

LA SIDERURGIE = METALLURGIE DU FER

1. La sidérurgie du passé : origine et histoire du fer

Le fer est un des éléments les plus abondants et les mieux répartis dans le monde (4% de l'écorce terrestre).

La fabrication du fer sur le continent européen date de 1700 avant Jésus-Christ. Elle est restée la même depuis cette époque jusqu'à la fin du Moyen Âge et consistait à chauffer simultanément du bois et du minerai jusqu'à obtention d'une pâte métallique qui, en refroidissant, formait un bloc de fer appelé loupe ou éponge. Cette opération se réalisait dans un bas fourneau, une petite tour de maçonnerie d'un mètre de haut environ. Cette loupe devait être ensuite martelée à chaud afin d'obtenir du fer à l'état brut par l'élimination des impuretés qui pouvaient encore s'y trouver. Les quantités produites étaient faibles et le travail pénible. Puis vint la fonte...

Vers 1350 après Jésus-Christ est née la première génération de hauts-fourneaux qui permit le développement du procédé de fabrication de la fonte. La fonte est un alliage dont la teneur en carbone est supérieure à 2,11% et dans lequel peuvent apparaître, avec la cémentite, des particules de graphite de formes diverses ; notamment en forme de lamelles, ce qui explique en particulier la fragilité des fontes. Ces particules peuvent être globularisées et la fonte dite à graphite sphéroïdale est alors ductile.

A la fin du 18^{ème} siècle, ce sont les scientifiques français Berthollet, Monge et Vandermonde qui sont à l'origine de la définition exacte de l'interaction existant entre le fer, la fonte et l'acier et qui mettent à jour le rôle tenu par le carbone au sein de cette relation. Ce n'est qu'un siècle plus tard, avec l'invention des fours de Bessemer, Thomas et Martin que l'acier pourra être produit en grande quantité.

Grâce à son caractère polyvalent, cet alliage est devenu l'élément clé de la révolution industrielle.

Le premier mode de fabrication de l'acier était celui de la cémentation, un processus qui visait à chauffer des barres de fer à l'aide de charbon de bois dans un four fermé de façon que la surface du fer acquière une importante teneur en carbone. La méthode dite au creuset initialement développée afin de retirer les scories de l'acier issues de la cémentation, permet de fondre ensemble le fer et d'autres substances dans un récipient (le creuset) composé d'argile réfractaire et de graphite. C'est par cette méthode que sont fabriqués les couteaux de Damas et de Toledo par exemple.

Parmi les procédés plus récents, on trouve celui de Bessemer, à foyer ouvert à base d'oxygène plus généralement utilisé dans la sidérurgie actuelle, le four à arc électrique une innovation qui offre la possibilité de produire à grande échelle de l'acier de haute qualité.

La forge à la wallonne (17^{ème} et 18^{ème} siècles)

Le plus vieux haut-fourneau du pays (1693) mesure 8 mètres. Il était installé à Gonrioux, près de Couvin.

Son fonctionnement est très proche de celui des hauts-fourneaux modernes. Les ingrédients utilisés pour fabriquer de la fonte étaient :

- le minerai de fer, que l'on trouvait en abondance en Wallonie, et qui se compose de rouille (oxydes de fer = fer + oxygène) entourée de gangue (substances stériles qui entourent la rouille),
- la pierre à chaux (pierre calcaire) qui dissout cette gangue,
- le charbon de bois, dont le carbone libère le fer de l'oxygène (le charbon de terre, la houille était inutilisable telle quelle dans le haut-fourneau).

A cette époque, le charbon de bois posait de sérieux problèmes aux sidérurgistes :

- 1. sa fabrication durait entre quinze jours et trois semaines car la combustion devait être très lente pour éviter que le bois ne se réduise en cendres,
- 2. avec 1000 kilos de bois, on produisait seulement 250 kilos de charbon de bois,
- 3. un seul haut-fourneau consommait, en moyenne, 200 hectares de forêts en 6 mois et il y en avait plus de 10 dans la Principauté de Liège.



