l'opération il ajoute dans la cornue un peu de ferro-silicium ; on souffle encore pendant quelque temps. Le silicium joue ainsi le rôle de combustible ; son oxydation rapide dégage beaucoup de chaleur et élève la température du bain jusqu'au degré voulu. Ce tour de main permet, comme on le voit, de traiter de très petites charges avec une installation encore plus simple que celle des aciéries du système Robert.

Grâce à ces deux procédés, il est probable que les petites usines de moulage se multiplieront ; à mesure qu'on saura mieux le fabriquer et l'utiliser, l'acier moulé remplacera certainement le fer forgé dans un grand nombre d'applications.

ACIERS SPÉCIAUX

Un des caractères nouveaux de la métallurgie depuis quelques années, c'est l'apparition d'une série d'alliages spéciaux ayant

chacun des propriétés précieuses à différents points de vue. A côté de l'acier ordinaire viennent se ranger toute une série de composés que l'on peut multiplier à l'infini et qui sont faits exprès pour satisfaire aux exigences spéciales de chaque fabrication nouvelle.

On obtient ces aciers en incorporant au bain, à la fin de l'affinage, des fontes riches en métaux réfractaires, tels que le chrome, le nickel, le manganèse, le tungstène. Les aciers de chrome, dont la teneur est de 3 pour 100, sont extrêmement durs sans être cassants. On les emploie surtout pour la fabrication des obus; le nickel, au contraire, a sa principale application dans les plaques de blindage.

Quand on a voulu fabriquer des blindages en acier, on a eu beaucoup de peine à obtenir des plaques qui fussent dures sans être cassantes. Si l'acier est trop carburé, il résiste bien à la pénétration du projectile, mais il se fend sous le choc. S'il est trop doux, l'obus pénètre par sa pointe. Il faut un métal assez dur pour que cette pointe se casse contre lui, et cependant assez malléable pour ne pas se fissurer. Les aciers contenant environ 3 pour 100 de nickel présentent une structure fibreuse qui rappelle celle du fer forgé et on peut leur donner une grande dureté sans qu'ils deviennent cassants. On obtient un résultat encore plus remarquable en combinant l'acier au chrome et au nickel. Enfin un dernier progrès a été apporté par le procédé Harvey.

Les plaques harveyées sont faites avec de l'acier relativement doux dont on durcit seulement la surface. Une fois la plaque fabriquée, on la chauffe très longtemps dans un grand four voûté en recouvrant de charbon sa face supérieure. Le reste est enterré dans du sable, la surface se cimente et acquiert alors par la trempe la dureté de l'acier à outils, tandis que tout le corps reste doux.

Ferro-nickel. — Le ferro-nickel est un métal encore plus curieux. C'est un acier contenant au moins 15 pour 100 et parfois 25 ou 30 pour 100 de nickel. Cet alliage de nickel et de fer jouit

des propriétés toutes différentes de celles des métaux séparés; notamment il n'est pas magnétique, ou du moins il ne le devient qu'à une température très inférieure à zéro. Il est inaltérable à l'air, sa résistance est supérieure à celle des meilleurs aciers; enfin la trempe agit d'une façon tout à fait inattendue: elle l'adoucit au lieu de le durcir, tout en lui laissant une grande résistance. Ce métal se moule facilement; il est certainement destiné à des applications très importantes; mais il est encore d'un prix relativement élevé et pour beaucoup de fabrications il présente l'inconvénient d'être très difficile à travailler à froid.

On a songé à refaire l'artillerie en ferro-nickel. Les canons auraient alors une résistance beaucoup plus grande, avec un poids plus faible; ils présenteraient surtout plus de sécurité contre les éclatements à craindre quand on lance des obus chargés d'explosifs. Malgré les avantages qu'on pourrait en attendre, toutes les nations paraissent reculer jusqu'à présent devant les prix énormes d'une pareille transformation.

Aciers au manganèse. -- Les aciers très riches en manganèse, contenant par exemple plus de 12 pour 100, jouissent aussi de propriétés inattendues et analogues à celles du ferro-nickel. Comme lui, ils ne sont pas magnétiques, leur dureté considérable n'augmente pas par la trempe et ne diminue pas par le recuit. Ils servent à faire des outils pour travailler les métaux. Avec eux on peut travailler beaucoup plus vite et enlever des copeaux beaucoup plus gros.

Tous les outils en acier trempé ordinaire perdent leur dureté quand on veut les faire travailler trop vivement, parce que leur tranchant s'échauffe et se recuit. L'acier au manganèse, lui, ne s'amollit pas par la chaleur, la vitesse du travail n'est donc plus limitée que par la puissance de la machine. Ces outils ne peuvent plus être forgés ni préparés à la lime; on ne peut les façonner et les affûter que sur la meule.

Par la création de tous ces alliages spéciaux l'industrie du fer

entre dans une nouvelle phase. Les métallurgistes ont devant eux, pour ainsi dire, un domaine infini dans lequel on n'a encore fait que les premiers pas. A ce point de vue la métallurgie du cuivre était en avance : depuis longtemps on connaît les principaux alliages du cuivre, comme le bronze et le laiton, et leurs emplois sont peut-être plus importants et plus nombreux que ceux du cuivre pur. Le bronze paraît même avoir été le premier grand métal industriel que l'homme ait connu et il a joué à l'aurore de toutes les civilisations le rôle que joue aujourd'hui le fer. Cela tient certainement à la facilité que les alliages de cuivre offrent pour se fondre et se mouler. Le fer n'a pris son importance industrielle que beaucoup plus tard, parce qu'étant infusible il était beaucoup plus difficile à travailler en grandes pièces. Il fallait créer un outillage mécanique pour pouvoir le forger convenablement. La même raison a retardé jusqu'à nos jours l'emploi de ces alliages ; il est impossible d'allier convenablement deux métaux s'ils ne sont pas fondus ; ces composés intéressants ne pouvaient donc devenir d'un usage courant en métallurgie qu'après l'invention de fours assez énergiques pour réaliser leur fusion. Aujourd'hui que le four Siemens et la cornue Bessemer nous donnent sans peine le fer sous forme liquide, on sera amené à créer pour chaque usage spécial un alliage approprié, et l'emploi du fer pur tendra à devenir toujours plus rare.

ESSAIS MÉCANIQUES

Les mots de fer et d'acier ne désignent pas seulement deux qualités de métaux bien déterminées : comme nous l'avons vu, il existe toute une série de nuances différentes qui peuvent offrir chacune leurs avantages pour chaque usage spécial, et cette série va s'augmentant tous les jours par l'introduction d'aciers nouveaux que la présence de corps étrangers dote de qualités nouvelles.

Il serait impossible de se reconnaître au milieu de cette foule de produits variés et le consommateur ne saurait comment choi-

sir et caractériser celui dont il a besoin si l'on ne définissait leurs propriétés par des chiffres précis.

Les aciers sont classés dans la pratique d'après les résultats qu'ils donnent aux essais mécaniques. On mesure leur résistance et leur malléabilité de manière à les traduire par des chiffres. C'est surtout l'essai à la traction qui sert à établir ce diagnostic.

Au moyen de puissantes machines, on applique à l'extrémité d'une barre une force croissante et on la tire dans le sens de sa longueur jusqu'à ce qu'elle se rompe. On mesure l'effort nécessaire pour provoquer la rupture, et ce chiffre, divisé par la section de la barre, caractérise la résistance. Le fer forgé peut supporter dans ces conditions 30 à 35 kilogrammes par millimètre carré. La résistance des aciers ordinaires varie depuis 35 jusqu'à 60 kilogrammes suivant leur teneur en carbone ; pour les aciers les plus durs, on peut aller à 80 kilogrammes et même dépasser 100 lorsqu'ils sont étirés en fils fins.

Avec les aciers spéciaux, on peut atteindre des résistances encore plus considérables.

Pour apprécier la malléabilité, on mesure l'allongement relatif qu'a pris la barre pendant l'essai. Il suffit pour cela de comparer sa longueur primitive à celle des deux fragments que l'on rapproche après la rupture. Les métaux les plus doux sont naturellement ceux qui s'allongent le plus, tandis que les métaux cassants, comme l'acier dur trempé, se brisent presque sans se déformer. L'effet de la trempe sur l'acier se traduit par une augmentation considérable de résistance et par une grande diminution de l'allongement, qui peut devenir presque nul. Les aciers spéciaux présentent cette particularité d'avoir à la fois une grande résistance et un grand allongement.

L'allongement est une condition de sécurité essentielle pour les constructions métalliques, surtout pour les pièces qui peuvent être exposées à des chocs : il leur permet, en cas de surcharge, de se déformer sans donner lieu à des ruptures brusques et imprévues. Les aciers doux peuvent prendre plus de 20 pour 100

d'allongement, et la plupart des métaux que l'on emploie n'en ont pas moins de 10 à 15 pour 100.

Pour chaque commande, suivant l'usage auquel elle est destinée, on définira le métal que l'on veut en fixant le minimum de résistance et d'allongement qu'il devra posséder. La réception sera subordonnée aux essais mécaniques, pour lesquels on prélèvera des éprouvettes en découpant des barrettes sur un certain nombre de pièces prises au hasard.

Les machines destinées à exécuter ces essais comprennent deux fortes mâchoires entre lesquelles on fixe la barrette; l'une de ces mâchoires peut être tirée au moyen d'un système de vis et d'engrenages, l'autre est suspendue au petit bras d'un levier; en équilibrant le levier avec un contre-poids de manière à le maintenir horizontal, ce contre-poids, multiplié par le rapport des deux bras, mesure l'effort de traction appliqué à la barre. Le plus souvent on emploie un système de plusieurs leviers de manière à amplifier l'effort et à diminuer la grosseur du contre-poids, car la résistance absolue de la barre s'élève souvent dans la pratique à 30 ou 50 tonnes. On emploie un contre-poids qui peut glisser le long du levier comme dans une balance romaine et on l'avance progressivement pendant l'essai de manière à maintenir toujours l'équilibre; comme le levier est gradué, il permet de lire à chaque instant l'effort exercé.

A côté de cet essai qui joue le principal rôle pour définir le métal, on en fait souvent d'autres destinés à contrôler spécialement telle ou telle qualité pratique. Ainsi les tôles dans lesquelles on recherche surtout la douceur sont essayées par pliage, c'est-à-dire qu'on les replie sur elles-mêmes et qu'elles doivent supporter une déformation déterminée sans qu'il s'y produise des fentes. Les tôles d'acier sont soumises à des essais analogues après avoir été chauffées au rouge cerise et trempées de façon à vérifier que le métal est assez doux pour ne pas durcir sensiblement par la trempe.

Parfois même on soumet à certaines épreuves les pièces ter-

minées, dont on sacrifie quelques-unes pour mieux s'édifier sur la valeur de l'ensemble. C'est ainsi que les tuyaux, les cylindres en acier s'essayer par la pression hydraulique en les fermant aux deux bouts et comprimant de l'eau avec des pompes jusqu'à rupture. Les roues de chemin de fer s'essayer au choc, au moyen d'un poids qu'on fait tomber sur la roue placée debout, et qui ne doit pas la déformer tant que la hauteur de chute ne dépasse pas une certaine limite.

L'ensemble de toutes ces conditions constitue le cahier des charges qui accompagne à présent toutes les grandes commandes et qui met parfois les industriels dans des situations fort embarrassantes, car il y en a où l'on trouve des exigences exagérées et parfois même des conditions presque incompatibles entre elles. On a du reste, en France, multiplié et diversifié les cahiers des charges à un degré que rien ne justifie. Chaque administration, chaque compagnie de chemins de fer a les siens et impose des conditions qui ne sont pas tout à fait pareilles à celles du voisin ; dans certaines administrations, chaque ingénieur refait un nouveau cahier des charges pour chaque construction nouvelle ; le maître de forges se voit donc obligé de modifier à chaque instant sa fabrication pour satisfaire à des exigences variées et inutiles.

Il est certain que, dans le domaine des aciers ordinaires, par exemple, une dizaine de types, bien choisis et définis une fois pour toutes, suffiraient à tous les besoins pratiques. Il n'y a aucune utilité à construire des ponts avec des aciers différents suivant le département où ils sont situés ; et il n'y a aucune raison pour que les rails reconnus bons sur une ligne de chemins de fer soient mauvais sur la ligne voisine. Si les industriels n'avaient à produire qu'un petit nombre de qualités toujours identiques, ils arriveraient à régler beaucoup mieux leur fabrication ; ils obtiendraient le résultat voulu avec plus de sûreté et à moins de frais. Le consommateur y gagnerait à tous les points de vue aussi bien que le fabricant. Or ce dernier est plus digne d'intérêt qu'on ne le croit généralement ; car, avec la concurrence et la baisse progressive

des prix de vente, la marge de bénéfice qui reste aux forges françaises est loin d'être large.

L'unification des cahiers des charges serait donc un progrès sensible pour l'industrie; cette œuvre a été entreprise depuis quelque temps dans plusieurs pays étrangers. On a pu espérer qu'un effort dans le même sens serait fait chez nous lorsque l'on a vu se réunir pour l'étude des méthodes d'essai une grande Commission officielle où figuraient des représentants de toutes les administrations et des principales sociétés métallurgiques. Mais, chaque service public étant essentiellement jaloux de son indépendance, la critique des cahiers des charges a paru sans doute un terrain trop brûlant; la Commission ne s'y est pas risquée et personne n'a même proposé une réforme que tous les industriels désirent. On s'est borné à étudier dans les plus minutieux détails les procédés employés pour les essais mécaniques et à rédiger des instructions pour donner à ces essais une régularité et une précision peut-être illusoire.

Dans certains cas les essais prennent des proportions formidables. Ainsi on éprouve les blindages en bombardant à courte distance quelques plaques prises au hasard dans le lot, avec des charges de poudre calculées pour donner à l'obus une vitesse déterminée. Les aciéries qui se sont fait une spécialité de ces fabrications ont dû s'adjoindre des polygones d'artillerie pour faire elles-mêmes des essais préliminaires, et il leur faut sacrifier beaucoup de plaques avant d'être sûres de celles qu'elles vont exposer à l'épreuve officielle.

Essais chimiques. — Dans tout le cours d'une fabrication, les essais mécaniques sont fréquemment renouvelés pour servir de guide au travail. Mais il faut aussi s'aider de nombreuses analyses chimiques pour savoir bien exactement la composition du métal sur lequel on opère. Chaque forge aujourd'hui est doublée d'un laboratoire où l'on analyse journellement toutes les matières premières et tous les produits pour savoir exactement ce qu'on

introduit dans les fours et ce qu'on en retire, doser les charges et régler la marche en vue de la nuance de métal qu'on veut obtenir, pour s'assurer ensuite qu'on est bien arrivé au résultat voulu, et n'affecter à chaque fabrication qu'un acier de composition chimique bien appropriée. La composition et le mode de travail sont, en effet, les deux facteurs qui régleront la qualité du produit définitif; le travail bien dirigé aura pour résultat de donner à chaque acier la structure la plus favorable et le maximum de qualités mécaniques qu'il faut acquérir, mais ce maximum dépend essentiellement de sa composition chimique.

Examen microscopique. — Grâce aux beaux travaux de M. Osmond, les métallurgistes ont un moyen nouveau pour contrôler les effets du travail et caractériser d'une manière précise la structure de l'acier. Autrefois on jugeait cette structure par la cassure, en brisant une barre et examinant le grain de la partie rompue; ce grain par exemple est grossier et brillant dans l'acier brûlé, grossier et ap'ati dans l'acier phosphoreux, fin dans les aciers durs; l'acier trempé présente une cassure compacte où le grain est à peine visible.

