

LE FER ET L'ACIER

1/ LE DEVELOPPEMENT DE LA SIDERURGIE .

L'apparition des premières formes de fer naturel se situe vers 1700 avant notre ère en Asie mineure chez les Hittites. A cette époque, en Europe, on est encore à l'âge de bronze, l'âge du fer commencera bien plus tard vers 700 av.J.-C. Pour transformer le minerai de fer en métal, les premiers métallurgistes utilisaient des fourneaux rudimentaires en terre, les « bas fourneaux ». Ces fours étaient simplement constitués par un trou paré de pierres où étaient entassés en couches alternées du minerai de fer et du charbon de bois, le tout recouvert d'une couche d'argile. L'oxyde de fer, ramassé à même le sol, se présentait sous la forme de petites roches. On allumait ce fourneau et on exerçait un soufflage peu efficace à l'aide de tiges creuses. Dans ces fours rudimentaires, la température ne pouvait pas atteindre celle de fusion du fer pur soit 1535 degrés Celsius malgré les impuretés du minerai qui abaissaient cette température autour de 900 degrés.

Après bien des efforts pour entretenir jour et nuit un feu le plus vif possible, les métallurgistes obtenaient une masse pâteuse, incandescente, appelée la loupe ou massiot, sorte d'éponge de grains de fer amalgamés, mêlés à des scories. Il fallait battre énergiquement ce produit pour éliminer les impuretés dues à la chauffe et au charbon de bois. Le forgeage permettait ensuite d'obtenir des objets de la vie quotidienne, des outils agricoles ou des armes. Cette méthode dite directe permettait de produire du fer en petite quantité, faisant de ce métal une matière rare et précieuse.

Le fer n'apparaîtra vraiment en Gaule que vers 500 avant notre ère. Nos ancêtres celtes utilisaient un foyer à demi enterré dont les côtés s'élevaient un peu plus au-dessus du sol : le bas foyer. Le minerai y était toujours chauffé directement au contact du charbon de bois. Au cours des siècles, ces foyers s'élevèrent progressivement au-dessus du sol et le rendement devint supérieur grâce à un meilleur tirage et surtout grâce à l'activation de la combustion au moyen de soufflets manuels confectionnés à partir de peaux de bêtes. La température montait aux environs des 1100 à 1200°, ce qui éliminait l'oxygène contenu dans le minerai donnant alors une sorte d'acier naturel. Les masses pâteuses sortant des fours étaient toujours martelées énergiquement et ne dépassaient guère un kilogramme. Pour extraire ces loupes, on devait systématiquement détruire les fours et en reconstruire d'autres à chaque fois.



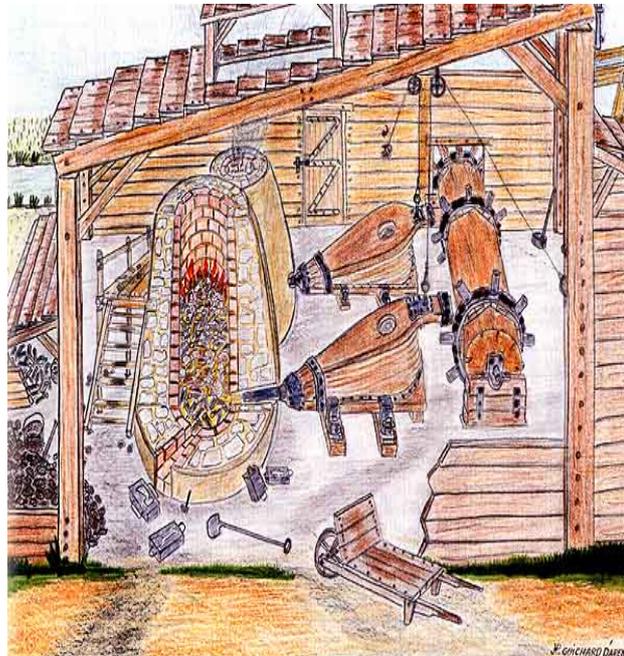
Ces techniques assez primitives de réduction directe dans lesquelles le charbon de bois servait à la fois d'agent thermique et de réducteur pour fixer l'oxygène vont perdurer en France jusqu'au XII^e siècle.