Fabrication du charbon de bois

Les grandes déforestations, dès le milieu du 18^{ème} siècle obligèrent les métallurgistes à trouver un nouveau combustible pour remplacer le charbon de bois : ce combustible, le coke, sera mis au point par un Anglais, Abraham Darby, en 1709 mais ne sera utilisé à Liège qu'en 1826 dans l'usine de John Cockerill.

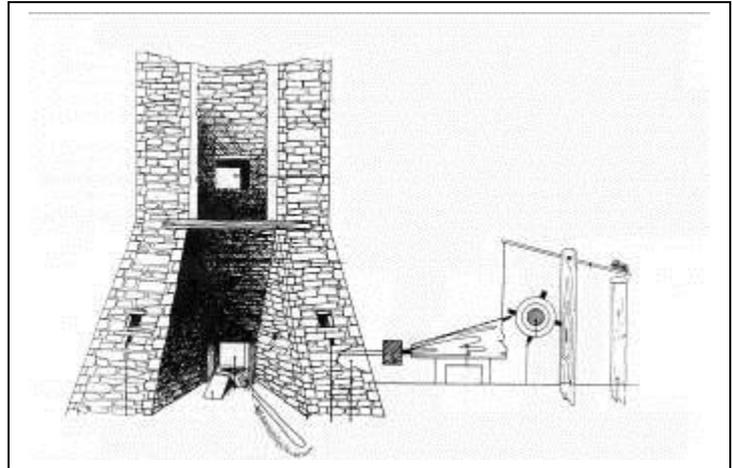
Sur un côté du haut-fourneau se trouve la halle aux soufflets. Ceux-ci soufflaient une grande quantité d'air dans le haut-fourneau, ce qui permettait d'atteindre une température de 1536°C (point de fusion du minerai de fer). Ils étaient entraînés par un arbre à cames, lui-même mû par un moulin à eau.

L'ouverture supérieure du haut-fourneau s'appelle le gueulard : la "gueule" du haut-fourneau, trou par lequel il était chargé en matières premières par des femmes et des enfants qui transportaient ces produits dans des hottes ou des paniers.

Celles-ci étaient versées dans le haut-fourneau en couches alternées: charbon de bois, minerai de fer, pierre à chaux (pierre calcaire).



Haut-fourneau (1693)



Coupe du haut-fourneau et de ses soufflets

Le métal liquide qui coule du haut-fourneau est de la fonte, un alliage contenant 95% de fer et 5% de carbone. (C'est toujours la cas aujourd'hui). On produisait 3 à 6 grandes gueuses de fonte par jour (soit 1000 à 2000 kilos de fonte). La gangue du minerai est, quant à elle, transformée par la pierre calcaire en laitier qui flotte sur la fonte. La fonte présente un inconvénient majeur dû à la présence de ces 5% de carbone. Elle est cassante à l'état solide. Pour la transformer en fer malléable, elle doit être affinée, c'est-à-dire débarrassée de cet excédant de carbone. Cette décarburation se réalisait au foyer d'affinage (aujourd'hui, elle est réalisée à l'aciérie). La gueuse était placée dans un foyer alimenté au charbon de bois. Deux soufflets, actionnés à la main, soufflaient de l'air dans le foyer. L'oxygène contenu dans l'air brûlait le carbone et transformait donc les gouttes de fonte en gouttes de fer. Celles-ci tombaient dans le fond du foyer refroidi à l'eau et formaient des blocs, appelés loupes ou éponges d'environ 15 kilos. On les martelait ensuite à l'aide d'un « maka » (martinet hydraulique), lourd marteau actionné par un moulin à eau. On fabriquait néanmoins des objets en fonte. Ceux-ci, étant très épais pour éviter qu'ils ne se brisent, conservaient très longtemps leur température : taques de cheminée, marmites, poêles à bois ou à charbon... et plus tard, des radiateurs.