C'est encore par ce diagnostic rudimentaire qu'on se guide au cours d'une fabrication, que l'on trie par exemple les barres destinées à être fondues ensemble au creuset. Mais on peut étudier la cassure d'une manière bien plus délicate, en observant au microscope une surface bien polie et attaquée très légèrement avec un acide faible. Certaines parties restent en relief, et la structure se dessine nettement.

Nous ne pouvons entrer dans le détail de ces études, nous nous bornons à donner deux figures montrant l'aspect tout différent d'un acier fondu à structure cristalline et grossière, à côté d'un acier bien forgé, dont la structure régulière et fine correspond à des qualités mécaniques bien supérieures.

L'acier fondu ou chauffé à haute température prendra toujours une structure trop cristalline s'il se refroidit librement. On

empêchera cet effet et on obtiendra la structure voulue si on le forge convenablement et si on prolonge ce travail jusqu'à ce qu'il soit refroidi à 600 degrés environ, température où il n'a plus assez de plasticité pour permettre la formation de nouveaux groupements moléculaires. On obtiendra un effet analogue avec des

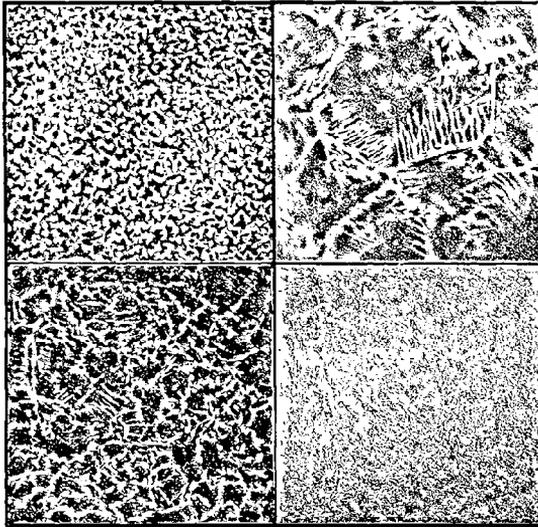


FIG. 91. — Coupes microscopiques d'acier.

1. Acier brut de coulée; cristallisation grossière indiquée par des contours hexagonaux à l'intérieur desquels se détachent des lamelles parallèles aux côtés. — 2. Acier forgé à bonne température. Les grains sont imbriqués et arrondis, de petite dimension. La structure cristalline a disparu. — 3. Acier recuit à trop haute température. La structure cristalline a reparu : l'acier est brûlé. — 4. Acier trempé. Le grain est devenu imperceptible; la cassure est presque amorphe.

trempe et des recuits convenables. Des expériences successives permettront de fixer avec l'aide du microscope la structure type à laquelle il faut assurer un acier déterminé pour qu'il ait toutes ses qualités mécaniques, de rechercher le mode de travail qui y conduit le plus sûrement et enfin contrôler le résultat obtenu dans la pratique sur chaque pièce. Ce contrôle, comme celui de l'analyse

chimique, peut se faire sur de petits fragments et n'exige pas le sacrifice des pièces qu'on veut examiner.

L'usage de l'examen microscopique commence à s'introduire dans quelques aciéries ; il est peut-être appelé à prendre une importance comparable à celle des deux autres méthodes d'investigation, mécanique et chimique, seules employées couramment jusqu'à nos-jours.

CHAPITRE VI

HISTORIQUE DE LA MÉTALLURGIE DU FER

Temps primitifs. — Époque moyenne : découverte de la fonte. — Époque moderne : développement rapide de l'outillage. — Age de l'acier.

L'histoire de la métallurgie du fer est intimement liée à celle de la civilisation et des progrès matériels de l'humanité. C'est lui qui rend l'homme maître de la terre et lui permet de dompter les forces naturelles. On pourrait dire de ce métal ce qu'Ésope disait de la langue : il est à la fois ce que nous avons de mieux et de pire : car, s'il est l'auxiliaire indispensable de toutes les industries, il est aussi celui de la destruction et de la guerre. De tout temps, il a assuré aux races qui savaient le mieux l'élaborer ou le manier, tantôt la supériorité industrielle, tantôt la supériorité militaire.

Nous allons résumer dans ce chapitre les phases successives par lesquelles a passé la sidérurgie : nous verrons que chacune d'elles correspond à une évolution de l'industrie en général, ou à une transformation importante des moyens d'armement.

Dans les temps préhistoriques, le fer paraît avoir été inconnu. On admet que toutes les races primitives ont passé par trois phases successives : l'âge de la pierre, l'âge du bronze et l'âge du fer. Cette évolution est naturelle.

Les premiers hommes n'avaient qu'à ramasser la pierre pour y trouver la matière première de leurs outils grossiers. Il fallait déjà une véritable industrie pour extraire le cuivre de ses minerais; mais, une fois les propriétés de ce métal découvertes, sa fusibilité le rendait facile à façonner. Le fer, quoiqu'il soit plus répandu, est plus difficile à extraire, mais surtout il est infusible : pour le travailler et l'employer couramment, il fallait disposer d'un outillage mécanique plus avancé.

Le fer a peut-être été connu à une époque beaucoup plus reculée qu'on ne le croit généralement. La rapidité avec laquelle il se détruit par la rouille pourrait expliquer l'absence d'objets en fer conservés dans les gisements préhistoriques, où l'on a trouvé des objets en bronze.

Parmi les objets auxquels on peut assigner une date approximative, on possède des pièces en fer venant des civilisations égyptienne et assyrienne aussi anciennes qu'aucune pièce en bronze de même origine. Mais, si le fer était connu, il semble bien que son emploi devait être relativement rare. Certains passages d'Homère montrent que le fer était apprécié comme un objet de valeur; mais néanmoins toutes les armes étaient encore en bronze; il est probable que, faute de pouvoir le travailler, on ne faisait avec le fer que des objets de forme simple et de petite dimension.

Le premier progrès, sur l'histoire duquel nous n'avons aucune donnée, fut d'apprendre à réunir plusieurs morceaux de fer et à les chauffer assez fort pour pouvoir les battre et les souder de manière à n'en faire qu'un seul bloc. Ce progrès assura dans l'antiquité la supériorité militaire aux races qui, les premières, surent se créer un armement complet en fer.

Jusque vers la fin du moyen âge, il ne semble pas qu'il y ait eu d'innovations importantes dans les procédés employés. Le fer

s'obtenait directement en réduisant les minerais riches dans des foyers au bois, très analogues aux foyers catalans encore en activité dans les Pyrénées pendant la première moitié de ce siècle. De petites forges s'installaient dans les forêts, partout où l'on pouvait trouver des minerais utilisables.

Comme nous l'avons indiqué, cette méthode ne permettait de traiter que des minerais relativement riches ; le poids des pièces que l'on pouvait obtenir était limité non seulement par les dimensions restreintes des foyers, mais surtout par la puissance des marteaux dont on disposait et qui ne permettaient pas de forger des masses trop volumineuses.

La métallurgie ne pouvait donc fournir les grandes pièces de fer que réclame l'industrie moderne, et, si elle ne s'était pas transformée, les progrès accomplis depuis par toutes les autres industries mécaniques eussent été impossibles.

Au point de vue artistique, au contraire, le moyen âge a peut-être été l'époque la plus brillante de l'histoire du fer, précisément parce que son travail ne se faisait pas encore par des moyens mécaniques. C'était une œuvre de patience et d'habileté, et un bon forgeron était un véritable artiste.

Vers le quatorzième siècle, une ère nouvelle commence par l'introduction de la fonte fondue, qui paraît avoir été inconnue des anciens. On peut remarquer que ce progrès coïncide avec la découverte de l'artillerie, dont il a été l'auxiliaire. Si les premiers canons ont été faits en bois cerclé et lançaient des boulets en pierre, cette arme nouvelle ne s'est développée et n'a acquis une nouvelle puissance que lorsqu'on a su couler des canons et des boulets en fonte.

C'est en Allemagne qu'a été créé, à une époque mal connue, l'appareil nouveau dont le développement progressif devait donner naissance aux hauts fourneaux modernes ; ces débuts ont été humbles : le *stüchofen* se composait à l'origine d'une cuve de 3 ou 4 mètres de hauteur avec une ou deux tuyères à la base. Ce n'était guère autre chose que l'ancien foyer recouvert d'une

cuve où l'on chargeait les minerais par le haut, de manière qu'ils s'échauffaient progressivement avant d'arriver dans le foyer même, et qu'on utilisait ainsi beaucoup mieux le combustible.

C'est à réaliser cette économie que s'est borné d'abord leur rôle. On a commencé par y travailler comme dans les foyers ordinaires, c'est-à-dire qu'ils restaient ouverts à la base et que l'on en retirait des loupes de fer affinées par le vent des tuyères et non fondues. Mais un jour on remarqua qu'en activant le foyer, en chargeant un peu plus de charbon, on pouvait retirer du four un véritable métal fondu, qui était parfaitement liquide à condition qu'on ne l'eût pas laissé séjourner trop longtemps devant les tuyères. Ce métal pouvant être retiré sous forme fluide, on put alors fermer la base du four, ce qui facilitait ce nouveau mode de travail en supprimant les causes de refroidissement et d'oxydation par l'air extérieur. Dans ces conditions, comme nous l'avons déjà expliqué, le fer aussitôt réduit se carbure au contact du charbon et se transforme en fonte. Ce nouveau métal, étant fusible, permit de fabriquer, par moulage, des pièces de toute dimension et de toute forme possédant la dureté du fer. Mais le progrès ne se borna pas là, les nouveaux procédés fournirent aussi un moyen d'obtenir plus économiquement le fer pur.

En chargeant de la fonte dans les bas foyers analogues à ceux où l'on avait jusqu'alors traité le minerai, on reconnut qu'elle pouvait s'affiner et se décarburer sous le vent des tuyères. La méthode indirecte était créée. Il se trouva qu'elle était moins coûteuse que l'ancienne, parce que, sous forme de fonte, on peut plus facilement extraire le fer de tous les minerais. Comme nous l'avons déjà expliqué, la fonte liquide se sépare des scories beaucoup mieux que le fer pâteux, le four à cuve permet de fondre complètement ces scories, de sorte qu'on arrive à une réduction complète, et l'on obtient, au lieu de scories riches en fer, des laitiers qui n'en contiennent presque plus. La méthode indirecte permit donc de traiter les minerais pauvres et peu fusibles qui étaient inutilisés jusqu'alors.

Cette méthode se propagea peu à peu, surtout en Allemagne et en Angleterre, et se perfectionna par l'agrandissement progressif des fourneaux sans que la méthode directe cessât d'être appliquée dans la région où l'on possédait des minerais riches. Cette période, qui dure jusque vers la fin du dix-huitième siècle, pourrait être appelée l'ère moyenne de l'histoire du fer ; elle se distingue de l'ère ancienne par l'apparition de la fonte et des hauts fourneaux, de l'ère moderne parce que la métallurgie se fait encore au charbon de bois, que le travail du fer se fait à peu près exclusivement avec des marteaux mus par des forces hydrauliques.

Les usines continuent donc de rechercher le voisinage des forêts et leur production se développe progressivement, mais dans des limites assez restreintes. Les hauts fourneaux ne produisaient pas plus de 6 tonnes par jour au dix-septième siècle, et à la fin du dix-huitième siècle on n'avait guère dépassé 10 tonnes.

Cependant dès le dix-septième siècle on voit se produire, en Angleterre, deux innovations qui annoncent le début de l'ère moderne ; on commence à alimenter certains hauts fourneaux avec des combustibles minéraux.

Vers 1730, on imagine de carboniser la houille pour la transformer en coke ; vers la fin du dix-huitième siècle, la plupart des hauts fourneaux anglais employaient déjà ce nouveau combustible, et leur production moyenne avait été poussée à 17 tonnes par jour. Ce progrès considérable ne se propagea que plus tard et d'une manière beaucoup plus lente sur le continent. Il ne supprimait d'ailleurs pas l'emploi du charbon de bois, qui était toujours le seul combustible utilisé pour l'affinage, c'est-à-dire pour la transformation de la fonte en fer.

Au point de vue de l'outillage, on peut signaler aussi que, vers 1720, il existait en Angleterre des ateliers de ferblanterie où, au lieu de produire la tôle par martelage, on la laminait entre deux cylindres lisses. Cet emploi du laminoir, restreint d'abord aux tôles minces, se généralisera plus tard pour toutes les fabrications courantes et marquera un progrès capital dans l'outillage des forges.

On peut rapporter à la fin du dix-huitième siècle le début de l'ère moderne; il coïncide avec l'invention de la machine à vapeur, qui date de 1768, mais dont l'usage ne se généralisa que vers 1790. Ce fait capital dans l'histoire de toutes les industries eut une double influence sur la métallurgie du fer.



FIG. 92. — Haut fourneau primitif.

D'une part, il fournit aux forges le moyen de créer un outillage beaucoup plus puissant et d'aborder le travail des grosses pièces.

D'autre part, en créant des besoins et des débouchés nouveaux, il produisit une augmentation brusque de la consommation et força les métallurgistes à chercher tous les moyens de perfectionner leurs procédés et de produire plus vite et à meilleur marché. Il

en résulta bientôt une transformation complète de la métallurgie du fer.

La première phase de cette transformation s'ouvre, vers 1784, par deux inventions dues à l'Anglais Cort : celle du four à puddler et celle du laminoir à cannelures. La première permettait de faire l'affinage à la houille, la seconde de travailler beaucoup plus vite les loupes de fer et de les transformer par un procédé beaucoup plus économique que le martelage en barres de toutes formes.

Pour satisfaire à la production croissante des forges, les hauts fourneaux s'agrandirent rapidement. En 1825, les hauts fourneaux anglais avaient de 10 à 13 mètres de hauteur et produisaient 15 à 20 tonnes par jour ; en 1830, l'emploi de l'air chaud s'introduisit en Écosse et l'on commença à pousser la hauteur des fourneaux jusqu'à 20 mètres et à arriver à des productions de 40 à 50 tonnes par jour.

Vers la même époque aussi le puddlage fut perfectionné par l'invention des fours à soles refroidies et du procédé de puddlage chaud, qui permit d'obtenir, avec l'affinage à la houille, des fers de meilleure qualité et fit disparaître, en grande partie, l'infériorité de ces produits par rapport au fer fabriqué au bois.

Pendant toute cette période, qui correspond au premier tiers de notre siècle, l'industrie anglaise resta toujours en avance sur celle du continent, où les progrès dont nous venons de parler ne se propagèrent que lentement, l'affinage au bois et la marche à l'air froid dans les hauts fourneaux restant en vigueur presque partout, au moins pour la fabrication des fers de qualité.

Cette première phase de l'ère moderne peut donc se caractériser par la coexistence des anciens procédés et des nouveaux. Vers 1840 commence une seconde phase, où l'on voit rapidement disparaître toutes les usines travaillant au bois ; les procédés anglais se généralisent en même temps qu'ils se perfectionnent et que la puissance des appareils reçoit un nouvel accroissement. Cette révolution a été provoquée par la construction des chemins de fer. La création des voies ferrées a donné lieu à une consom-

mation nouvelle et considérable en même temps qu'elle réclamait des pièces de dimensions plus fortes que celles usitées jusqu'alors. Les constructions métalliques et l'emploi des navires en fer s'y sont ajoutés, sont venus contribuer aussi à augmenter rapidement les débouchés et à multiplier les exigences de l'industrie.