On assiste à une évolution technologique assez rapide au XIII^e siècle afin d'élever encore la température et la taille des fours. Les bas foyers se dressent de plus en plus haut au-dessus du sol pour atteindre deux mètres de haut. Ils sont construits en pierre avec un revêtement intérieur de briques réfractaires. On utilise l'énergie de l'eau pour actionner de grands soufflets et des marteaux servant à battre le fer. Grâce à l'emploi de la force hydraulique, des températures très élevées, proches du point de fusion sont atteintes et une loupe plus fluide peut s'écouler vers l'extérieur à travers un orifice à la base du four. Ces améliorations répondent à des besoins toujours grandissants de fer et les loupes produites atteignent plusieurs dizaines kilogrammes au début du Moyen Age.

2 / L'EVOLUTION TECHNOLOGIQUE DES HAUTS-FOURNEAUX.

Au XVI^e siècle, les fourneaux sont devenus d'imposantes constructions en pierre : ce sont les premiers « hauts fourneaux ». La hauteur augmente, le tirage et le soufflage se perfectionnent encore de sorte que la température de combustion s'élève de plus en plus. Dans ces premiers hauts fourneaux, le minerai de fer peut absorber une quantité croissante de carbone permettant à ce fer carburé de fondre à une température plus basse.

L'invention de la fonte se produisit vraisemblablement en Europe, en Belgique ou en Allemagne de façon tout à fait fortuite et inattendue au cours de la deuxième partie du XIV^e siècle. De ces nouveaux types de four sortit un jour, peut-être à l'occasion de la surchauffe d'un fourneau, un produit en fusion véritablement liquide alors que jusque là le fer se présentait sous la forme d'une masse plutôt pâteuse. Le nouveau métal obtenu était dur et cassant et pas du tout malléable. Il n'était ni forgeable ni soudable au feu mais il était possible de le mouler : la fonte qui est un alliage de fer riche en carbone (entre 2% et 7% de carbone) venait de naître,



Ce nouveau produit, fourni en grande quantité grâce aux hauts-fourneaux, permet de fabriquer de nombreux objets indispensables : des grilles, des ancrs, des marmites, des caractères d'imprimerie, des canons, etc.

Au XVII^e siècle, une véritable industrie métallurgique se développe. La fonte est traitée pour la débarrasser de sa trop grande teneur en carbone et pour éliminer ses impuretés. On obtient une matière de nouveau malléable, donc forgeable, l'acier. De nouvelles machines comme les laminoirs, les marteaux hydrauliques, les machines à tréfiler transforment ce métal en une foule d'objets usuels : couteaux, scies, clous, épingles, rasoirs...

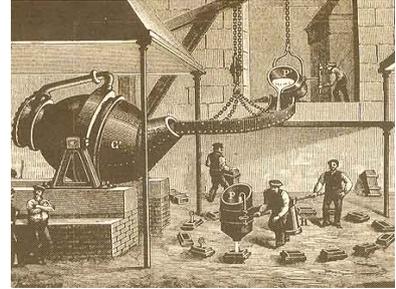
Jusqu'au XVIII^e siècle, les hauts fourneaux sont des ogres qui engloutissent les massifs forestiers européens. En Angleterre la consommation du charbon de bois est telle que l'on arrête la production et que l'on ferme, pour un temps, les usines. Finalement, les sidérurgistes anglais introduiront une innovation technique décisive : l'utilisation de la houille (le charbon de terre), sous forme de coke. Mais cette méthode aura le plus grand mal à s'imposer en France où des fonderies feront la fonte au bois jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

Les procédés de production d'acier.