Maka de 1700



A la fin du 18^{ème} siècle, les métallurgistes mettront au point les premiers laminiers. Ils permettront d'écraser des barres de fer rouges (+/- 1200°C) pour en faire des tôles

fines. Le laminoir présenté dans la forge date de 1812 : c'est le plus vieux laminoir connu au monde. Il était entraîné, lui aussi par un moulin à eau. C'est dire l'importance des nombreuses rivières wallonnes, sources d'énergie indispensables pour l'époque.



Laminoir hydraulique (1812)

2. La sidérurgie contemporaine

Les étapes successives

La sidérurgie à chaud

a. L'agglomération

Le minerai de fer est une roche concassée qui comporte peu de gros morceaux et beaucoup de très petits appelés les « fines ». Si on introduisait ces fines dans le haut-fourneau, l'air de combustion ne passerait pas. On doit donc agglomérer les fines en morceaux plus gros. Pour ce faire, on mélange les fines de minerai avec du coke et de la pierre calcaire. On cuit le tout à plus de 1300°C dans une installation appelée chaîne d'agglomération.

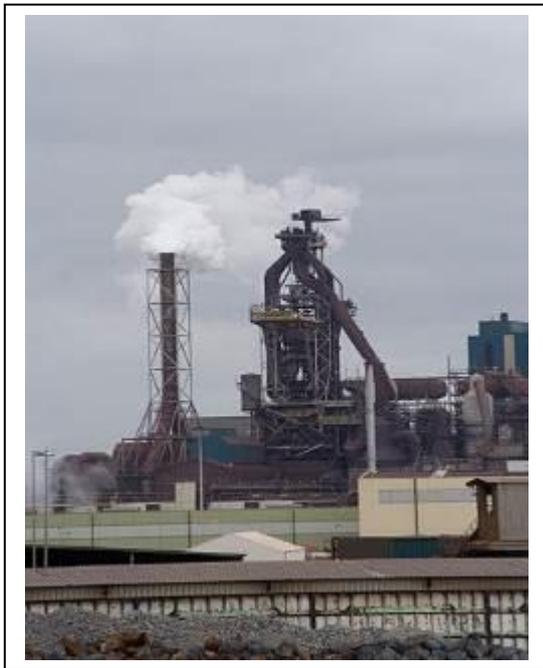
b. Le four à coke

Le charbon doit d'abord être transformé en coke, le combustible des hauts-fourneaux. Pour opérer cette transformation, le charbon est porté pendant 16 heures environ à 1200°C, dans des fours étanches à l'air. Cette opération permet aux gaz de s'échapper du charbon : l'hydrogène et d'autres gaz, le goudron et l'ammoniaque. Le coke ainsi obtenu est léger et poreux et a une bonne résistance mécanique. Il est comparable au charbon de bois utilisé autrefois dans les hauts-fourneaux et aujourd'hui... dans nos barbecues.



Four à coke

c. Le haut-fourneau



L'installation utilisée pour transformer le minerai de fer est le haut-fourneau dans lequel règne une température de presque 2100°C . On y verse le minerai de fer, le coke et la pierre calcaire et on y souffle de l'air chauffé à une température d'environ 1100°C

Les deux matières qui coulent du haut-fourneau sont la fonte (95% de fer et 5% de carbone) et le laitier (sous-produit du haut-fourneau), une sorte de verre fondu qui est utilisé dans les travaux de génie civil et entre dans la composition du ciment. Le haut-fourneau fonctionne 24 heures sur 24. La présence de 5% de carbone fait de la fonte un produit cassant et qui ne se laisse pas mettre en forme. Pour devenir du fer malléable, elle doit être affinée, c'est-à-dire débarrassée de son excès de carbone.