Le développement des moyens de transport changeait d'ailleurs toutes les conditions générales de l'industrie : en permettant aux grandes usines d'expédier leurs produits dans un rayon beaucoup plus étendu, il ouvrait tous les pays à une concurrence qui rendait la lutte impossible pour les petits établissements et pour les anciennes usines travaillant au bois. La métallurgie se concentrait au milieu des bassins houillers, et les petites forges disséminées autrefois dans toutes nos provinces, où chacune avait sa clientèle locale, disparaissaient pour faire place à quelques grands établissements.

La découverte qui marque le début de cette période est celle du marteau-pilon, qui fut faite à peu près en même temps en France et en Angleterre. Ce nouvel engin permit de forger des pièces beaucoup plus volumineuses : après avoir débuté par des pilons d'un poids de 1 ou 2 tonnes, on en construisit bientôt de 15 à 20 tonnes pour les travaux de grande forge, et l'on arriva plus tard jusqu'au poids de 100 tonnes ; en même temps on perfectionnait les laminoirs, on augmentait leur puissance, et l'on créait toute une série de laminoirs spéciaux pour les fabrications qui ne pouvaient se faire au laminoir ordinaire. Pendant que l'outillage des forges se transformait, les hauts fourneaux augmentaient leur puissance et arrivaient à des productions de 60 à 100 tonnes par jour, en même temps que le prix de revient et la dépense de combustible diminaient dans des proportions considérables. On obtenait ces résultats non seulement par l'agrandissement même du fourneau, mais par des perfectionnements apportés à ses conditions de marche et surtout au chauffage de l'air.

C'est vers 1845 que l'on commença, en Écosse, à recueillir les gaz combustibles échappés du gueulard et à s'en servir pour chauffer les chaudières et les appareils à air chaud. En 1860, on construisit dans le Cleveland les premiers appareils de ce genre en briques qui permirent de porter à 700 ou 800 degrés la température du vent limitée jusque-là à 300 ou 400°. Ces deux découvertes réalisèrent une économie considérable sur la consommation de combustible, et l'augmentation de température eut en outre pour effet d'activer l'allure et d'accroître la production des fourneaux.

Dans la seconde moitié de notre siècle, une nouvelle transformation a lieu et l'on entre dans ce qu'on peut appeler « l'âge de l'acier », nouveau produit devenant d'une fabrication courante et prenant peu à peu la place du fer forgé qui était seul employé par la grande industrie dans les périodes précédentes. C'est la découverte du procédé Bessemer qui ouvre cette ère nouvelle. Le principe du procédé fut publié vers 1856, mais ce n'est guère qu'après une dizaine d'années qu'il entra définitivement dans la pratique. C'est aussi vers 1863 que l'on commença à fabriquer couramment l'acier fondu dans les fours Siemens par le procédé Martin. A partir de cette époque, la production de l'acier va toujours en augmentant et arrive à dépasser, dans certains pays, celle du fer forgé. Le prix du nouveau métal, qui était d'abord double de celui du fer, s'abaisse graduellement à mesure qu'on augmente la puissance des appareils et qu'on perfectionne l'outillage accessible de manière à activer les manœuvres.

On appliqua d'abord l'acier fondu aux fabrications qui pouvaient s'accommoder d'un métal relativement dur, telles que celle des rails et des bandages. Il ne tarda pas à remplacer totalement le fer pour ces deux produits où l'absence de soudure était une qualité essentielle, car les anciens rails en fer avaient une tendance à s'écailler par la séparation spontanée des différentes mises dont ils étaient composés. Peu à peu on apprit à fabriquer de l'acier de plus en plus doux et l'on commença à l'employer pour les tôles, pour les poutrelles, les fers à bâtir. Toutefois, pendant longtemps, la

plupart des constructeurs gardèrent des craintes sur les tendances cassantes de l'acier et continuèrent à employer le fer, dont la douceur naturelle leur paraissait une garantie plus sûre.

La fabrication de l'acier reçut une impulsion inattendue par



FIG. 93. — Haut fourneau écossais vers 1845.

la guerre de 1870. La supériorité des canons en acier fondu, que l'Allemagne était seule à posséder, força toutes les nations à renouveler leur outillage ; depuis cette époque, la construction du matériel de guerre et des navires cuirassés est devenue le principal débouché de beaucoup d'aciéries.

En cherchant à augmenter les dimensions des pièces, on a été amené à couler d'un seul bloc et à forger des lingots de plus en plus volumineux, dont le poids dépasse souvent 100 tonnes et, par suite, à créer un outillage de plus en plus puissant. C'est pour forger des blindages et des canons monstres que l'on a élevé dans plusieurs usines des pilons de 100 et de 120 tonnes. A peine avait-on construit ces outils géants qu'un nouvel appareil est venu leur faire concurrence : la presse hydraulique, qui n'était employée jusqu'alors pour le forgeage que dans quelques opérations spéciales, fut adaptée au travail des gros lingots. Son usage se répandit d'abord dans les grandes aciéries anglaises, puis fut imité dans les autres pays. L'adoption du forgeage à la presse en Angleterre est peut-être motivée en partie parce que quelques-unes des grandes aciéries se trouvaient installées sur un sol peu résistant qui ne pouvait supporter les chocs des gros pilons. C'est ce qui leur fit rechercher un appareil de nature à moins fatiguer les fondations.

Vers 1879, l'invention du procédé Thomas-Gilchrist et l'introduction de l'acier basique ou déphosphoré furent l'occasion d'une dernière révolution industrielle qui amènera peut-être bientôt le remplacement total du fer par l'acier. La période dont nous venons de parler pourrait donc être considérée seulement comme le début de l'âge de l'acier et comme une phase transitoire pendant laquelle le fer a conservé encore un rôle important. On peut remarquer, en effet, que, pendant cette période, la production réelle du fer n'a pas diminué, mais seulement sa part relative dans la production totale. On continuait à fabriquer autant de fer, mais à côté on fabriquait de plus en plus de l'acier et en quantité supérieure. Ce dernier était, pour ainsi dire, seul à profiter de l'accroissement des débouchés. Les procédés basiques, en facilitant la fabrication de l'acier extra-doux, tendent à faire disparaître les hésitations que l'on avait encore à employer ce métal dans certaines fabrications, comme les tôles de chaudières. D'autre part,

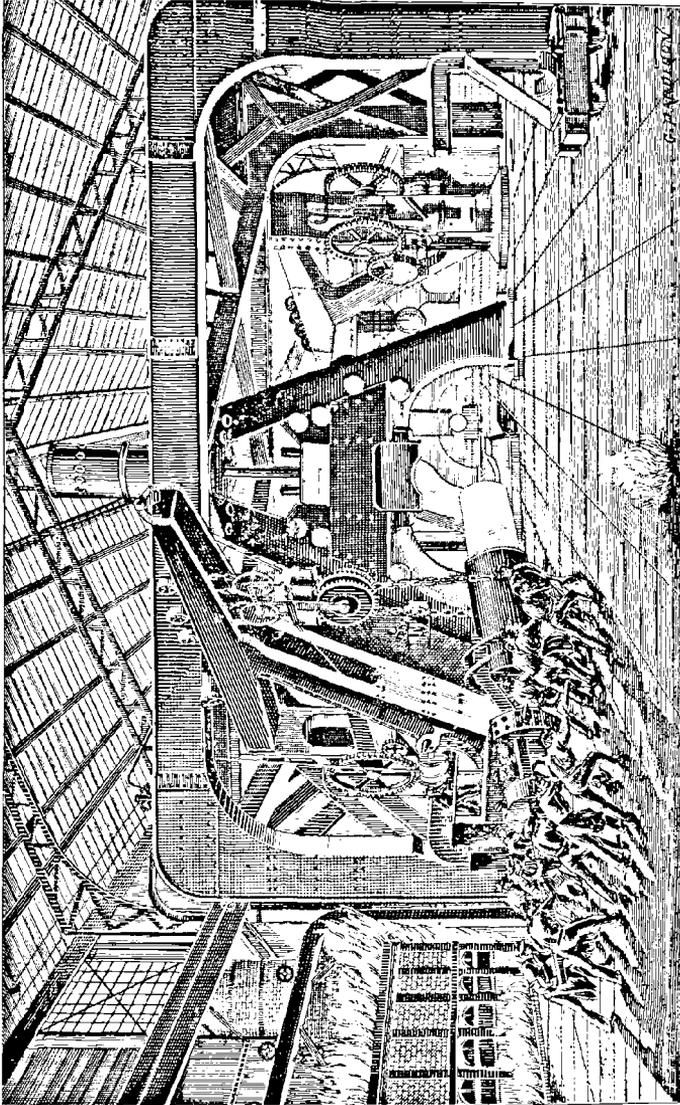


FIG. 94. — Forçage d'un canon au marteau-pilon de 100 tonnes.

On voit à gauche le four à réchauffer d'où on vient de retirer la pièce pour la conduire au marteau. Elle ne pénétrerait qu'à moitié dans le four et n'est chauffée que par une extrémité : on la soutient par des chaînes suspendues à une grue. Des ouvriers guident la manœuvre avec une queue fixée sur l'arrière de la pièce, qui permet de la faire obliquer ou tourner sur son axe.

les districts qui ne possédaient que des minerais phosphoreux (Moselle) et qui ne pouvaient les employer que sous forme de fer forgé, renoncent peu à peu à leurs anciennes fabrications depuis qu'ils sont devenus gros producteurs d'acier. Il est donc possible que la disparition du fer, souvent annoncée depuis vingt ans, commence à se produire réellement. •

Parmi les progrès accomplis pendant cette dernière période, on peut citer, au point de vue économique, l'augmentation nouvelle de production dont les Américains ont donné l'exemple dans leurs hauts fourneaux, et dont nous avons parlé au chapitre de la fonte.

A un point de vue plus général, l'emploi des aciers moulés et des aciers spéciaux, qui ne commencent à se propager que depuis quelques années, marquera sans doute le début d'une dernière transformation de la sidérurgie. Cette transformation, qui commence seulement à se dessiner, sera peut-être plus importante encore que les précédentes.

Le moulage de l'acier, qui était une opération exceptionnelle et difficile il y a une dizaine d'années, est entré dans la pratique courante; à mesure que cet art se perfectionnera et qu'on apprendra à améliorer l'acier coulé par le jeu de la trempe et du recuit, ce genre de moulage pourra remplacer, d'une part, les moulages de fonte, qui sont moins résistants, d'autre part, les pièces forgées, qui sont plus coûteuses; au dernier terme de cette évolution, on verra peut-être disparaître l'emploi de l'acier forgé: les pilons et les presses, tout cet outillage créé à tant de frais, deviendront inutiles; le règne des grandes forges n'aura peut-être pas duré un siècle, avant qu'elles soient remplacées par des fonderies.

D'autre part, l'addition de métaux étrangers, tels que le chrome et le nickel, pour modifier les propriétés de l'acier, est un principe fécond, destiné à donner sans doute des résultats beaucoup plus nombreux et plus importants que ceux, déjà si remarquables, que nous avons signalés.

Si le nickel n'était pas relativement coûteux, on l'emploierait déjà sans doute dans beaucoup de fabrications courantes, notamment dans les tôles où l'on recherche la ténacité et la douceur; l'addition

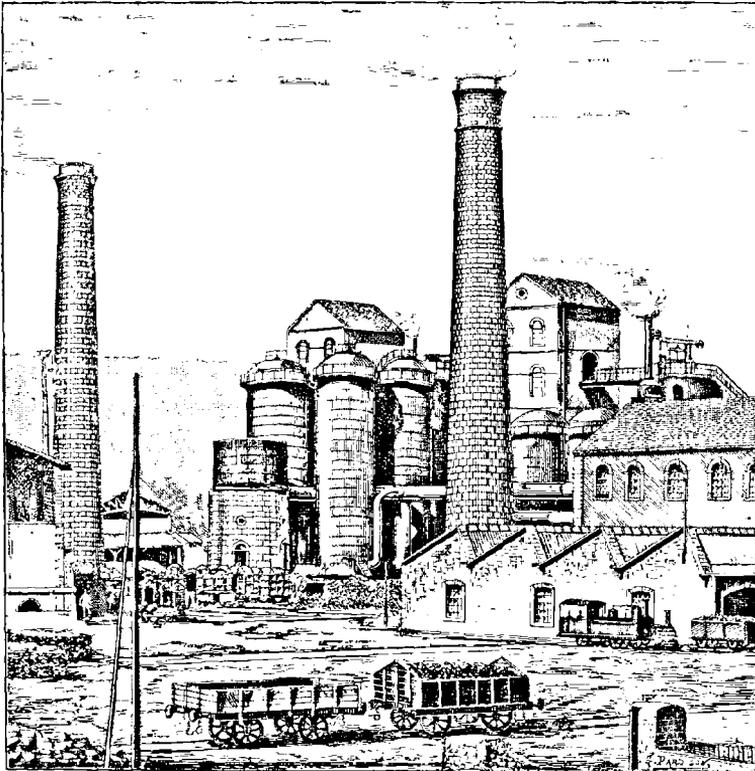


FIG. 95. — Vue d'ensemble d'un haut fourneau de la Moselle.

de 1 ou 2 pour 100 de nickel donnerait des produits incomparablement supérieurs. Si ce métal arrivait à n'être pas plus cher que le fer, les alliages qui en contiennent de fortes doses et que l'on désigne sous le nom général de ferro-nickel pourraient

remplacer l'acier avec avantage dans presque toutes les applications où l'on recherche la résistance.

On étudie de toute part les types multipliés que l'on peut obtenir par des dosages différents, soit avec le nickel, soit avec d'autres métaux, et il viendra peut-être un jour où ces alliages variés avec des compositions adaptées spécialement à chaque usage prendront la place de l'acier, comme celui-ci a commencé à prendre celle du fer.

Cette nouvelle ère, dont nous voyons aujourd'hui l'aurore, serait donc caractérisée, premièrement par l'emploi des pièces moulées au lieu des pièces forgées, deuxièmement peut-être par l'emploi général des alliages complexes.

Il est à remarquer que la métallurgie du fer se rapprochera ainsi, à force de progrès, du stade par lequel a débuté celle du cuivre. En effet, les premiers métaux employés par les hommes pour les besoins de leur industrie et de leur armement ont été des alliages moulés. Le cuivre, trop mou lorsqu'il est pur, a été dès les premiers temps utilisé sous forme de bronze.

Cette différence dans l'histoire industrielle des deux métaux s'explique par la fusibilité du cuivre. Dès le début on a obtenu ce métal sous forme liquide, et il n'était pas difficile de l'allier avec d'autres métaux fusibles comme lui; au contraire, le fer et la plupart des corps qui entrent dans la composition des aciers spéciaux, sont réfractaires et les anciens foyers étaient impuissants à les fondre. Il était donc impossible de les incorporer ensemble pour obtenir des alliages homogènes. La fabrication de ce genre d'alliage ne pouvait devenir pratique qu'après la découverte des procédés Martin et Bessemer qui ont permis d'obtenir l'acier et le fer fondus.

Cette découverte effaça la différence essentielle qui existait entre le fer et le cuivre, et la transformation dont nous avons signalé le début devait en être la conséquence naturelle.

Nous avons signalé à plusieurs reprises l'influence que l'art de la guerre avait exercée sur les progrès récents de la sidérurgie.