La chaîne opératoire qui s'est généralisée dans le nord de l'Europe depuis le XVI^e siècle utilise donc les hauts-fourneaux et la force hydraulique pour transformer les minerais de fer en métal. C'est ce que l'on appelle le procédé indirect. Il se déroule en deux étapes : la réduction du minerai dans le haut fourneau donnant la fonte, suivie de l'affinage qui consiste à diminuer la teneur en carbone afin d'obtenir de l'acier ou du fer pur. Après cet affinage de la fonte, on trouve encore plusieurs éléments chimiques dans l'acier en fusion. Ce sont des impuretés ou scories (en général moins de 0,1%) comme l'oxygène, le phosphore ou le soufre qu'il faut éliminer. Plus tard, des éléments volontairement ajoutés amélioreront les caractéristiques physiques et mécaniques des alliages. L'addition de nickel, de chrome, de manganèse, de cobalt, de molybdène, de vanadium, d'aluminium ou de cuivre (entre 0,1% et 10%) donnent naissance aux aciers fins.

Depuis le XVIII^e siècle, ces procédés de production ont connu plusieurs avancées technologiques, souvent venues d'Angleterre et permettant d'obtenir plus facilement les aciers et les alliages dérivés.

- En 1784, un anglais H. CORT invente un procédé d'affinage de la fonte qui permet la transformation directe de la fonte en acier. La fonte est brassée pour provoquer l'oxydation du carbone et elle est séparée du combustible durant la chauffe: c'est le puddlage. A l'époque, ce brassage de la matière se faisait manuellement et les scories en surface étaient tirées vers l'extérieur.
- En 1855 l'invention du convertisseur BESSEMER constitue une véritable révolution sidérurgique : on affine la fonte en fusion dans une cornue en rotation, en faisant circuler un violent courant d'air au travers de celle-ci, la transformant ainsi en acier. La conversion ne nécessite plus que 30 minutes contre 24 heures pour les méthodes traditionnelles et elle permet de produire 10 tonnes d'acier en une seule opération.
- En 1864, un français, Pierre MARTIN, invente un autre procédé et réussit à obtenir de l'acier de très bonne qualité à partir du minerai de fer ou par la fusion de ferrailles grâce à un four à récupérateur de chaleur permettant des températures plus élevées que le procédé de Bessemer. L'utilisation du coke provoque un changement essentiel dans la technique, les hauts fourneaux prennent une dimension impressionnante pouvant atteindre trente mètres, les soufflets sont remplacés par des pistons actionnés par vapeur. En 1877 l'invention d'un nouveau type de convertisseur : les convertisseurs Thomas déphosphorent la fonte et élargissent la gamme des minerais utilisables et on fabrique grâce à eux de très grandes quantités d'acier.
- Avec le développement de l'électricité, les premiers fours à arc électrique apparaissent à la fin du 19^e siècle mais c'est au début du 20^e siècle que les hauts fourneaux sont électrifiés. Plus tard encore, les fours à induction remplaceront les vieux creusets.
- Entre les deux guerres mondiales la production d'un haut-fourneau est de 100 tonnes et atteint près de 500 tonnes par jour en 1940. La capacité du four Martin passe de 20 tonnes à 100 tonnes et celle des convertisseurs Thomas augmente de 15 à 30 tonnes.
- La Sidérurgie moderne, née dans les années 60, n'a gardé du siècle précédent que les principes de base. Aujourd'hui, certains hauts-fourneaux produisent jusqu'à 10 000 tonnes de fonte par jour et les convertisseurs atteignent des capacités de 300 à 400 tonnes dans les aciéries à l'oxygène. Il existe plus de 3000 nuances d'acier : c'est le deuxième matériau le plus utilisé au monde. La production de fonte brute dans les hauts-fourneaux joue un rôle économique primordial.



3/ LE FONCTIONNEMENT D'UN HAUT FOURNEAU.