d. L'aciérie

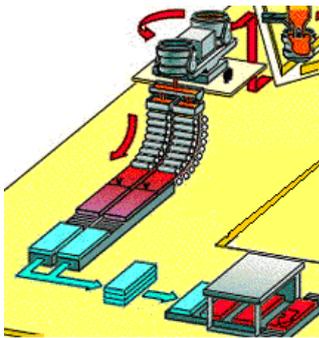
La fonte qui coule du haut-fourneau à une température d'environ 1500°C est versée dans des wagons thermos (appelé aussi poches torpilles). Ces wagons sont acheminés vers l'aciérie. C'est là qu'elle va être débarrassée du carbone et des autres éléments qu'elle contient encore : le soufre, le phosphore et le silicium. Le soufre est d'abord éliminé par un procédé chimique suivi d'un raclage mécanique. Désulfurée dans une poche à fonte, la fonte est ensuite versée dans une énorme cuve (le convertisseur) dans lequel est ajoutée de la mitraille de fer provenant de la récupération. Dans le convertisseur, on souffle de l'oxygène pur dans le bain métallique, ce qui provoque la combustion de la presque totalité du carbone. Cette opération prend 20 minutes environ. Ensuite, pour fabriquer de l'acier qui pourra être mis en forme, on y ajoute d'autres matières premières. L'acier, c'est du fer amélioré.



Wagon thermos

e. La machine de coulée continue

Une fois le processus d'élaboration de l'acier terminé, il faut le refroidir à l'eau. Il est versé en continu dans une lingotière sans fond (la machine de coulée continue) dont les parois sont refroidies à l'eau. Cette machine produit d'énormes blocs d'une épaisseur d'environ 225 mm que des chalumeaux découpent de tronçons de 10 à 40 tonnes appelés brames ou « slabs ».



Machine de coulée continue



Slab

f. Le laminage à chaud

Le slab est placé dans un four où il est porté à une température de 1200°C

f.1 Le laminoir dégrossisseur

Le slab passe ensuite dans le laminoir dégrossisseur (laminoir réversible) qui réduit son épaisseur jusqu'à 30 mm. Le slab devient une ébauche.

f.2 Le laminoir finisseur

L'ébauche ainsi formée est progressivement réduite en une tôle fine par les 6 ou 7 cages du laminoir finisseur.

D'une longueur pouvant atteindre 1 kilomètre, la tôle est ensuite enroulée comme un mètre ruban appelé coil à chaud.



Laminage à chaud

La sidérurgie à froid

g. Le décapage

Les oxydes de fer qui se sont formés sur la surface de la tôle d'acier lors du laminage à chaud sont éliminés par le passage de la tôle dans un bain d'acide chlorhydrique chaud.

h. Le laminage à froid

La tôle décapée est laminée une deuxième fois à température ambiante. Le but est de réduire encore l'épaisseur pour fabriquer des produits fins tels que les boîtes à conserves ou à boissons.

i. Le traitement thermique ou recuit

Au sein de l'acier, le fer est organisé en cristaux. Au cours du laminage à froid, ce bel agencement est perturbé, froissé. L'acier est devenu raide et dur. On dit qu'il est écroui.

Dans un four à recuit, on va donc porter cette tôle écrouie à une température de l'ordre de 700°C afin de rétablir la structure cristalline du métal.

j. Le skin pass

Réduite, la tôle d'acier est très douce, très ductile et se déforme facilement. Cependant, sa surface est couverte de stries incompatibles avec un bel aspect. On relamine donc la tôle très légèrement dans un laminage appelé skin pass. Ce dernier laminage réduit encore l'épaisseur d'environ 1 %, corrige la planéité de la bande et donne à sa surface la finition désirée.

k. Protection contre la corrosion

Pour protéger la tôle d'acier contre la corrosion, on peut la recouvrir d'un autre métal ou d'un alliage:

- Par électrolyse, on peut la recouvrir d'étain pour obtenir de la tôle étamée ou fer blanc (boîtes à conserve, à boisson...)

- Par passage dans un bain chaud ou par électrolyse, on peut la recouvrir de zinc. On parle alors de tôle galvanisée ou électro-zinguée.
- Seul ou en alliage avec le zinc, l'aluminium peut aussi recouvrir la tôle. On parle alors de tôle aluminée ou de tôle alu-zinguée.