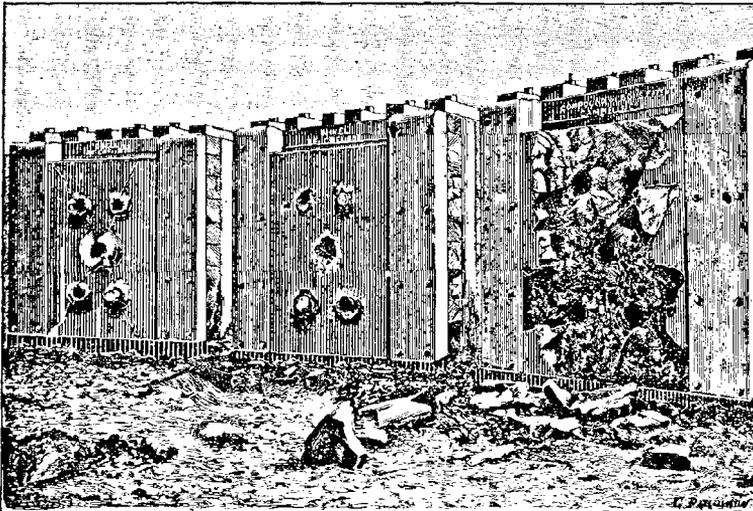
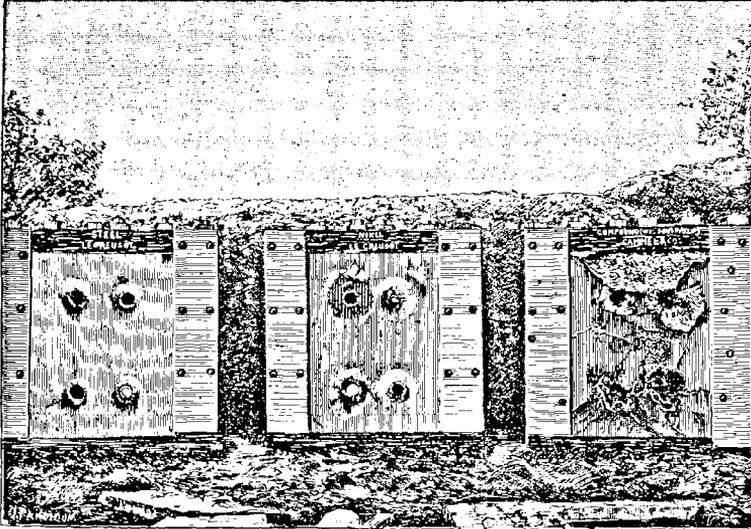


FIG. 96 et 97. — Essai comparatif de trois plaques de blindage.

Ces figures représentent les résultats de l'essai de trois plaques de blindage; la première en acier ordinaire, la seconde en acier nickelé, toutes les deux fondus au Creusot; la troisième est une plaque mixte Cammel, composée d'une plaque de fer forgé sur laquelle on a coulé de l'acier dur. — La figure 96 montre l'état des plaques après avoir reçu quatre coups aux angles: les deux premières ont bien résisté, la troisième a une partie arrachée et le reste est très fendillé. — La figure 97 montre l'effet d'un cinquième coup plus violent, tiré au centre. La plaque Cammel est complètement détruite. La plaque en acier ordinaire a résisté, mais il s'y est formé des fentes suivant les diagonales qui la rendraient incapable de supporter un second coup analogue. La plaque en acier nickelé est restée intacte.

C'est encore en cherchant à perfectionner l'armement qu'on a été conduit à étudier les aciers spéciaux.

Leur recherche a été un épisode de la lutte engagée entre le canon et le blindage depuis l'invention des navires cuirassés. Jusque vers 1880, on n'a guère fabriqué les blindages qu'en fer forgé, en entassant l'un sur l'autre des paquets de barres soudées de manière à faire des plaques épaisses que l'on superposait et que l'on soudait ensemble par une série de réchauffages et de laminages. Pour augmenter la résistance de ces cuirasses, on a augmenté progressivement leur épaisseur; les artilleurs n'ont d'abord répondu qu'en augmentant les dimensions de leurs canons, le poids de leurs projectiles et de leur charge de poudre. Puis, pour mieux percer les grandes épaisseurs, ils ont cherché à fabriquer des projectiles plus durs.

Pendant quelque temps on a employé avec succès les obus de perforation en fonte résistante trempée. Ces obus arrivaient à percer facilement les plaques de fer, métal beaucoup plus mou; pour leur résister, il n'était pas possible d'augmenter indéfiniment l'épaisseur, ce qui aurait surchargé les navires outre mesure. On a donc songé à faire des blindages en acier fondu, métal plus dur, sur lequel la pointe des obus en fonte se cassait facilement. Pour perforer l'acier on a cherché à créer un métal encore plus dur et qui cependant ne fût pas cassant comme la fonte; on y est arrivé en augmentant la dureté de l'acier par les additions de chrome, et les obus en acier chromé sont devenus d'un usage général.

Pour leur résister on a cherché, de l'autre côté, à augmenter la dureté des blindages; là, on s'est trouvé entre deux difficultés: si le métal du blindage est doux, le projectile y pénètre; si le métal est dur et cassant, le projectile n'entre pas mais la plaque se brise sous le choc et est bientôt réduite en morceaux. Après bien des tâtonnements, on s'est arrêté à l'emploi de l'acier au nickel, qui peut acquérir une grande dureté tout en conservant une structure fibreuse analogue à celle du fer et sans devenir cassant. Ces pro-

priétés ont été encore accentuées par l'addition du chrome combinée avec celle du nickel.

Enfin le procédé Harvey, consistant à carburer la surface par cémentation, a résolu le problème d'obtenir une surface très dure sur laquelle la pointe du projectile se casse, tout en faisant le corps du blindage en acier carburé relativement doux et non sujet à se fendre. Cette composition mixte permet de durcir l'acier par la trempe; cette trempe, en effet, n'agit que sur la surface qui a été carburée, elle ne modifie pas sensiblement les propriétés du reste de la masse qui contient trop peu de carbone pour être sensible à la trempe.

La dernière réponse des artilleurs aux blindages harveyés n'a pas été cette fois un progrès métallurgique, mais un artifice mécanique assez curieux. Il consiste à coiffer l'obus d'un capuchon en fer qui s'aplatit en amortissant le premier choc, et empêche la pointe de casser tout d'abord. Ces obus coiffés, essayés d'abord en Russie, sont arrivés parfois à perforer les blindages les plus durs.

Mais l'étude méthodique de nouveaux alliages continue de tous côtés. Le champ des combinaisons possibles est indéfini et permet d'espérer encore de bien grands progrès dans la solution du problème qui se pose spécialement pour le blindage, mais qui intéresse beaucoup d'autres fabrications, et qui consiste à augmenter la dureté sans rendre le métal cassant.

TROISIÈME PARTIE

ÉTAT ACTUEL DE L'INDUSTRIE MÉTALLURGIQUE

Production et emplois des métaux usuels. — Situation industrielle des différents pays. — Avenir de la métallurgie.

Rôle des différents métaux. — Les métaux ont chacun leur rôle spécial dans l'industrie, suivant leurs propriétés. On les a divisés en classes, on pourrait même dire en castes, et l'on établit souvent parmi eux une sorte de hiérarchie. Quand on parle de l'extraction des métaux précieux, tels que l'or et l'argent, on les qualifie de métaux *nobles*, et l'on appelle *bas* métaux le cuivre, le plomb qui peuvent se trouver avec eux dans leurs minerais. Ces bas métaux ont cependant encore une valeur très supérieure à celle du fer. Pour mieux marquer leur place dans cette échelle sociale de la métallurgie, on pourrait les appeler des métaux bourgeois ; le fer y tiendrait la place du prolétaire. Il est de beaucoup le plus commun et aussi le plus utile ; la quantité qu'on en extrait est incomparablement supérieure à celle de tous les autres réunis, et le rôle qu'il joue, sans être le plus brillant, est de beaucoup le plus essentiel à la civilisation. Cependant son travail est, pour ainsi dire, le moins rémunéré. L'industrie du fer représente une énorme dépense de force et de capitaux. Ses bénéfices sont limités par suite de la concurrence toujours croissante, et ce n'est que par une lutte conti-

nuelle que chaque usine peut conserver sa place et assurer son existence.

Pays producteurs du fer. — L'Angleterre avait autrefois une prépondérance considérable dans la production et le commerce du fer. Elle possède, en effet, des gisements de minerai voisins de grandes mines de houille. L'industrie sidérurgique s'y est développée avec une rapidité remarquable dès le commencement de ce siècle. La supériorité de sa marine a fait d'elle le fournisseur de tous les pays éloignés qui n'avaient pas encore d'industrie indigène. La France, pendant longtemps, est venue en seconde ligne. Aujourd'hui, une nouvelle puissance industrielle a grandi tout d'un coup : ce sont les États-Unis, qui, exploitant d'une manière intensive les richesses minérales d'un immense territoire, ont pris la tête de toutes les nations pour la production de la plupart des métaux usuels. L'Angleterre ne vient plus qu'après eux. Ensuite l'Allemagne, et la France ne tient que le quatrième rang.

L'industrie sidérurgique est aussi très prospère en Belgique. Ce pays possède de riches gisements houillers ; il peut travailler les fontes et les minerais venus du Luxembourg, où se trouve la continuation des grandes couches exploitées dans la Moselle. La facilité des communications par mer lui permet aussi de s'alimenter des minerais riches de l'Espagne et de la Méditerranée.

En Allemagne, les forges et les hauts fourneaux abondent surtout en Westphalie et en Silésie, où se trouvent réunis à peu de distance, à la fois des mines de fer et des charbonnages. En Russie, la métallurgie est en train de se développer rapidement. Du côté de la Pologne, cet empire possède la suite des gisements exploités en Silésie. Au sud, dans le bassin de Donetz, il existe sur un immense territoire de nombreuses couches de houille régulières ; on trouve aussi à peu de distance, des gîtes de minerai de fer. Ces grandes richesses sont restées longtemps presque en friche. La Russie recevait de l'étranger beaucoup de métaux travaillés ; mais depuis quelque temps le gouvernement a fait de

grands efforts pour galvaniser l'industrie nationale et la protéger par des droits d'entrée très lourds. De grandes usines se sont construites en Pologne et dans le Donetz ; plusieurs d'entre elles ont été fondées par des Sociétés françaises. L'Oural était autrefois le principal centre métallurgique de l'empire russe. On y fabriquait et l'on y fait encore de la fonte au bois ; il a perdu naturellement beaucoup de son importance relative, mais la construction du chemin de fer transsibérien va probablement amener la mise en valeur des gisements importants perdus dans cette contrée reculée. Il est à prévoir que l'empire russe deviendra un jour, comme les États-Unis, l'une des premières puissances métallurgiques.

Les autres pays de l'Europe n'ont qu'une production en fer relativement restreinte. L'Italie ne possède guère que des usines d'élaboration, où l'on traite des fontes ou des lingots d'acier importés. L'Espagne est très riche en minerais de fer, parmi lesquels ceux du Bilbao sont renommés pour leur pureté. L'exploitation y est très active, mais ces mines alimentent surtout les usines d'Angleterre, de France, de Belgique et de Westphalie ; cependant, depuis que l'on a commencé l'exploitation sérieuse des charbonnages des Asturies, il s'est fondé près de Bilbao des usines importantes et ce pays pourra avoir un jour une industrie nationale prospère.

La Suède possède des minerais purs, mais difficiles à traiter. Toute l'élaboration s'y faisait autrefois au bois, et elle a eu longtemps le monopole de fournir à l'Europe les fers de qualité supérieure. Aujourd'hui encore les fers que l'on fabrique par les procédés ordinaires, mais avec des soins spéciaux, sont souvent baptisés pour la vente : « fers de Suède ». La production relativement restreinte de ce pays ne paraît guère susceptible de se développer. L'Autriche possède aussi en Styrie et en Carinthie des gisements de carbonate qui, traités au bois, donnent des fers excellents et étaient peut-être les meilleurs minerais pour la fabrication de l'acier naturel. Les aciers de Styrie conservent encore une réputation méritée et il y existe un grand nombre de hauts

fourneaux travaillant au bois ou au bois mélangé de coke. En Bohême et dans le Banat, de grandes forges, outillées d'une façon plus moderne, travaillent pour alimenter la consommation nationale. La Hongrie possède un grand nombre de gisements de fer qui n'ont été jusqu'à présent exploités que pour quelques fourneaux au bois. On commence à y établir de grandes forges qui peuvent utiliser comme combustibles les lignites très abondants dans ce pays ; mais le coke, nécessaire aux grands hauts fourneaux, doit être apporté de Bohême ou de Silésie. Le développement de la sidérurgie dans ce pays pourra donc arriver à suffire aux besoins locaux, mais il ne paraît pas susceptible de devenir un centre d'exportation.

Importance industrielle du fer. — Le fer doit son importance industrielle à sa grande résistance et en même temps à son prix relativement bas. C'est le plus solide de tous les métaux, et à ce titre il est la matière première indispensable pour les constructions, pour les machines et pour tout outillage industriel. Le cuivre seul aurait une résistance comparable à celle du fer forgé, quoique un peu inférieure ; mais il est plus mou, plus déformable et il ne peut à aucun point de vue être comparé à l'acier, qui possède une résistance deux ou trois fois plus grande et qui a parmi les métaux le monopole absolu de la dureté, de sorte que rien ne peut le remplacer pour la fabrication des outils.

Aussi, le fer a été le principal agent des progrès de l'humanité ; la civilisation est restée dans l'enfance tant qu'on n'a connu que le cuivre ou le bronze. Dans les luttes anciennes, la supériorité est toujours restée du côté des peuples qui avaient appris les premiers à travailler le fer. Dans les temps modernes, la grande industrie n'est née que le jour où on a su forger le fer en grande masse ; et chaque étape des progrès industriels coïncide avec une transformation et un développement de la sidérurgie, qui seule pouvait fournir à ce progrès les moyens et l'outillage indispensables.

On peut dire qu'on emploie le fer partout où cela est pos-

sible ; lorsqu'on a recours à un autre métal, c'est qu'on y est forcé par quelque motif spécial. A côté de ses grandes qualités, le fer a le défaut d'être relativement altérable ; il se rouille vite à l'air humide. Dans les constructions, on est obligé de le protéger par la peinture, et dans beaucoup de cas on est amené à employer des métaux moins altérables. Pour certaines fabrications, la dureté du fer le rendrait trop difficile à travailler et l'on cherche des métaux mous et plastiques, comme le plomb.

Tels sont les deux principaux motifs qui limitent les usages du fer et déterminent la préférence pour tel ou tel autre métal.

Emplois du cuivre. — Le cuivre est peut-être le métal industriel le plus important après le fer ; c'est avec lui le seul des métaux usuels qui puisse être considéré comme résistant et qui puisse le remplacer dans la construction ou dans les applications mécaniques. On l'emploie dans les organes de machines et dans tous les objets qui doivent, par exemple, aller au feu, parce que le fer s'oxyderait trop rapidement. C'est ainsi que le cuivre en feuilles sert à faire toute espèce de vases, comme les casseroles, les alambics ; dans la construction des machines, on l'emploie pour les foyers des locomotives. Les feuilles de cuivre servent souvent aussi à faire des tuyaux pour les conduites de vapeur ou de liquides qui attaqueraient le fer. On les fabrique en repliant une feuille que l'on soude sur ses bords ; pour tous ces travaux de chaudronnerie, le cuivre, à côté de sa résistance à l'oxydation, possède sur le fer l'avantage d'être plus doux à travailler et de pouvoir se souder au moyen d'alliage fusible, sans qu'on ait besoin d'employer, comme pour la soudure du fer, le martelage à haute température.