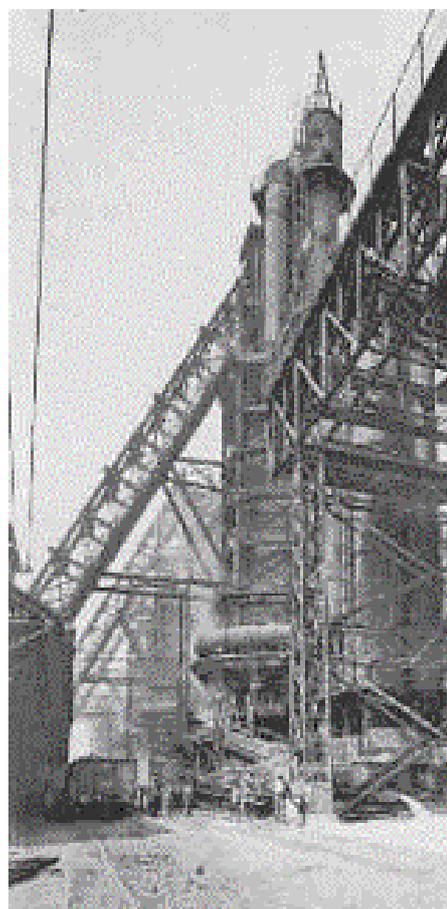


1/ Déversoir du fondant : c'est la matière incorporée dans la fonte pour abaisser sa température de fusion. Un fondant calcaire est employé dans les hauts-fourneaux lorsque le minerai de fer contient une trop forte proportion d'argile (carbonate de calcium CaCO_3).

2/ Déversoir de coke : Le coke c'est du carbone ou graphite pur obtenu à partir de la houille qui est passé dans un four afin d'éliminer les matières volatiles. C'est l'agent thermique qui sert aussi de réducteur pour fixer l'oxygène.

3/ Déversoir du minerai : les minerais de fer sont des mélanges naturels d'oxydes de fer : Magnétite Fe_3O_4 , Hématite Fe_2O_3 , Sidérose FeCO_3 ...Le minerai est concassé et enrichi pour éliminer le plus possible de gangue, la partie minérale du minerai est constituée de silice, d'alumine ou de calcaire...

4/ la charge : elle est composée des trois éléments précédents. Certaines bennes sont chargées uniquement en coke. Les produits sont amenés par des bennes de chargement jusqu'au gueulard situé au sommet du haut-fourneau.



Coupe d'un haut-Fourneau

1/Benne de chargement et trémie :

Les bennes parviennent au sommet du haut-fourneau et déversent leur contenu par une trappe à ouverture commandée : la trémie.

2/Gueulard : cette partie supérieure du haut-fourneau sert de déversoir et de cheminée où les gaz ont une température voisine de 300°C (phase de dessiccation)

3/Récupération des gaz : ces gaz chauds sont récupérés et utilisés pour chauffer les vents qui seront injectés au bas du fourneau. Un clapet d'explosion permet de contrôler la pression des gaz.

4/Coke : le combustible est disposé en plusieurs couches dans le four.

5/Fondant et minerai : en couches en alternance avec les couches de coke.

6/Etalage et ventre: le corps du four de forme cylindrique est constitué de briques réfractaires soutenues par une armature extérieure de poutrelles métalliques. La partie supérieure s'appelle l'étalage, la partie basse élargie se nomme le ventre où on atteint près de 800 °C, (phase de réduction).

7/Air chaud sous pression : de l'air chaud sous haute pression est injecté dans le four pour attiser la combustion du charbon et permettre une élévation de température afin de faire fondre tous les éléments. (900 °C à 1 200 °C, phase de carburation).