La tôle d'acier ne doit pas seulement être protégée. Elle doit être attirante. On peut donc aussi la peindre ou la plastifier (film de PVC) avant de la livrer au client.

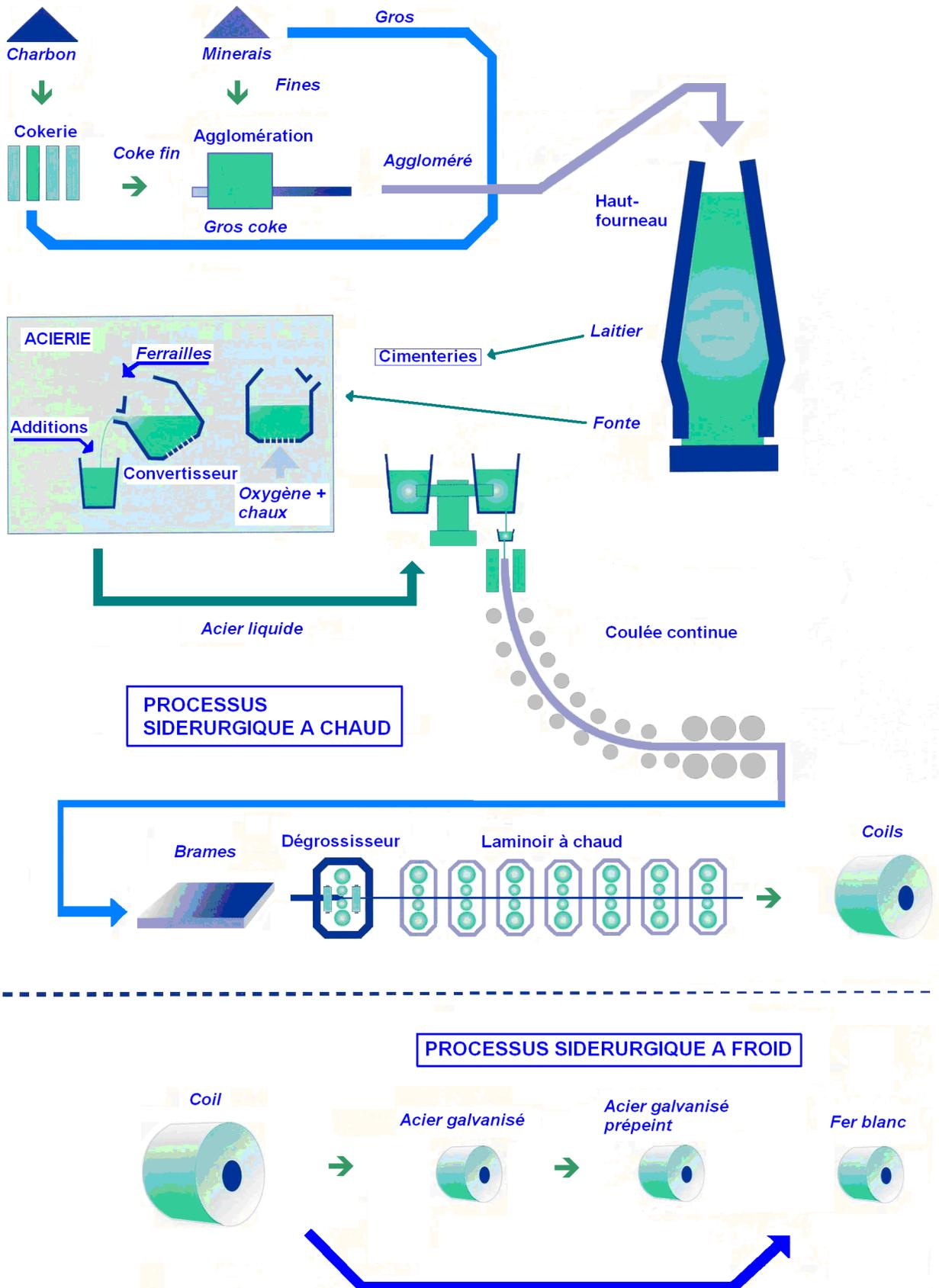


Bobine galvanisée



Bobine prépeinte

Schéma des étapes successives



ANNEXES

LES MINERAIS DE FER

Toutes les roches contenant du fer ne sont pas qualifiées de minerai de fer. En effet, bien que le fer soit un des éléments les plus abondants et les mieux répartis dans le monde (4% de l'écorce terrestre), toute roche en contenant ne peut être utilisée. Selon sa localisation, son degré de concentration et le stade de développement des techniques d'extraction et de traitement, toutes ne sont pas économiquement exploitables.

Il existe à travers le monde un nombre important de roches contenant du minerai fer. Elles sont en général réparties en plusieurs catégories : les minerais oxydés, les carbonates, les minerais sulfurés et les silicates.

Minerai	Répartition chimique	Couleur	Caractéristiques
Minerais oxydés			
Magnétite (Fe_3O_4)	72,36% fer 27,64 % oxygène	Gris foncé à noir	C'est une roche très magnétique. Elle a pris de plus en plus d'importance avec le développement des techniques de concentration magnétique et l'utilisation accrue de produits de haute qualité.
Hématite (Fe_2O_3)	69,94% fer 30,06% oxygène	Gris acier à rouge vif	L'hématite est l'un des principaux minerais de fer. Cette roche possède une dureté qui peut aller de 5,5 à 6,5 selon la famille à laquelle elle appartient. C'est la forme de roche la plus répandue à la surface de la terre et c'est également celle qui est le plus souvent employée dans l'industrie.
Limonite (ou hématite brune) ($H FeO_2$)	62,85% fer 27,01% oxygène 10,14% eau	Jaune ou marron, parfois noir	Les limonites sont également une source importante de minerais à travers le monde. Elles sont à la fois oxyde et hydroxyde de fer. La goethite qui est une sorte de limonite se rencontre souvent en association avec de l'hématite.