Le cuivre pur en fils ou en barres a le privilège d'un genre d'application qui se développe beaucoup avec les progrès de l'électricité. Il est, en effet, le plus conducteur de tous les métaux, et sa supériorité à ce point de vue est considérable. La résistance d'un fil de cuivre au passage du courant est quatre ou cinq fois moindre que celle d'un fil de fer. L'argent seul serait légèrement

supérieur au cuivre à ce point de vue, mais son prix élevé ne permet pas d'y songer. Pour satisfaire à ces nouveaux besoins, on a été amené à perfectionner les moyens d'épurer le cuivre, car des traces de matière étrangère suffisent à diminuer beaucoup sa conductibilité. Heureusement, l'électricité a fourni elle-même le moyen de satisfaire aux exigences nouvelles qu'elle imposait. Nous avons vu que l'affinage électrique permettait d'obtenir du cuivre chimiquement pur.

Alliages du cuivre. — Dans la plupart des cas où l'on a besoin de résistance, le cuivre est employé plutôt sous forme d'alliage. Le laiton, où le cuivre est allié surtout au zinc dans des proportions qui peuvent aller jusqu'à plus de 40 pour 100, mais qui se tiennent le plus souvent entre 25 et 30 pour 100, est plus résistant que le cuivre et presque aussi malléable. Il peut le remplacer avec avantage toutes les fois que l'on emploie le cuivre en feuilles. Le laiton de guerre, qui contient 25 ou 30 pour 100 de zinc, sert à faire les enveloppes de cartouches. Ce métal est très sensible à l'effet du recuit et de l'écrouissage; quand il a été travaillé avec soin, sa résistance peut être supérieure même à celle du fer doux.

Le bronze ou alliage de cuivre et d'étain sert surtout pour les objets destinés à être moulés. Il est plus dur que le cuivre, mais sans être cassant; il est beaucoup moins malléable que le laiton, de sorte qu'on lui préfère ce dernier pour toutes les fabrications qui exigent un travail mécanique. Le bronze sert, par exemple, dans tous les petits organes de machines, tels que les coussinets, les robinets; on l'emploie aussi pour de grands moulages. Les canons étaient autrefois fondus en bronze à 10 pour 100 d'étain. La plupart des hélices de navires sont aujourd'hui coulées en bronze. Les cloches se font avec un alliage plus riche en étain: il peut en contenir 25 pour 100. Ce métal, d'un grain très serré, devient cassant; mais, par suite de sa grande compacité, il est beaucoup plus sonore que le bronze ordinaire.

Il existe un nombre infini d'alliages dont on varie la composition pour chaque usage en combinant avec le cuivre à la fois l'étain et le zinc et même en ajoutant d'autres métaux. Ainsi les alliages triples du cuivre avec le zinc et le nickel, connus sous le nom de maillechort argentan, etc., remplacent le cuivre avec avantage pour beaucoup d'usages domestiques. Ils servent à la fabrication des couverts, des théières, des cafetières; ils sont encore moins altérables que le cuivre et leur couleur blanche les fait souvent préférer.

Emplois du nickel. — Le nickel pur participe des avantages du fer et du cuivre et pourrait remplacer très bien ce dernier métal dans la plupart des usages domestiques; mais il est encore peu employé à cause de son prix élevé. Le nickel, en effet, possède la résistance et la malléabilité du fer et il est beaucoup moins altérable. En feuilles minces, il se travaille presque aussi facilement que le cuivre. Le ferro-nickel est supérieur comme résistance aux meilleurs aciers, et il est à peu près inaltérable. Son prix élevé, la difficulté et la lenteur avec lesquelles il se travaille limitent encore son application à de petits objets où la valeur de la matière première a peu d'importance.

Le nickel a été pendant longtemps un métal absolument rare; on ne l'extrayait qu'en très petite quantité des sous-produits du traitement de minerais complexes, comme ceux qu'on trouve notamment dans les filons de la Saxe. Il coûtait alors plus de 20 francs le kilogramme. On a découvert en Nouvelle-Calédonie des gisements de silicate de nickel dont l'exploitation a fait descendre ce prix à 5 francs; et, depuis peu, on a trouvé au Canada de puissants filons de sulfure de cuivre assez riches en nickel. Le cours est descendu jusqu'à 3 francs le kilogramme. Néanmoins, la production est toujours assez limitée et ne dépasse guère 5000 ou 6000 tonnes par an.

Une des applications les plus intéressantes du cuivre et du nickel est due à la facilité avec laquelle on les dépose sous forme

de couches adhérentes par le courant électrique. Le nickel sert ainsi à recouvrir d'un dépôt très mince les objets en fer, de façon à en protéger les surfaces contre l'oxydation; en déposant une couche de cuivre sur un modèle dont on a enduit la surface d'une couche de plombagine, on peut obtenir par la galvanisation des reproductions exactes en cuivre d'un objet quelconque. Ce procédé a pris une grande importance pour la fabrication des clichés, pour la reproduction des objets d'art.

Rôle du plomb. — Le plomb est le plus mou de tous les métaux. Il peut se rayer à l'ongle; son rôle est donc tout différent de celui du cuivre et du fer, mais il doit à sa mollesse même des applications importantes; il est facile à travailler, se pétrissant presque comme de la cire; de plus, il fond à très basse température, ce qui permet de le mouler sans avoir besoin de foyer, ni d'une installation spéciale. Il est également très facile à souder avec des alliages qui fondent à la flamme d'une lampe. Il sert surtout à faire des tuyaux que l'on peut courber à la main et qui, pour les petites distributions intérieures d'eau et de gaz, rendent des services qu'on ne pourrait pas demander à un métal plus raide. Dans les grandes conduites en fonte, le plomb sert à garnir les joints parce qu'il peut s'écraser et remplir hermétiquement tous les interstices. Il peut jouer le même rôle dans beaucoup de constructions pour faire des scellements, pour sceller ensemble des pièces de fer dont l'attache doit conserver une certaine souplesse. On fait aussi des moulages, comme ceux qui servent pour les jouets ou encore pour les caractères d'imprimerie. Pour ce dernier usage, le plomb seul serait trop mou; mais, en l'alliant à 10 pour 100 d'antimoine, il acquiert la dureté nécessaire. Ces alliages très fusibles peuvent se mouler même sur du carton.

Le plomb durci par alliage avec l'antimoine ou avec l'arsenic a un rôle tout spécial, qu'il doit à sa grande densité (1) : c'est la

(1) L'arsenic sert surtout à la fabrication du plomb de chasse, l'antimoine à celle des balles.

fonte des balles. Une balle en plomb est presque deux fois plus lourde qu'une balle en fer. C'est un avantage important, parce qu'une fois lancée elle a emmagasiné plus de force vive et conserve plus longtemps sa vitesse.

Si l'on pouvait faire des balles en or, elles seraient encore bien supérieures, car la densité de l'or atteint 19, tandis que celle du plomb est de 13. Cette question de balistique est si importante qu'on a songé à faire des balles en tungstène, parce qu'il est à peu près le plus lourd de tous les métaux. Malgré sa grande rareté, le tungstène ne serait peut-être pas inabordable comme prix, mais il est à peu près infusible; on ne peut le mouler comme le plomb et la fabrication des balles exigerait alors un travail considérable.

Propriétés et usages du zinc. — Le zinc n'a été longtemps employé que sous forme d'alliage avec le cuivre. On a même connu ces alliages avant de connaître le zinc pur, dont l'extraction est à plus d'un point de vue assez difficile. On préparait autrefois le laiton en fondant le cuivre avec un mélange de calamine et de charbon; ce n'est que vers 1825 que l'on a commencé, en Belgique, à extraire directement le zinc de ses minerais, et ce métal a mis quelque temps à se faire une place dans l'industrie. Au premier abord il semble assez mal doué par la nature; il a peu de résistance et il n'est pas plastique comme le plomb; il se casse assez facilement, surtout quand il n'est pas très pur.

Cependant il partage avec le plomb l'avantage d'être très fusible et de pouvoir se souder aisément, et sa légèreté relative peut devenir dans beaucoup de cas une supériorité. Le zinc se lamine en feuilles très minces. Sous cette forme, on peut le plier en agissant avec précaution; il sert à couvrir les toitures, à faire des tuyaux, des réservoirs; il est plus léger que le cuivre et le plomb, qui peuvent le remplacer dans ses applications; il est plus facile à manier et surtout à souder que la tôle de fer, qu'on ne peut laminer très mince sans un travail long et sans l'aide de machines

puissantes. On le préférera donc à la tôle de fer toutes les fois qu'il n'y a pas besoin d'une grande résistance.

Le zinc sert aussi à faire beaucoup de moulages à bon marché ; c'est lui que l'on emploie dans l'industrie des moulages d'art pour faire des candélabres, des sujets de pendules, des statuettes que l'on reproduit à un très grand nombre d'exemplaires. Ces objets seraient beaucoup plus coûteux en bronze, et en plomb ils seraient trop lourds. On les moule par un procédé curieux et très rapide : le zinc liquide est versé dans un moule en bronze représentant la forme extérieure de l'objet. Au bout d'un instant on retourne le moule et on laisse couler tout le métal qui reste fondu. Une petite couche de zinc s'est figée au contact du moule froid. On obtient ainsi, sans avoir besoin de préparer un noyau comme pour la fonte des statues ordinaires, la reproduction exacte de l'objet sous forme d'une coquille métallique vide à l'intérieur.

Le moulage d'un objet plein ne peut en effet s'employer que pour de très petites pièces, à cause du poids énorme qu'il prendrait et de la grande masse de métal qu'il absorberait.

Le cuivre, le plomb et le zinc sont les trois grands métaux usuels ; ils entrent dans l'industrie en quantités importantes et à peu près comparables. Il est à remarquer qu'on les trouve souvent réunis dans la nature ; les filons sulfurés contiennent fréquemment à l'état de mélange la galène, la blende et la pyrite cuivreuse. On les sépare par lavage, et les mêmes groupes d'usines peuvent travailler isolément les trois minerais et produire les trois métaux.

Métaux accessoires. — A côté d'eux quelques métaux beaucoup moins répandus jouent un rôle plus accessoire et sont néanmoins des auxiliaires très utiles de l'industrie : tels sont par exemple l'étain et l'antimoine.

On les emploie surtout à l'état d'alliage ou de placage.

Étain. — L'étain est le plus fusible de tous les métaux, il fond à 220 degrés ; en le combinant avec certains corps, on arrive même

à faire des alliages métalliques qui fondent dans l'eau bouillante. Il est très peu altérable à l'air ; lorsqu'il s'attaque par les liquides, il ne donne pas de sels vénéneux, comme le plomb et le cuivre. C'est ce qui le fait employer pour recouvrir ces métaux ; sa fusibilité permet de l'étendre facilement en couches minces sur le cuivre, auquel il adhère en se solidifiant. Tout le monde connaît ce procédé d'étamage.

L'étain seul est employé quelquefois à faire de la vaisselle. Cet usage était beaucoup plus fréquent au moyen âge. On peut mouler avec de l'étain des vases de toutes formes ; la facilité de le couler sur le carton et le bois permet d'obtenir sans peine des moulages ornés ; les feuilles minces d'étain très flexibles sont employées souvent pour envelopper les denrées alimentaires.

L'étain forme plusieurs alliages intéressants. Nous avons déjà signalé le bronze. On peut l'allier au plomb pour séparer les feuilles plus résistantes et encore très malléables avec lesquelles on fait, par exemple, les tuyaux d'orgues.

Antimoine. — L'antimoine sert surtout à durcir le plomb ou ses alliages. L'antimoine et l'étain, combinés au plomb et au zinc, forment la base d'alliages multiples que l'on désigne sous le nom de *métal blanc*. Ces alliages faciles à mouler servent à la robinetterie, à la couverture des comptoirs de marchands de vin, à la fabrication de toute espèce de vases et de vaisselle à bon marché. Lorsqu'ils doivent être en contact avec des liquides alimentaires, ils ne doivent pas contenir plus de 10 à 15 pour 100 de plomb, à cause des propriétés vénéneuses de ce métal.

Les mêmes éléments, combinés en proportion très variable, servent à faire les métaux d'*antifriction* avec lesquels on garnit les coussinets, les paliers des machines, lorsque ces organes n'ont pas à supporter des chocs ou des efforts trop considérables : le bronze, qui sert pour les coussinets les plus exposés, est en effet moins facile à couler et à appliquer. D'autre part, les coussinets en bronze sont durs et peuvent *gripper*, c'est-à-dire donner un frot-

tement exagéré s'ils ne sont pas bien tournés et bien graissés; les alliages fusibles se ramollissent à la surface en cas de frottement anormal et se moulent en quelque sorte sur l'axe qu'ils doivent supporter.

Le bismuth, métal cassant et très fusible, voisin du plomb par ses propriétés chimiques, sert quelquefois à durcir les métaux ou à faire des alliages extrêmement fusibles, mais il est très rare. Il n'a pas d'importance industrielle.

Répartition de la production métallurgique. — L'Angleterre détenait autrefois une sorte de monopole dans le commerce des métaux: c'était presque le seul grand marché des métaux usuels, et aujourd'hui encore le cours de Londres fixe souvent la valeur commerciale des métaux en Europe. Cette nation a dû sa grande position métallurgique au développement de son commerce maritime et à la richesse de son sol en combustibles. Toutes les industries qui utilisent la houille s'y sont développées plus vite que dans le reste de l'Europe. Elle possède du reste, dans ses montagnes, des gisements métalliques nombreux.

Les usines qui traitaient ces minerais indigènes, par suite de leurs communications faciles avec la mer, ont pu acheter et faire venir à peu de frais des minerais de tous les pays lointains où l'industrie n'existait pas encore.

C'est ainsi que l'Angleterre était, il n'y a pas longtemps, le principal producteur de cuivre. Aujourd'hui, les gisements locaux sont en grande partie épuisés. Les mines du Chili, des États-Unis se sont doublées de grandes usines qui traitent le minerai sur place, et les fonderies de cuivre anglaises, obligées de s'alimenter surtout avec les minerais étrangers, ont perdu de leur importance relative. Leur principale ressource n'est, actuellement, que le traitement des pyrites importées d'Espagne. Les États-Unis sont devenus pour le cuivre, le plomb et le zinc, comme pour le fer, les producteurs les plus importants.

En Europe, l'Espagne est peut-être le pays le plus riche en

gisements métalliques ; c'est celui qui produit le plus de plomb, il a même en ce moment le pas sur les Etats-Unis. C'est aussi le district du Rio-Tinto, à cheval sur la frontière de l'Espagne et du Portugal, qui fournit les plus grandes quantités de cuivre, surtout si l'on y fait figurer celui qui est apporté à l'état de minerai pour être traité en Angleterre. L'industrie du zinc même a commencé à se développer dans les Asturies. L'Espagne possède du reste aussi des bassins houillers dont l'exploitation commence seulement à se développer. Le jour où la péninsule ibérique sera douée d'un réseau de communications plus développé, où l'on pourra mettre en valeur les gisements perdus aujourd'hui au milieu de montagnes inaccessibles, où l'on exploitera ceux du Portugal qui sont encore presque inconnus, cette région prendra peut-être la place prépondérante qu'occupait autrefois l'Angleterre.