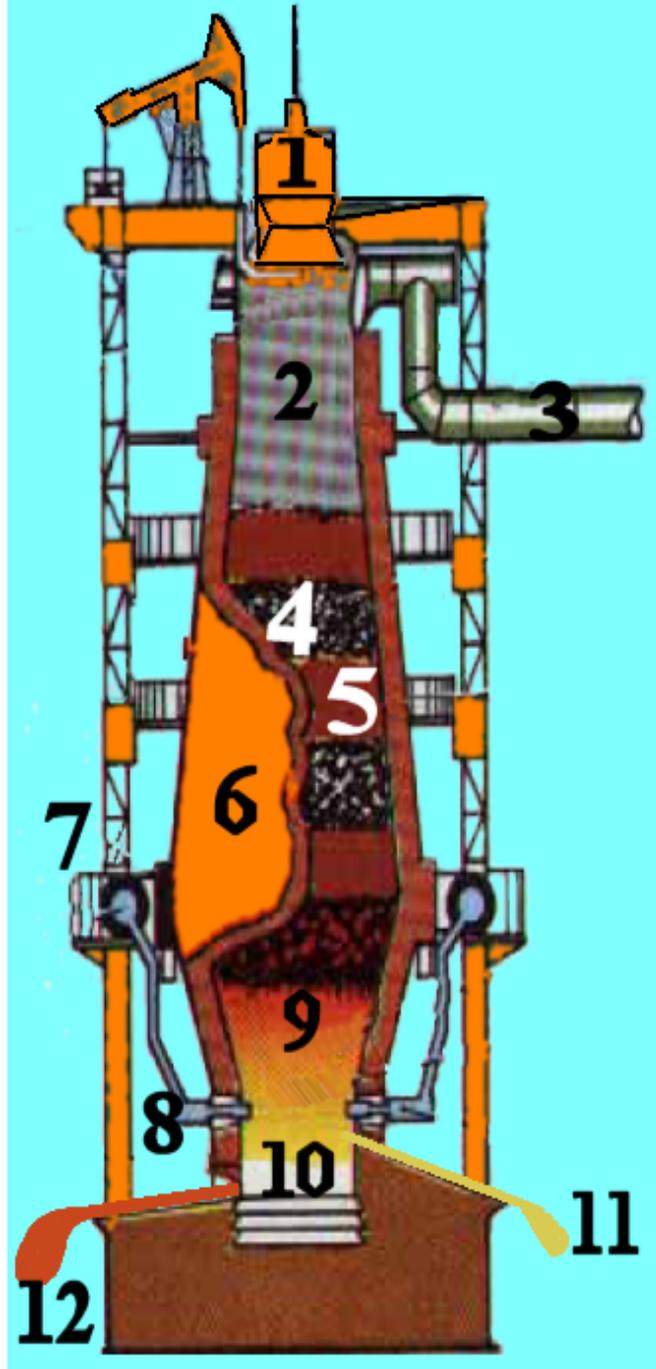
8/Tuyères : elles conduisent un important flux d'air chaud à plus de 1000°C dans la cuve.

9/Cuve: c'est la partie la plus chaude du four (1800°C) où s'effectue la fusion des éléments. (phase de fusion)

10/Creuset : Base de la cuve où s'écoulent les produits fondus.

11/Laitier : la gangue silicoalumineuse du minerai de fer et le fondant calcaire ou magnésien en fusion forment le laitier. Il flotte sur la fonte et peut ainsi être extrait séparément ainsi que les scories à l'opposé du point de coulée de la fonte. Ce laitier refroidit brusquement avec de l'eau lors d'un processus qu'on appelle la trempe, se présente ensuite sous la forme de granulés.

12/Fonte : c'est l'alliage fer-carbone en fusion à 1500°C qui coule à la base du haut fourneau. (Phase de liquation) Le pourcentage de carbone est supérieur à 2%. En dessous de ce pourcentage on obtient par affinage des aciers et du fer industriel.