Ilménite ($Fe TiO_3$)	36,80% fer 31,57% titane 31,63% oxygène	noir	Rencontrée parfois en association avec de petites quantités de magnétite. Elle est généralement exploitée pour le titane qu'elle contient. Le minerai de fer peut être alors extrait en tant que sous-produit au cours du traitement de la roche. Contrairement à l'hématite ou à la magnétite, elle n'est pas magnétique.

Les carbonates			
Sidérite (Fe CO ₃)	48,20% fer 37,99% CO ₂ 13,81% oxygène	Blanc à gris vert, elle peut virer au brun, en présence d'humidité	Les sidérites contiennent en général une proportion assez variable de cal- cium, magnésium ou manganèse.
Les silicates			
Chamosite, stilpnomelane, greenalite, minnesotaite, grunerite.	Les minerais de ce type, bien que d'une importance assez limitée en tant que tels pour la production de minerai de fer, présentent un certain intérêt en tant que source de minerais oxydés.		
Les sulfurés			
Pyrite (Fe S ₂)	46,55% fer 53,45% soufre	Jaune cuivré	Cette roche est souvent connue sous le nom d'or des fous du fait de sa grande ressem- blance avec l'or. Elle est la roche contenant du minerai de fer la plus répandue. Comme l'ilménite, elle n'est souvent pas exploitée pour le fer qu'elle contient mais pour sa teneur en soufre. Le fer en est le sous-produit le plus communément extrait.
Pyrrhotite	60,4% fer 39,6% soufre	Bronze	
Marcasite			

Par rapport à leur teneur en fer, les minerais sont classés en :

- minerais pauvres : Fe ≤ 30%
- minerais moyens : Fe = 30% ÷ 50%
- minerais riches : Fe > 50%

L'hématite, Fe₂O₃, est l'un des principaux minerais de fer. C'est la forme de roche la plus répandue à la surface de la terre et c'est également celle qui est le plus souvent employée dans l'industrie.