L'Allemagne a été pour ainsi dire le berceau de l'industrie des mines métalliques. Les grands champs de filons du Hartz, de la Saxe, de la Bohême ont été exploités méthodiquement dès le moyen âge, à une époque où les autres peuples ignoraient presque l'art des mines. Ce sont des ingénieurs et des ouvriers allemands qui ont été, au dix-septième et au dix-huitième siècle, les éducateurs des peuples voisins et qui sont venus par exemple organiser l'exploitation des mines de plomb en Bretagne et dans le centre de la France. Aujourd'hui ces mines, vénérables par leur antiquité, approchent de la période d'épuisement ; on est obligé de poursuivre les filons jusqu'à des profondeurs où le travail devient très difficile. La Bohême possède le puits le plus profond du monde ; il va jusqu'à 1200 mètres. La température y devient telle qu'on est à la limite de ce que les travailleurs peuvent supporter.

Les usines de l'Allemagne centrale et du Rhin produisent encore d'assez grandes quantités de plomb et de zinc ; elles pourront soutenir pendant quelque temps leur production, mais elles ne peuvent guère la développer. Le district du Mansfeld, que nous avons eu l'occasion de citer, est le plus grand centre de production du cuivre en Europe, après l'Espagne et l'Angleterre.

La Suède, la Russie, la Hongrie ont eu jadis des usines à cuivre célèbres ; leur importance est devenue très faible vis-à-vis du développement toujours croissant de la production dans d'autres pays. Toutefois, en Russie, la métallurgie, qui ne s'était développée que dans l'Oural, n'en est qu'à ses débuts. On n'a fait qu'effleurer les ressources minérales de cet immense empire, qui prendra sans doute une place importante pour toutes les industries, comme il commence à le faire pour celle du fer.

L'Angleterre et la Belgique sont surtout des pays d'élaboration. Possédant le combustible à bon marché, une population ouvrière expérimentée et très active, leurs usines continuent à travailler des minerais étrangers lorsque les gisements près desquels elles se sont fondées s'épuisent par une exploitation intensive. Elles concentrent notamment les minerais qui viennent des îles et des côtes de la Méditerranée. Toutes ces régions montagneuses sont riches en gîtes minéraux, mais dépourvues de combustibles ; la métallurgie n'a pu encore s'y implanter, on n'exploite que les mines les plus riches et situées assez près de la mer pour pouvoir expédier leurs produits au loin. L'Asie Mineure, où l'on connaît quelques bassins houillers, deviendra sans doute un pays très riche au point de vue métallurgique, lorsque ce pays, qui a été le berceau de la civilisation en Europe, sortira de l'état de marasme et de désordre où il est plongé depuis si longtemps.

L'industrie du zinc tient une place un peu à part à cause de la grande consommation de combustible qu'elle exige, des difficultés pratiques qu'elle présente pour des ouvriers inexpérimentés ; elle est beaucoup plus localisée. Il n'y a que trois grands centres en Europe : l'Angleterre, la Westphalie, la Silésie ; tous les trois se sont développés parce qu'ils possédaient à la fois des mines de houille et de zinc.

Les deux premiers ont pu augmenter leur puissance et la conserver, même après l'épuisement des plus belles mines locales, par la facilité qu'ils ont à recevoir les minerais de l'étranger. La

Silésie, moins favorisée à ce point de vue, est peut-être appelée à décliner à mesure que ses richesses propres s'épuiseront.

La France emprunte à l'étranger la plus grande partie des métaux qu'elle consomme; l'exploitation des mines métalliques y est peu développée et a souvent assez mal réussi, peut-être parce qu'elle n'était pas menée avec assez de méthode et de persévérance. Ces échecs ont fait ériger en dogme la pauvreté de notre sol en gîtes métalliques. Cependant, depuis quelque temps, un mouvement se prononce pour chercher à mieux utiliser nos richesses naturelles.

Les mines de zinc des Bormettes, près d'Hyères, et des Malines, dans le Gard, sont très prospères, mais leurs produits sont encore expédiés en Belgique pour y être traités. Il existe en Bretagne et dans le Plateau central quelques mines de plomb dont les produits sont aussi en grande partie traités à l'étranger. On connaît beaucoup d'autres gisements de plomb peu exploités; il ne paraît pas douteux qu'ils pourraient produire assez de métal pour la consommation nationale.

L'étain se rencontre sous forme d'oxyde disséminé dans des roches granitiques. On enrichit ces minerais naturellement très pauvres par un lavage prolongé, avant de les traiter. On a exploité des sables stannifères en Angleterre, des minerais granitiques en Saxe; mais la plupart de ces minerais viennent de contrées très reculées, surtout des îles de la Malaisie et de l'extrême pointe de l'Indo-Chine. L'étain de Banca ou des Détroits a une marque réputée. Il en vient aussi une certaine quantité de Chine et du Japon. Le métal est le plus souvent extrait ou tout au moins raffiné en Angleterre, qui sert d'entrepôt pour tous ces produits.

L'antimoine se rencontre en filons dans les montagnes de l'Auvergne et de la Corse. Il existe dans le Centre quelques usines qui traitent les minerais sur place, mais une grande partie est encore fondue en Angleterre; ce pays reçoit aussi des minerais de l'Asie, du Japon. Dans ces contrées reculées, on fond sur place avec du bois le minerai de façon à liquater du sulfure pur. C'est ce

composé riche que l'on envoie en Angleterre, où on le fond avec du fer dans des creusets pour en extraire l'antimoine. Ces méthodes ne permettent d'utiliser que les minerais riches, et autrefois la plupart de nos mines d'Auvergne étaient obligées de fermer dès que le cours de l'antimoine descendait un peu bas. Aujourd'hui, cette situation s'est améliorée par la découverte des procédés de M. Chatillon.

En traitant les minerais au cubilot, il volatilise l'antimoine et le recueille sous forme d'oxyde. Cette volatilisation, qui était autrefois le désespoir des fondeurs, qui faisait perdre une grande partie du métal, est devenue un auxiliaire précieux qui permet d'isoler immédiatement l'antimoine, sans pertes, sous forme de produit riche. Ces oxydes peuvent être réduits par le charbon pour extraire le métal, ou utilisés directement dans la fabrication de divers produits pharmaceutiques.

Métaux précieux. — Les métaux précieux ne se rencontrent dans leurs minerais qu'en proportion très faible. Ainsi la plupart des minerais d'argent contiennent moins de 1 kilogramme par tonne. Pour l'or, on traite parfois des minerais qui contiennent moins de 10 grammes, c'est à dire que le métal n'en forme pas la cent millième partie. Des matières si pauvres ne peuvent être traitées que sur place et il faut des gisements importants; on ne peut opérer que sur des masses considérables, le travail de petites quantités serait trop peu rémunérateur.

L'argent est souvent un sous-produit de la métallurgie du plomb; il se trouve allié naturellement à ce métal, d'où on l'extrait par coupellation. Mais la plus grande partie est aujourd'hui fournie par des minerais spéciaux, pauvres en plomb.

De tout temps on a été chercher très loin les métaux précieux et cette industrie est toujours allée s'établir presque aux bornes du monde civilisé. C'est ainsi que les Égyptiens exploitaient les régions inconnues du centre de l'Afrique ou de l'Inde; les Phéniciens allaient chercher les métaux dans les parages hyperboréens et

gardaient soigneusement le secret des routes à suivre pour cette navigation, qui était à cette époque un tour de force. Les Romains ont exploité avec une grande activité les mines de la Transylvanie, où se trouvait la limite du monde barbare et le dernier point atteint par la conquête de Trajan.

La production d'or et d'argent a, du reste, été assez faible pendant l'antiquité ; elle l'est devenue encore plus au moyen âge, où l'on refondait surtout les anciennes pièces. Elle s'est développée tout d'un coup au moment de la conquête de l'Amérique, et les colonies lointaines des Espagnols, le Mexique, le Pérou, ont été les grands districts producteurs ; pendant quelques siècles, ces mines donnaient beaucoup plus d'argent que d'or. L'extraction de ce dernier métal s'est développée brusquement, de manière à produire une véritable crise économique dans le courant de notre siècle, par l'exploitation des mines de Californie et d'Australie.

Le même phénomène s'est renouvelé de nos jours par la découverte de celles du Transvaal.

A ces trois pays s'ajoute la Sibérie, où l'exploitation, déjà très ancienne, se développe chaque jour et qui partage avec le centre de l'Afrique l'attention et les efforts des explorateurs. En dehors de ces quatre grandes régions, la production de l'or est relativement insignifiante ; mais, à mesure que ces centres se civilisent, les chercheurs ont exploré les régions encore neuves. C'est ainsi qu'en Australie, l'industrie s'est d'abord développée dans l'Est, mais on explore aujourd'hui avec une activité fiévreuse les régions encore presque désertes de l'Ouest ; en Afrique, on quitte le Transvaal pour explorer les pays encore vierges et inhospitaliers du Centre, comme le Mashonaland, le Béchuanaland, etc.

En Amérique on se jette aujourd'hui sur l'Alaska pour arracher l'or à un sol que les glaces polaires semblaient devoir rendre inviolable ; des entreprises se forment pour explorer, de l'autre côté du détroit de Behring, les régions les moins accessibles de la Sibérie, où se continuent les formations géologiques de l'Alaska.

Il est inutile d'insister sur les usages spéciaux que l'argent et l'or doivent à leur inaltérabilité. A côté d'eux, nous citerons le platine ; ce métal est infusible dans les foyers ordinaires, on ne peut le liquéfier avec la flamme du chalumeau à oxygène et hydrogène ; il est, du reste, inattaquable par presque tous les acides. Ses propriétés le rendent précieux pour les appareils de laboratoire, les alambics destinés à la distillation des acides ; il a trouvé aussi une application importante pour la fabrication des lampes électriques à incandescence, où deux fils de platine noyés dans le verre fondu servent à transmettre le courant à travers l'ampoule qui contient le fil de charbon incandescent et dans laquelle on doit faire le vide.

Quoiqu'il ne s'agisse ici que de pièces extrêmement petites, leur grand nombre en fait un débouché qui n'est pas sans importance pour un métal aussi rare que le platine. En effet, la production annuelle ne dépasse guère 6000 kilogrammes.

On ne le trouve que dans l'Oural, où il existe en grains à l'état natif, disséminé dans certains sables. On l'isole facilement par lavage, car sa densité est très considérable, et les grains sont ensuite fondus, puis laminés. Le platine est malléable et aussi résistant que le cuivre ; on l'emploie presque toujours en feuilles ou en fil.

Avec lui on rencontre, associés dans les mêmes gisements, mais en proportion beaucoup plus faible, toute une famille de métaux qui ont des propriétés analogues. Tels sont le palladium, le rhodium, l'iridium, etc. ; ces deux derniers sont encore plus infusibles que le platine ; ils peuvent servir à le durcir sous forme d'alliage. C'est ainsi que l'étalon du mètre adopté par la Commission internationale a été fait en platine à 10 pour 100 d'iridium ; ces métaux, très rares, figurent quelquefois dans de tout petits objets, comme les pointes de plumes inaltérables que l'on fait avec l'iridium.

Baisse des métaux. — A mesure que l'industrie progresse et

perfectionne son outillage, le prix de revient des métaux diminue et de nos jours la baisse s'est continuée progressivement sur presque tous les métaux ; s'il y a parfois quelques alternatives de relèvement, la tendance générale reste toujours bien marquée dans le même sens. Depuis une trentaine d'années le cours moyen des métaux usuels a presque diminué de moitié et il ne semble pas qu'on puisse s'attendre à des changements notables ; le cuivre, à cause de ses nombreuses applications à l'électricité, est peut-être le seul métal pour lequel on prévoit une tendance à la hausse.

L'argent a longtemps échappé à cet avilissement général à cause de son rôle monétaire ; mais l'écart entre sa valeur commerciale et la valeur fictive que lui attribuait la loi dans un grand nombre de pays, a fini par créer des situations inacceptables. La plupart des nations qui ont conservé encore en théorie le double étalon monétaire sont obligées de restreindre ou de suspendre la frappe de l'argent, sous peine de se voir encombrées de monnaie décriée. Le lingot est tombé à près de 100 francs le kilogramme au lieu de 215 francs ; la production intensive des mines de l'ouest des États-Unis a été une des principales causes de cette dépréciation et elle a presque mis la grande Confédération sous la menace d'une guerre civile, tant les producteurs d'argent luttent avec acharnement pour forcer l'État à rétablir la frappe libre, qui doublerait le prix légal de leur marchandise.

Transformations futures de la situation métallurgique. — On peut se demander si ce mouvement de baisse général est une loi naturelle dont les effets doivent continuer à se produire. Il est évident qu'il doit avoir une limite et il semble qu'on n'en soit pas aujourd'hui bien loin, car on connaît nombre de mines qui ne peuvent plus exploiter utilement au cours actuel.

Ce ne sont même pas les seuls progrès de la métallurgie qui expliquent la réduction des prix. Le plus souvent les diminutions brusques sont amenées par la découverte de nouveaux gisements

faciles à exploiter et capables de donner une grande production. Pour le cuivre, le plomb et le zinc, c'est le développement rapide et inattendu de la métallurgie aux États-Unis qui a amené depuis une quinzaine d'années une baisse rapide et irrémédiable. L'exploitation dans ce pays a été menée avec tant d'activité que certains districts paraissent avoir usé en quelques années leur période de grande prospérité; un demi-siècle les aura vus naître, grandir et tomber en décadence. Mais les ressources de cette nation sont loin d'être épuisées et, à côté des mines qui sont forcées de ralentir leur production, on en découvre chaque jour de nouvelles qui viennent les remplacer.

Cependant, si les pays qui sont aujourd'hui producteurs de métaux entraînent seuls en jeu, il est probable que les cours ne pourraient guère s'abaisser beaucoup au-dessous des limites déjà atteintes; mais il n'y a encore qu'une petite partie de la surface totale de la terre qui soit complètement explorée. La moitié de l'Afrique et de l'Australie et la presque totalité de l'Asie ne fournissent encore rien à l'industrie métallurgique et sont certainement riches en gisements qui nous ménagent sans doute de nouvelles surprises. On verra donc encore plusieurs fois les districts miniers inconnus jeter sur le marché de grandes quantités de métaux et déprimer les cours; on verra l'industrie continuer ses migrations, passer successivement à des pays nouveaux, jusqu'à l'époque où, après avoir fait le tour de la terre en laissant derrière eux les plus beaux gisements épuisés, les mineurs seront obligés de revenir travailler ceux qu'ils avaient dédaignés comme trop pauvres ou de poursuivre à grand-peine le métal jusqu'à des profondeurs où le travail n'est plus rémunérateur aujourd'hui.

Alors, malgré tous les progrès possibles de la mécanique, l'extraction deviendra de plus en plus coûteuse, le prix des métaux se relèvera et ils finiront par être des objets rares et précieux comme dans l'antiquité. L'humanité sera obligée de vivre sur le stock existant en circulation et le rôle du métallurgiste se bornera un jour à recueillir pieusement tous les déchets de l'industrie, à

retravailler les métaux hors d'usage, à raffiner ceux qui se seront altérés ou oxydés, et à utiliser les moindres parcelles de ce que nous rejetons comme des rebuts sans valeur.

Cette époque est assurément très éloignée si l'on prend pour mesure la vie d'une génération ; mais, si l'on envisage l'histoire de l'humanité dans son ensemble, on peut presque dire qu'elle viendra demain.

Avec les allures actuelles de l'industrie, l'épuisement complet du sol jusqu'aux profondeurs qui semblent aujourd'hui la limite du travail possible dans la mine, n'est plus en Europe que l'affaire de quelques siècles. L'Amérique pourra maintenir plus longtemps son activité métallurgique, mais elle a peut-être déjà atteint son maximum de production. Avec l'ardeur que déploient aujourd'hui les explorateurs, les pays nouveaux et encore inconnus seront peut-être d'ici à cent ou deux cents ans au point où en est aujourd'hui l'Amérique. Il n'y aurait rien d'étonnant à ce qu'au siècle prochain la prépondérance industrielle se fût déjà transportée en Chine et en d'autres pays asiatiques.