Ce type de haut-fourneau à combustion interne est destiné à la fabrication de la fonte et permet d'extraire le fer de son minerai. Pendant la combustion, le minerai et le combustible chargés par le haut, descendent dans le four. Au cours de la descente, l'air chaud (+1000 °C) insufflé à la base du four provoque la combustion du coke. L'oxyde de carbone (CO) ainsi formé va réduire les oxydes de fer, c'est-à-dire leur prendre leur oxygène et isoler ainsi le fer. Celui-ci se charge ensuite en carbone dans le haut-



fourneau et devient de la fonte avec un taux de carbone supérieur à 2,1%. Cette carburation du fer abaisse sa température de fusion et on peut extraire du métal liquide. Un haut-fourneau moderne peut fournir plus de 10 000 tonnes de fonte par jour. Cette fonte est par la suite affinée par chauffage pour une décarburation qui permet d'obtenir des aciers et des dérivés ferreux.

Les réactions chimiques à l'intérieur du haut-fourneau :

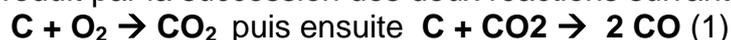
Le processus chimique par lequel le minerai de fer est transformé en fonte est une réaction d'oxydoréduction. Globalement, l'addition de coke (carbone presque pur) à du minerai de fer (la magnétite est un oxyde de fer mélangé à d'autres métaux et à de la silice) se résume à la réaction redox suivante :



En réalité, les phénomènes chimiques qui se réalisent dans le haut-fourneau sont beaucoup plus complexes. En effet, le principe est de réduire par du monoxyde de carbone les oxydes de fer présents dans le minerai. L'oxydation du carbone puis la réduction du fer se réalisent lors de réactions auto-entretenues qui demandent une température très élevée dans la zone réactionnelle. C'est pour cette raison qu'on insuffle de l'air très chaud dans le four.

La formation de l'agent réducteur le CO :

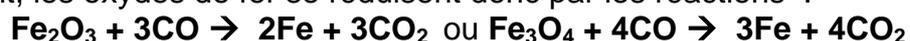
Le coke est d'abord soumis à une combustion pour donner du CO qui devient l'agent réducteur. Il est produit par la succession des deux réactions suivantes :



A très haute température, l'excès de carbone permet la conversion de la totalité de l'oxygène en monoxyde de carbone. Cette réaction qui est fortement exothermique et permet d'obtenir la température est nécessaire pour la fusion du fer. Le fer peut alors être séparé des scories de moindre densité (aluminates, silicates, chaux) par décantation.

La réduction des oxydes de Fe :

La magnétite est un oxyde mixte d'oxyde de fer(II) et d'oxyde de fer(III) et globalement, les oxydes de fer se réduisent donc par les réactions :



En réalité la réduction des oxydes de fer se produit en plusieurs étapes suivant la séquence suivante : $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$

En partant du haut de la cuve et en fonction de la température, l'enchaînement des réactions est le suivant :

- à $T^\circ > 320^\circ\text{C}$: $3 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$
- à $620^\circ\text{C} < T^\circ < 950^\circ\text{C}$: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} \rightarrow 3 \text{FeO} + \text{CO}_2$
- à $T > 950^\circ\text{C}$: $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$

Dans le bas de la cuve, le dioxyde de carbone produit par la réduction des oxydes de fer sert à régénérer, grâce à l'excès de coke, le CO par la réaction de Boudouart (1).

4/ L'AFFINAGE DE LA FONTE ET LA FABRICATION DE L'ACIER.

Les fontes

La fonte produite est un alliage métallique contenant essentiellement du fer et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4% et on trouve aussi dans la fonte du silicium (0.5 à 2.5%), du manganèse (moins de 1%), du phosphore (moins de 2%) et des traces de soufre. On peut produire plusieurs types de fontes destinées à différents usages.