La magnétite, Fe₃O₄, est le minéral de fer le plus riche en métal. Elle est souvent associée à l'hématite dans le même gîte, mais des gîtes de magnétite pure sont aussi connus. Elle est aussi largement employée dans l'industrie sidérurgique.

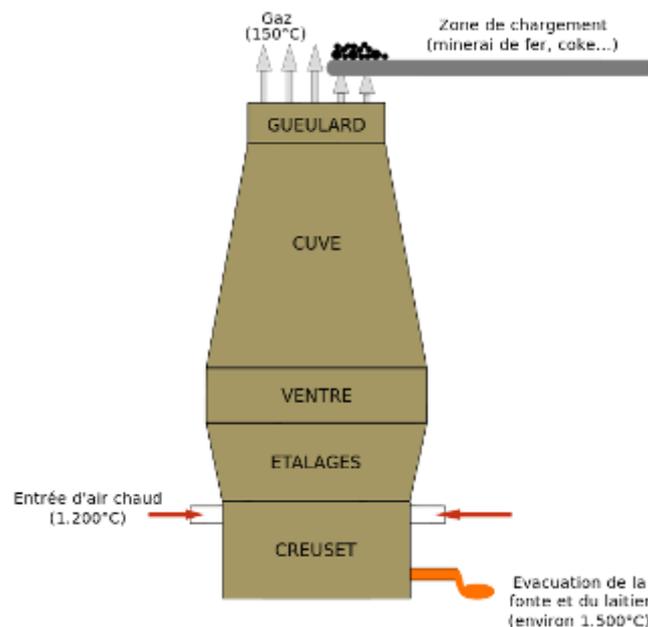
L'acier

L'acier est un alliage de fer et de carbone obtenu par affinage de la fonte, c'est-à-dire par diminution, jusqu'au niveau désiré de la teneur en carbone du mélange (souvent en dessous de 2%). Des éléments sont souvent présents dans l'acier, ce sont principalement :

- des impuretés appelées scories en général, moins de 0,1% qu'il s'agira de retirer : de l'oxygène, du phosphore ou du soufre,
- des nouveaux produits (ou adjonctions entre 0,1% et 10% voire plus) comme le silicium, le manganèse, le chrome, le nickel, le cobalt, le molybdène, le vanadium, l'aluminium ou le cuivre par exemple. L'ajout de ces éléments est destiné à améliorer les caractéristiques physiques et/ou mécaniques de l'alliage.

LA CHIMIE DU HAUT-FOURNEAU

Le haut-fourneau est un réacteur chimique. Il fonctionne à contre-courant (les gaz montent alors que la matière solide descend), ce qui lui assure un excellent rendement thermique.



Réactions globales

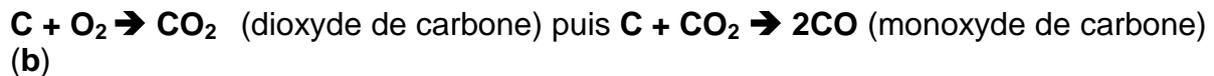
Le principe est de réduire les oxydes de fer (la rouille) présents dans le minerai de fer par le monoxyde de carbone (CO) qui est donc l'agent réducteur.

Production de l'agent réducteur CO : La réaction globale est la suivante :



Compte tenu de l'excès de carbone et de la température, il y a conversion de la totalité de l'oxygène en monoxyde de carbone.

Le CO est produit par la succession des deux réactions suivantes :



À partir de là, la réaction de réduction des oxydes de fer est la suivante :



Le coke a donc deux fonctions :

- par combustion, il produit l'agent réducteur (a) par combustion notamment en sortie des tuyères. La réaction est fortement exothermique, on atteint des températures de 2 200 °C.
- Il consomme le dioxyde de carbone (CO₂) produit par la réduction des oxydes de fer (b) pour régénérer l'agent réducteur (CO) des oxydes de fer.