La seconde moitié de notre siècle a certainement beaucoup plus fait pour avancer la consommation des richesses minérales de la terre que toutes les générations qui l'avaient précédée depuis l'apparition de l'homme. La quantité de métaux extraite depuis trente ou quarante ans dépasse de beaucoup celle qui existait chez tous les peuples avant cette époque. Nous dévorons rapidement le capital que nos prédécesseurs exploitaient avec une sage lenteur. Au train où nous y allons il n'en reste peut-être pas pour dix siècles. Le développement si brillant de l'industrie métallurgique de nos jours n'aura été qu'une phase transitoire et relativement courte dans l'histoire de l'humanité.

Le bimétallisme au point de vue industriel. — Cet épuisement des gîtes minéraux résoudra par la force des choses la controverse pendante entre le monométallisme et le bimétallisme, c'est-à-dire entre ceux qui veulent établir pour la monnaie un étalon

unique, généralement l'or, et ceux qui préconisent l'emploi de deux étalons, avec un rapport légal et invariable entre la valeur de l'or et de l'argent. Au point de vue purement rationnel, le monométallisme a pour lui la logique, car un rapport constant entre la valeur de deux produits naturels ne peut être fixé que d'une manière arbitraire, et le chiffre adopté un jour pourra se trouver le lendemain très différent de celui qui correspondrait à la réalité et qui exprimerait le rapport véritable des prix de revient ou des valeurs commerciales. On ne pourra pas, dans la pratique, conserver au second étalon une valeur factice hors de proportion avec la valeur réelle de la matière dont il est fait; il vaudrait donc mieux n'en adopter qu'un, et laisser le cours de l'argent s'établir et varier comme celui d'une marchandise ordinaire.

Si, au contraire, on examine les conditions de la production des métaux, le bimétallisme s'imposera dans un avenir plus ou moins éloigné. Dès à présent on peut soutenir qu'il est assez conforme aux lois de la nature. Le rapport entre les quantités des deux métaux existant dans la circulation, ou bien entre leur prix de revient moyen, ne varie pas autant qu'on pourrait le croire d'après les changements du cours; s'il y a des oscillations, elles se produisent autour d'un chiffre type, qui exprimerait le rapport entre les quantités totales d'or et d'argent disponibles à la surface et au sein de la terre. Les oscillations iront en s'amortissant et l'on se rapprochera d'un rapport stable qui deviendra immuable dans très peu de siècles, après l'épuisement définitif des gisements.

Le bimétallisme s'imposera alors : l'épuisement des mines de métaux usuels, qui arrivera sans doute plus tard, amènera même le règne du polymétallisme : l'extraction cessant, chaque métal n'existera plus qu'en quantités invariables, il n'y aura plus de raison pour que leur valeur relative se modifie, au moins pour ceux qui sont de première nécessité, car le cours ne pourra plus varier que suivant les besoins, tandis qu'aujourd'hui c'est surtout l'importance de l'extraction qui le règle.

TABLEAUX MONTRANT LE DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION MÉTALLURGIQUE
ET SA RÉPARTITION ENTRE LES PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.

I. — *Combustibles minéraux.*

(Production annuelle en millions de tonnes.)

ANNÉES	TOTALE	ÉTATS-UNIS	GRANDE-BRETAGNE	ALLEMAGNE	FRANCE
1850.....	»	»	5½	»	»
1864.....	173	23	94	26	11
1870.....	218	30	112	59	19
1880.....	339	67	150	60	15
1890.....	513	142	184	90	26
1900.....	723	240	230	150	35

II. — *Production sidérurgique.*

(Production annuelle en milliers de tonnes.)

ANNÉES	TOTALE		GRANDE-BRETAGNE		ÉTATS-UNIS		ALLEMAGNE	
	Fonte	Acier	Fonte	Acier	Fonte	Acier	Fonte	Acier
1864.....	9.000	419	4.900	225	840	13	1.000	97
1870.....	12.260	664	6.060	287	1.665	66	1.390	170
1880.....	18.547	4.274	7.875	1.320	3.235	1.247	2.800	660
1890.....	27.630	12.096	8.033	3.637	9.353	4.347	4.700	2.160
1900.....	40.968	27.182	8.800	4.700	12.200	9.320	8.350	6.645

III. — *Plomb.*

(Production annuelle en milliers de tonnes.)

ANNÉES	ALLEMAGNE	ESPAGNE	ÉTATS-UNIS	GRANDE-BRETAGNE	TOTALE
1870.....	63	90	16	74	»
1880.....	89	90	97	50	400
1890.....	104	190	160	30	586
1900.....	130	184	196	50	800

IV. — *Zinc.*

(Production annuelle en milliers de tonnes.)

ANNÉES	ALLEMAGNE	BELGIQUE	ÉTATS-UNIS	GRANDE-BRETAGNE	TOTALE
1860.....	60	22	»	4	100 ?
1870.....	63	46	5	4	150 ?
1880.....	99	59	19	20	250
1890.....	110	82	60	30	350
1900.....	155	124	111	30	490

V. — *Cuivre.*

(Production annuelle en milliers de tonnes.)

ANNÉES	ALLEMAGNE	ESPAGNE	ÉTATS-UNIS	GRANDE-BRETAGNE	TOTALE
1860.....	»	»	7	16	»
1870.....	»	»	12	7	»
1880.....	11	36	25	4	153
1890.....	17	52	116	1	270
1900.....	20	54	272	»	492

VI. — *Production des métaux précieux et variations
de leur valeur relative.*

ANNÉES	PRODUCTION ANNUELLE en milliers de kilogrammes		RAPPORT	
	Or	Argent	du poids de l'argent à celui de l'or	de la valeur de l'or à celle de l'argent
1500.....	6	47	8	10
1600.....	7	400	49	12
1700.....	12	355	27	15
1800.....		894	50	15,6
1840.....	20	606	29	15,8
1850.....	54	780	14	15,8
1855.....	199	886	4,4	15,4
1860.....	185	1.100	6	15,4
1870.....	173	1.969	11	16
1880.....	163	2.479	15	18
1890.....	181	4.180	23	20
1900.....	385	5.681	14,5	34

VII. — *Argent.*

(Production annuelle en millions de francs.)

ANNÉES	BOLIVIE	PÉROU	CHILI	MEXIQUE	ÉTATS-UNIS
16 ^e siècle....	35	6	»	6	»
17 ^e siècle....	25	22	»	16	»
1800.....	20	30	4	100	»
1850.....	15	15	13	80	»
1860.....	15	12	13	90	6
1870.....	18	10	15	100	60
1880.....	55	9	25	150	200
1890.....	60	15	25	215	350
1900.....	30	20	17	170	182

VIII. — *Or.*

(Production annuelle en millions de francs.)

ANNÉES	ÉTATS-UNIS	AUSTRALIE	RUSSIE	AFRIQUE	MEXIQUE	CANADA
1845.....	5	»	70	»	4	»
1850.....	250	30	75	»	4	»
1852.....	250	300	75	»	5	»
1860.....	230	250	80	»	6	»
1870.....	250	200	115	»	10	»
1880.....	180	245	140	»	5	4
1890.....	164	245	125	45	5	8
1898.....	325	310	125	300	40	65
1900.....	390	365	140	9	45	135

IX. — *Richesse minérale et métallurgique en 1899.*

PAR PUISSANCES		PAR PRODUITS			
Puissances	Valeur en milliers de francs	Produits	Quantité	Valeur en milliers de francs	Valeur moyenne de l'unité en francs
		Minéraux et fonte de fer	En milliers de tonnes		La tonne
États-Unis.....	4.389.688	Houille.....	657.075	5.674.396	8 60
Grande-Bretagne.....	4.074.192	Fonte.....	32.260	3.379.016	86 "
Allemagne.....	1.871.040	Pétaoles.....	15.547	485.504	30 50
Russie.....	769.524	Sel marin.....	12.805	242.193	19 "
France.....	684.879	Lignite.....	60.269	240.640	40 "
Autriche-Hongrie.....	529.661	Graphite.....	80.096	51.474	6 40
Belgique.....	443.052	Soufre.....	3.853	46.050	12 "
Répub. Sud-Africaine	417.645	Minerais bitu- mineux.....	2.877	25.061	8 70
Mexique.....	255.312	Pyrites.....	1.336	16.106	13 50
Hollande.....	190.722	Minerais de manganèse..	637	10.590	16 60
Espagne.....	171.737	Métaux communs	En tonnes		Kilogr.
Japon.....	100.293				
Italie.....	90.969	Cuivre.....	569.000	941.358	1 65
Chili.....	83.261	Plomb.....	752.680	322.549	" 42
Luxembourg.....	54.848	Zinc.....	477.168	287.472	" 60
Bolivie.....	51.654	Étain.....	81.244	236.168	2 91
Chine et Corée.....	41.753	Mercure.....	3.929	23.726	6 04
Colombie.....	22.702	Nickel.....	5.465	19.412	3 55
Grèce.....	18.682	Aluminium...	5.508	18.644	3 39
Pérou.....	17.718	Antimoine...	5.674	4.593	" 81
Bésil.....	8.212	Bismuth.....	696	2.254	3 24
Amérique Centrale..	6.980	Arsenic.....	2.520	1.375	" 55
Venezuela.....	3.076	Métaux rares	En kilogs		
Suisse.....	3.900				
République Argentine	1.897				
Turquie.....	781	Cadmium.....	13.600	105	7 72
Portugal.....	2.288	Tungstène....	20.400	280	13 73
Équateur.....	228	Molybdène....	13.600	194	14 20
Uruguay.....	148	Cobalt.....	9.600	165	17 20
Serbie.....	129	Urane.....	4.300	98	22 80
		Argent.....	7.085.748	702.137	99 "
		Platine.....	4.900	9.632	3.967
		Or.....	470.573	1.621.436	3.444
Total.....	14.362.650	Total.....	14.362.650		

X. — *État comparatif de la population
et de la richesse minérale des principales nations en 1899.*

NATIONS	POPULATION		RICHESSE MINÉRALE	
	En milliers d'habitants	Proportion centésimale	En milliers de francs	Proportion centésimale
Russie.....	132.023	27.4	769.524	6.1
États-Unis.....	76.305	15.8	4.389.688	34.6
Allemagne.....	56.340	11.6	1.871.049	14.7
Autriche-Hongrie.....	45.107	9.3	529.661	4.2
Japon.....	45.000	9.3	100.293	0.8
Grande-Bretagne.....	41.480	8.4	4.074.192	32.1
France.....	38.360	8.0	684.879	5.4
Italie.....	32.450	6.7	90.909	0.7
Espagne.....	17.045	3.5	171.737	1.4
	484.110	100.0	12.681.992	100.0

XI. — *Richesse minérale.*

PAR PRODUITS		PAR PUISSANCES	
Produits	Valeur en milliers de francs	Puissances	Valeur en milliers de francs
ANNÉE 1889. — 8.656.000.000 de francs.			
Combustibles minéraux ..	4.067.455	Angleterre et colonies....	2.758.999
Fonte.....	1.673.213	États-Unis.....	2.586.479
Argent.....	870.930	Allemagne.....	978.677
Or.....	585.997	France et colonies.....	411.875
Cuivre.....	510.932	Russie.....	316.586
Plomb.....	249.953	Mexique.....	291.529
Naphte et pétrole.....	200.855	Belgique.....	277.377
Zinc.....	165.095	Autriche-Hongrie.....	272.053
Sel gemme et sel marin.....	140.683	Espagne et Cuba.....	182.800
		Chili.....	128.611
		Hollande et détroits.....	68.943
		Italie.....	57.390

Richesse minérale (suite).

PAR PRODUITS		PAR PUISSANCES	
Produits	Valeur en milliers de francs	Puissances	Valeur en milliers de francs
ANNÉE 1889. — 8.656.000.000 de francs (suite).			
Étain.....	94.102	Bolivie.....	51.635
Soufre.....	26.351	Suède.....	46.999
Mercure.....	23.146	Chine.....	46.350
Minerais bitumineux.....	20.843	Japon.....	39.823
Platine.....	8.800	Transvaal.....	34.412
Graphite.....	6.422	Luxembourg.....	26.421
Nickel.....	4.950	Colombie.....	20.600
Cobalt.....	3.945	Pérou.....	17.161
Antimoine.....	1.891	Venezuela.....	14.790
Arsenic.....	1.555	Amérique centrale.....	11.973
Aluminium.....	1.267	Norvège.....	2.832
Bismuth.....	99	Grèce.....	3.875
Manganèse.....	53	République Argentine.....	3.237
		Brésil.....	2.293
		Suisse.....	1.625
		Portugal.....	282
ANNÉE 1898. — 11.247.000.000 de francs.			
Combustibles { Houille... 4.628.565		Angleterre et colonies... 3.075.686	
minéraux. { Lignite... 232.546		États-Unis..... 2.930.559	
Fonte..... 2.398.360		Allemagne..... 1.585.335	
Or..... 1.480.383		Russie..... 779.521	
Cuivre..... 618.175		France et colonies..... 592.072	
Argent..... 547.026		Autriche-Hongrie..... 436.853	
Naphte et pétrole..... 388.535		Belgique..... 375.417	
Plomb..... 287.000		Transvaal..... 426.445	
Zinc..... 231.575		Mexique..... 281.774	
Sel marin et sel gemme.. 155.954		Espagne..... 158.622	
Étain..... 102.419		Japon..... 141.268	
Soufre..... 43.762		Hollande et détroits..... 81.064	
Mercure..... 24.188		Italie..... 80.304	
Nickel..... 17.685		Suède et Norvège..... 54.282	
Minerais bitumineux..... 26.294		Chili..... 53.896	
		Luxembourg..... 51.624	
		Chine et Corée..... 40.359	
		Bolivie..... 38.070	
		Colombie..... 24.206	

Richesse minérale (suite).

PAR PRODUITS		PAR PUISSANCES	
Produits	Valeur en milliers de francs	Puissances	Valeur en milliers de francs
ANNÉE 1898. — 11.247.000.000 de francs (suite).			
Mincrais de manganèse...	14.012	Pérou.....	21.007
Aluminium.....	13.955	Grèce.....	15.687
Pyrites de fer.....	12.834	Brésil.....	13.112
Platine.....	9.632	Amérique centrale.....	7.683
Graphite.....	5.258	République Argentine.....	2.636
Antimoine.....	3.543	Venezuela.....	5.645
Cobalt.....	103	Suisse.....	2.400
		Équateur.....	929
		Portugal.....	391
		Uruguay.....	179

XII. — *Principales productions minérales et métallurgiques en 1898.*

(En milliers de francs.)

PUISSANCES	COMBUSTIBLES minéraux	FONTE de fer	CUIVRE	ZIN	PLOMB	ÉTAIN	OR Platine Argent
Angleterre.....	1.733.940	572.401	110.025	14.717	45.472	22.469	509.703
États-Unis.....	1.077.414	603.765	320.379	53.799	89.848	»	500.463
Allemagne.....	876.616	414.243	41.202	72.257	42.188	1.831	17.715
France.....	366.153	159.292	11.622	17.993	3.692	»	8.472
Russie.....	125.740	333.300	14.241	5.500	120	5	126.209
Autriche-Hongrie..	116.005	124.179	1.832	4.065	5.330	116	16.576
Belgique.....	242.894	65.940	»	59.409	6.962	»	»
Espagne.....	20.918	10.296	25.682	4.620	56.074	»	26.276
Japon.....	51.260	2.900	20.500	»	800	100	8.314
Italie.....	2.430	1.935	15.716	135	8.234	»	3.320
Transvaal.....	16.856	»	»	»	»	»	409.589
Mexique.....	»	»	20.800	»	28.560	»	230.296
Hollande.....	»	»	»	»	»	77.899	3.165

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE.