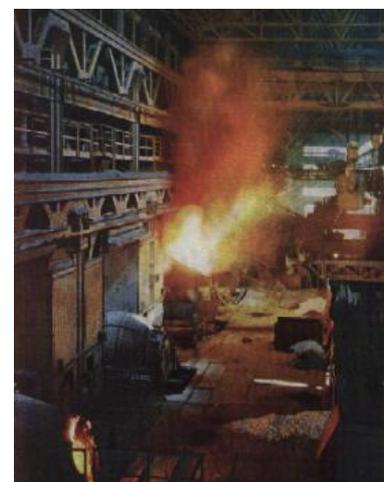
- de la fonte d'affinage ou fonte blanche qui représente plus de 80% de la production et destinée à la fabrication de l'acier. Le fer est à l'état de cémentite (Fe_3C)
- de la fonte de moulage ou fonte grise pour la fabrication de pièces comme les radiateurs de chauffage, des plaques de cheminées,....
- Des alliages ferro-métalliques qui contiennent un taux important de silicium et de manganèse. Ils sont utilisés pour améliorer la qualité de l'acier dans des alliages spécifiques.



L'affinage

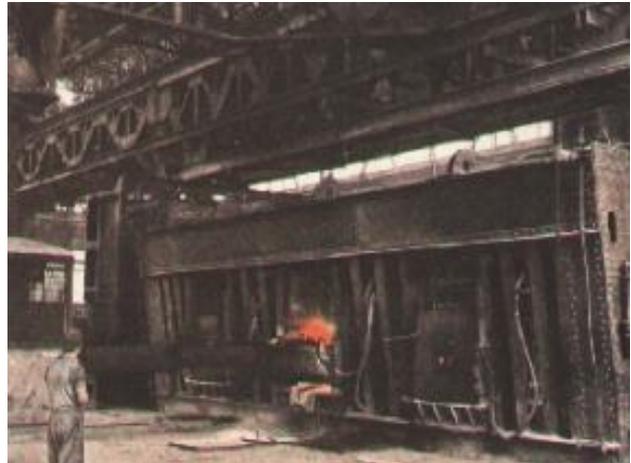
L'acier dont le taux de carbone doit être généralement inférieur à 1,8% est obtenu en décarburant la fonte blanche et en éliminant le plus possible le soufre et le phosphore. On utilise actuellement deux procédés différents qui conduisent à l'élaboration de l'acier : soit à partir de la fonte avec la réduction du carbone dans un convertisseur, soit dans un four électrique à partir d'acier de récupération (acier de recyclage.)

- ***l'affinage liquide*** fournit la quasi-totalité de l'acier qui reste liquide durant l'opération. La fonte en fusion issue du haut fourneau passe dans un mélangeur de grande capacité qui reçoit et entretient les coulées successives. Ensuite, depuis le mélangeur, la fonte est reprise en poches (ou godets) par des ponts roulants de plusieurs tonnes (60 tonnes) pour être vidée dans un convertisseur. C'est une sorte de four ou cornue dans lequel on insuffle sous pression par le fond du convertisseur un intense courant d'air qui permet de brûler les impuretés de la fonte : le carbone mais aussi le silicium, le phosphore et le manganèse. Cette combustion dégage de la chaleur et augmente la température de la fonte en fusion de 1200°C jusqu'à



1600°C qui correspond à la température de fusion de l'acier. Cette transformation de la fonte en acier nécessite 15 à 30 minutes et permet de produire plusieurs tonnes d'acier en une seule opération, plus ou moins carburé dont on règle la qualité par des additions appropriées de ferro-manganèse.

- **L'affinage au four Martin** est un procédé avec lequel on obtient l'acier en fondant de la fonte solide et des ferrailles (75 à 80% de ferrailles) dans un four à sole basique. Ces ferrailles proviennent des chutes de cisaille des laminoirs et d'autres déchets métallurgiques. Dans un four martin l'affinage porte essentiellement sur le carbone. On utilise le gaz comme combustible pour atteindre la température de 1800°C. et la durée de fusion est de plusieurs heures. L'analyse chimique d'échantillons au cours du processus permet de choisir la composition de l'acier. Avec ce type de four on élabore toutes les qualités d'aciers fins au carbone, ainsi des aciers spéciaux.