	Pages.
CHAPITRE I^{er}. — Production industrielle de la chaleur	1
Combustibles. — Fours à cuve. — Fours à réverbère. — Fours à gaz.	
— Production des hautes températures	1
COMBUSTIBLES	2
Classification des houilles.	3
Bois.	3
Produits de la combustion	4
Chaleur de combustion.	4
Utilisation de la chaleur	5
FOURS MÉTALLURGIQUES	6
Foyers primitifs.	7
Perfectionnements du bas foyer.	8
Fours à cuve	9
Fours de calcination	11
Fours à réverbère	13
Fours à creuset	16
Fours soufflés	19
FOURS A GAZ.	19
Production du gaz.	20
Gazogènes.	20
Combustion des gaz	24

	Pages.
Chauffage de l'air.	24
Fours Siemens.	27
Production des températures extrêmes.	29
CHAPITRE II. — Réduction des minerais oxydés	32
Principes généraux. — Réduction au four à cuve : plomb, cuivre, étain.	
— Réduction au réverbère. — Réduction au creuset	32
THÉORIE DE LA RÉDUCTION.	32
Fusion des métaux natifs.	33
Fusion réductrice.	33
Rôle des fondants.	34
Réduction partielle.	35
Réduction au four à cuve.	35
Conduite du four à cuve	36
Fours à plomb.	37
Fours à cuivre.	41
Extraction de l'étain.	41
RÉDUCTION AU RÉVERBÈRE.	43
Traitement des minerais d'étain.	43
Réduction des litharges.	44
Fusion des minerais de cuivre natifs.	44
Fusion du platine	44
RÉDUCTION AU CREUSET	45
Réduction de l'antimoine.	45
Réduction du nickel	46
CHAPITRE III. — Traitement des minerais sulfurés	47
Principes généraux. — Extraction du plomb. — Grillage de la blende. —	
Traitement des pyrites cuivreuses.	47
PROCÉDÉS GÉNÉRAUX DE TRAITEMENT DES SULFURÉS	47
Fontes pour mattes.	47
Grillage	48
Concentration des mattes.	48
Traitement final des sulfures purs.	50
Formules applicables aux divers minerais	51
TRAITEMENT DE LA GALÈNE	52
Grillage	52

TABLE DES MATIÈRES

	269
	Pages.
Fusion	52
Rôtissage	55
TRAITEMENT DES BLENDES	56
Grillage	56
Grillage avec utilisation des gaz	57
TRAITEMENT DES PYRITES CUIVREUSES	58
Grillage	59
Fonte pour mattes	60
Concentration des mattes	63
Rôtissage des mattes riches	64
Affinage pneumatique	64
MINÉRAIS PLOMBO-CUIVREUX	68
EXTRACTION DU NICKEL	69
Minerais de Nouvelle-Calédonie	70
Minerais du Canada	70
EXTRACTION DE L'ANTIMOINE	71
Traitement direct par le fer	71
Traitement par grillage et réduction	71
CHAPITRE IV. — Traitement par distillation	72
Distillation à l'état métallique : Mercure, Zinc. — Distillation à l'état d'oxydes : Zinc, Antimoine. — Condensation des fumées métalliques	72
DISTILLATION A L'ÉTAT MÉTALLIQUE	72
Minerais de mercure	72
Traitement du cinabre	73
Minerais de zinc	75
Fours à zinc	75
Condenseurs	77
Conduite de l'opération	79
DISTILLATION A L'ÉTAT D'OXYDES	82
Zinc	82
Blanc de zinc	83
Blanc de plomb	83
Fabrication de l'oxyde d'antimoine	83
Condensation des fumées métalliques	84
Carneaux de condensation	84

	Pages.
Carneaux à chicane	84
Procédés de refroidissement.	84
CHAPITRE V. — Traitement par voie humide	86
Considérations générales. — Traitement des minerais de cuivre pauvres.	
— Extraction des métaux précieux : Argent, Or	86
Considérations générales	86
Traitement des minerais de cuivre pauvres.	86
Méthode du Rio-Tinto	88
Grillage chlorurant.	88
EXTRACTION DES MÉTAUX PRÉCIEUX.	90
ARGENT	90
Minerais d'argent.	90
Fonte plombeuse.	90
Traitement par dissolution	90
Amalgamation	91
Méthode mexicaine.	92
Méthode des pans	93
OR	95
Lavage des sables	95
Méthode californienne	97
Traitement au bocard.	99
Cyanuration	100
Fonte plombeuse.	101
Chloruration.	102
CHAPITRE VI. — Affinage des métaux.	103
Affinage par fusion. — Affinage chimique : Séparation des métaux précieux. — Affinage électrique du cuivre	103
AFFINAGE PAR FUSION.	103
Conduite de l'opération.	103
Raffinage	104
Réactifs spéciaux pour le raffinage.	105
Affinage à la vapeur	106
Liquation	106
DÉSARGENTATION DU PLOMB	107
Coupellation.	108
Zingage.	109

TABLE DES MATIÈRES

	271
	Pages.
AFFINAGE DES MÉTAUX PRÉCIEUX	110
AFFINAGE ÉLECTRIQUE.	110
Principes de l'électrolyse	110
Affinage du cuivre.	112
Procédés Ellmore.	114
Autres applications de l'électrolyse	114
CHAPITRE VII. — Extraction des métaux rares ou réfractaires.	116
Métaux alcalins : Procédés chimiques, Procédés électrolytiques. — Mé-	
taux réfractaires : Réduction au four électrique.	116
MÉTAUX ALCALINS.	116
Gisements.	116
PROCÉDÉS CHIMIQUES	117
Réduction des oxydes alcalins.	117
Distillation du sodium	117
Déplacement des métaux par le sodium	118
Aluminium	118
PROCÉDÉS ÉLECTRIQUES	119
Électrolyse par fusion ignée.	119
Extraction de l'aluminium	119
Propriétés de l'aluminium.	121
RÉDUCTION AU FOUR ÉLECTRIQUE : MÉTAUX RÉFRACTAIRES	122
Effets de l'arc voltaïque.	122
Extraction des métaux réfractaires.	124
Fabrication du carbure de calcium.	124
Emploi des métaux réfractaires.	125
Avenir des procédés électriques.	126

DEUXIÈME PARTIE.

MÉTALLURGIE DU FER.

CHAPITRE I ^{er} . — Minéral.	128
Minerais de fer : Procédés d'extraction. — Méthode indirecte. — Fabri-	
cation de la fonte au haut fourneau	128
PROCÉDÉS D'EXTRACTION.	129

	Pages.
Méthode catalane	129
Méthode indirecte	131
Hauts fourneaux	131
Construction du haut fourneau	138
Hauts fourneaux à production intensive	141
Conduite du haut fourneau	141
Fabrication des différentes espèces de fontes	142
Influence des corps étrangers	144
Fontes spéciales	145
Travail du haut fourneau	146
Conditions économiques	148
CHAPITRE II. — Emploi de la fonte	150
Emploi de la fonte. — Moulage. — Affinage pour fer forgé : Affinage au bois, Puddlage. — Fabrication de l'acier	150
FONTE MOULÉE.	150
PROPRIÉTÉS DU FER ET DE L'ACIER	152
Fonte malléable	154
AFFINAGE DE LA FONTE	154
Fabrication du fer forgé	154
Affinage au bas foyer	156
PUDDLAGE.	157
Puddlage froid et puddlage chaud	158
Puddlage pour fer supérieur et pour acier	160
Puddlage mécanique	161
Travail du fer	162
Corroyage	164
ACIER.	167
Acier cimenté.	167
Fusion de l'acier au creuset	168
CHAPITRE III. — Fabrication de l'acier et du fer fondus.	172
Fabrication de l'acier et du fer fondus. — Procédés Bessemer et Martin. — Déphosphoration	172
Nouveaux procédés d'affinage pour fer fondu	172
Principes du procédé Bessemer	173
Marche de l'affinage au convertisseur	174

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
Rôle du manganèse.	176
Fabrication des diverses nuances d'acier.	178
Conditions économiques.	179
PROCÉDÉ MARTIN.	179
Four à régénérateurs.	179
Marche de l'opération.	182
Ore-process.	182
Conditions économiques et avantages du procédé Martin.	183
Types de fours récents.	185
Développement de l'emploi de l'acier fondu.	185
Déphosphoration.	186
Principes de l'affinage basique.	187
Construction des convertisseurs basiques.	187
Procédé Thomas Gilchrist.	188
Déplacement de l'industrie de l'acier en France.	189
Qualités particulières des aciers basiques.	191
Déphosphoration sur sole.	191
 CHAPITRE IV. — Travail de l'acier.	 193
Laminage. — Martelage au pilon et à la presse. — Effets du travail sur la qualité de l'acier. — Trempes et recuits.	193
Forgeage de l'acier.	193
Réchauffage.	193
 LAMINAGE.	195
Laminage universel.	197
Fabrication des fils.	198
Étamage.	200
 MARTELAGE.	201
Travail à la presse.	201
Outillage de manœuvre.	203
Utilité du forgeage.	203
Trempes et recuits.	204
 CHAPITRE V. — Emplois divers de l'acier.	 206
Aciers moulés. — Fabrication au petit convertisseur. — Aciers au nickel et au chrome. — Ferro-nickel. — Méthodes d'essai.	206
Moulage d'acier.	206
Emploi des petits convertisseurs.	207

	Pages.
Aciers spéciaux	208
Ferro-nickel.	209
Aciers au manganèse.	210
ESSAIS MÉCANIQUES.	211
Essais chimiques.	215
Examen microscopique.	216
CHAPITRE VI. — Historique de la métallurgie du fer.	218
Temps primitifs. — Époque moyenne : Découverte de la fonte. —	
Époque moderne : Développement rapide de l'outillage. — Age de	
l'acier.	218

TROISIÈME PARTIE.

ÉTAT ACTUEL DE L'INDUSTRIE MÉTALLURGIQUE

Production et emplois des métaux usuels. — Situation industrielle des différents pays. — Avenir de la métallurgie.	236
Rôle des différents métaux	236
Pays producteurs du fer.	237
Importance industrielle du fer.	239
Emplois du cuivre	240
Alliages du cuivre	241
Emplois du nickel	242
Rôle du plomb.	243
Propriétés et usages du zinc	244
Métaux accessoires.	245
Etain	245
Antimoine.	246
Répartition de la production métallurgique.	247
Métaux précieux.	251
Baisse des métaux	253
Transformations futures de la situation métallurgique.	254
Le bimétallisme au point de vue industriel	256

TABLE DES GRAVURES

Figures.	Pages.
1. — Fabrication du fer en Afrique.	6
2. — Bas foyer	7
3. — Fabrication du fer chez les Tartares.	8
4. — Demi-haut fourneau du Mansfeld, pour cuivre.	10
5. — Four coulant pour la calcination de la calamine.	11
6. — Four à foyer latéral pour la calcination de la calamine.	12
7. — Four d'affinage du cuivre	13
8. — Four de puddlage à cassin	14
9. — Four à plusieurs portes.	16
10. — Four de cémentation	17
11. — Four à moufle	18
12. — Gazogène à cuve soufflé	21
13. — Four Ponsard	23
14. — Four Boetius.	25
15-16. — Four Bicheroux.	26
17. — Four Siemens	28
18. — Valves du four Siemens.	29
19. — Four de fusion du platine	30
20. — Anciens fours du Hartz.	38
21. — Four circulaire pour minerai de plomb.	39
22. — Four à cuve pour minerai de plomb	40
23. — Four de fusion de l'étain à Malacca	42
24. — Four rectangulaire pour plomb.	53
25. — Four de grillage à plusieurs portes.	54
26. — Travail au four rectangulaire	55

Figures.	Pages.
27. — Four de grillage à soles superposées et à mouffles pour blends.	57
28. — Stalles en maçonnerie.	59
29. — Water-jacket pour cuivre.	61
30. — Four de fusion pour mattes de cuivre.	62
31. — Convertisseur à soufflage latéral.	65
32. — Convertisseur d'Anaconda.	67
33. — Cubilot servant à la fusion des minerais de nickel dans l'usine de MM. Christofle, à Saint-Denis.	69
34-35. — Four d'Idria.	73
36. — Four pour menus, employé en Nouvelle-Californie.	74
37. — Four belge, pour zinc.	76
38. — Four belge, pour zinc (coupe).	77
39. — Four silésien, à gaz.	78
40. — Coupe du four silésien à gaz.	79
41. — Four Siemens.	79
42. — Condenseur belge.	80
43. — Aspect extérieur d'un four belge.	81
44. — Traitement des pyrites cuivreuses pauvres au Rio-Tinto.	87
45. — Traitement des minerais d'argent au Mexique.	92
46. — Four tournant.	93
47. — Pan d'amalgamation.	94
48. — Lavage de l'or à la battée, chez les Indiens.	96
49. — Lavage de l'or sur table.	97
50. — Exploitation du minerai d'or en Californie.	98
51. — Bocard amalgamateur.	100
52. — Ensemble d'une installation pour le traitement des minerais d'or.	101
53. — Four de coupellation allemand.	107
54. — Cuve de zingage.	109
55. — Atelier d'affinage du cuivre.	111
56. — Bac pour l'affinage du cuivre.	112
57. — — — — —	113
58. — Four pour aluminium.	120
59. — Four ayant servi aux essais de M. Moissan.	123
60. — Four électrique Lowyser.	125
61. — Forge catalane.	130
62-63. — Haut fourneau ancien.	133
64. — Appareil à air chaud en fonte.	134
65. — Haut fourneau entouré de ses appareils à air chaud en briques.	135
66. — Haut fourneau, construction actuelle.	137
67. — Appareil Cowper, pour le chauffage du vent.	139

TABLE DES GRAVURES

Figures.	Pages.
68. — Couée de la fonte	146
69. — Machine soufflante verticale	147
70. — Tuyère refroidie	149
71. — Ouvriers retirant la loupe du bas foyer	155
72. — Marteau à queue	156
73. — Porte du four à puddler, ouverte, laissant voir les saumons de fonte empilés	158
74. — Four à puddler mécanique	161
75. — Marteau-pilon	163
76. — Laminoir à fer	165
77. — Four de cémentation (plan)	168
78. — — (coupe)	169
79. — Four à vent, à creuset	170
80. — Cornue Bessemer	175
81. — Poche pour la coulée de l'acier Bessemer	177
82. — Levier à quenouille	177
83. — Four Martin (coupe transversale)	180
84. — — (coupe longitudinale)	181
85. — Four Martin-Pernod au moment de la coulée	184
86. — Puits Giers (coupe)	194
87. — — (plan)	194
88. — Laminage en trio	196
89. — Laminoir universel de l'usine Saint-Jacques	199
90. — Presse de l'usine Saint-Jacques	202
91. — Coupes microscopiques d'acier	217
92. — Haut fourneau primitif	223
93. — Haut fourneau écossais vers 1845	227
94. — Forgeage d'un canon au marteau-pilon de 100 tonnes	229
95. — Vue d'ensemble d'un haut fourneau de la Moselle	231
96-97. — Essai comparatif de trois plaques de blindage	233