Il existe deux sortes de convertisseurs. Les convertisseurs Bessemer ont un revêtement interne de silice et peuvent traiter des fontes non phosphoreuses riches en silice. Dans les convertisseurs Thomas qui ont un revêtement réfractaire basique (dolomie), on ajoute en plus de la chaux qui assure la déphosphoration de la fonte. Ce type d'affinage permet d'utiliser des minerais riches en phosphore et pauvres en silice pour la fabrication de la fonte. Dans d'autres convertisseurs à l'oxygène, la fonte en fusion est versée sur un lit de ferraille. On brûle les éléments indésirables, le carbone et les résidus contenus dans la fonte en insufflant de l'oxygène pur. On obtient de l'acier liquide qui est encore imparfait à ce stade.

La coulée :

La coulée continue

Après l'élimination de la scorie, l'acier liquide à 1500°C est versé à la sortie du convertisseur dans une « poche. » Ce creuset mobile et basculant est entraîné par un pont roulant permettant la coulée dans des lingotières en cuivre de section carrée, rectangulaire ou ronde selon le produit fabriqué. L'acier en fusion s'écoule verticalement en continu dans la lingotière sans fond qui joue le rôle d'un moule et dont les parois sont continuellement refroidies par de puissants jets d'eau. Le métal se refroidissant au contact des parois de la lingotière forme une croûte solide périphérique. Dans le même temps, il est entraîné vers le bas par un jeu de rouleaux et la coulée achève de se solidifier à cœur au cours de la descente grâce à l'action des jets d'eau. La machine de coulée continue est donc une sorte d'échangeur thermique permettant de solidifier l'acier liquide et de le mettre en forme de manière à ce qu'il puisse être facilement transformable. L'acier ainsi moulé donne en fin de parcours, une barre



solidifiée à cœur qui est débitée en tronçons de la longueur désirée (brames). Ces brames sont ensuite transformées en bandes de tôle, par laminage à chaud.

En fonction de la vitesse de coulée, la forme de la machine, l'intensité du refroidissement, on détermine une qualité de produit qui revêt deux aspects : la qualité de surface et la qualité interne. En effet, la solidification dans la machine de coulée est une étape fondamentale de l'élaboration de l'acier qui s'accompagne de phénomènes de variation de volume (retraits dus à la solidification), de redistribution des éléments chimiques entre les différentes phases qui apparaissent à partir du liquide (la ségrégation chimique). La valeur de l'acier brut dépend étroitement de la maîtrise des transferts de chaleur dans la lingotière et du refroidissement secondaire. Une surface de qualité signifie l'absence de fissures de surface (criques), de défauts d'aspect et d'inclusions non-métalliques piégées sous la surface. Les principaux défauts internes des produits de coulée continue sont principalement les ségrégations chimiques importantes et les fissures internes qui se forment dans la partie basse de la machine de coulée continue, en fin de solidification.

La coulée en lingots

Les réglages très sophistiqués de la machine à coulée déterminent donc différents aciers mais certains d'entre eux sont difficiles à produire en coulée continue. La coulée peut être également faite en lingotière: l'acier est coulé et solidifié dans des moules en fonte. La solidification terminée, les lingots sont démoulés. Le poids d'un lingot est de 6 et 8 tonnes.

Le laminage

Les aciers issus de la coulée continue ou de la coulée en lingots sont réchauffés à 1200°C dans un four pour les rendre plus malléables, plus faciles à étirer et à mettre en forme. Ils sont écrasés dans un gros laminoir pour être transformés en produits plats, les brames par amincissements successifs entre les cylindres du laminoir jusqu'à obtention de plaques et de tôles. Les produits de coulée peuvent aussi être travaillés pour obtenir des produits longs, les blooms. Les aciers longs sont utilisés en poutrelles, profilés, rails, barres ou fils.