La réduction des oxydes de fer

Les oxydes de fer se réduisent selon la séquence suivante :



L'enchaînement de température au niveau de la cuve est le suivant (en partant du haut de la cuve en fonction de la température :

T > 320°C



620°C < T < 950°C



T > 950°C



Enfin, le fer se combine avec le CO pour former de la cémentite (Fe₃C), appelée aussi carbure de fer, et du CO₂. La cémentite est le principal composant de la fonte.

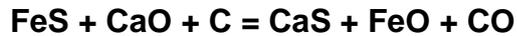


La pierre à chaux

La pierre à chaux descend dans le haut-fourneau et reste solide au cours de la première réaction chimique :

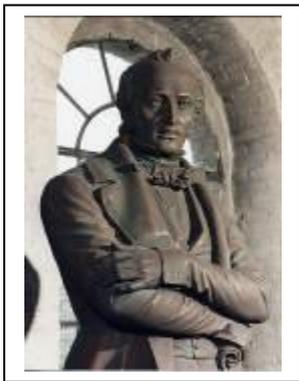


Cette première réaction nécessite de l'énergie et ne démarre qu'à environ 875°C. Le CaO formé lors de cette réaction est utilisé pour extraire le soufre du fer ce qui est essentiel avant que le métal chaud ne devienne de l'acier. La réaction chimique est la suivante:



Le CaS devient partie intégrante du laitier. Le laitier est aussi composé des restes de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃), de magnésie (MgO) ou d'oxyde de calcium (chaux vive) (CaO) présents dans le minerai de fer, les pellets, l'aggloméré ou le coke. Le laitier liquide traverse ensuite la couche de coke et coule vers le fond du haut-fourneau où il flotte au-dessus du fer liquide puisqu'il présente une densité plus faible que le fer.

JOHN COCKERILL



John Cockerill, la «star» de la révolution industrielle wallonne, apporta à Liège les deux grandes nouvelles technologies mises au point dans son Angleterre natale : le coke (Abraham Darby) et la machine à vapeur (James Watt). Installant son entreprise à Seraing en 1817, John Cockerill allait en faire une usine modèle de fabrication de machines à vapeur, jalousée dans l'Europe entière. Lui-même était considéré comme une star industrielle par ses contemporains.

LES METAUX NON FERREUX

Les métaux non ferreux sont la plupart des métaux autres que le fer. Ils ne sont pas attirés par l'aimant et peuvent être recyclés facilement.

Parmi eux, on trouve, entre autres, le zinc, le cuivre, le plomb, l'étain, l'aluminium, le mercure, le titane, le cobalt, le germanium et aussi les métaux précieux comme l'argent, l'or et le platine.

LE MINERAI DE ZINC

Aux environs de 1000°C nécessaires à sa réduction, le minerai de zinc se transforme en une vapeur qui s'oxyde immédiatement en présence d'air. La réduction de ce minerai doit donc s'opérer à l'abri de l'air.

En 1805, Jean Jacques Daniel Dony (1759–1819), chanoine liégeois, reçut de Napoléon I, pour une durée de 50 ans, la concession de la mine de minerai de zinc, située en Belgique à La Calamine, non loin de la frontière allemande.

Il met alors au point un four permettant d'opérer la réduction du minerai à l'abri de l'air.

On mélange le minerai grillé avec du charbon dans de longs tubes horizontaux fermés d'un côté et inclinés vers l'avant (les creusets). Portés à haute température, le zinc passe à l'état de vapeur et se dégage vers les allonges (les bottes) qui, placées à l'extérieur du four, dans le prolongement des allonges, le refroidissent et permettent sa condensation. On peut ainsi recueillir le zinc liquide et le couler en lingots.



J-J D Dony

En 1809, Dony démarra la première usine à zinc au monde. Elle était située à Liège dans le quartier Saint Léonard. Peu avant, il avait offert à l'empereur, en remerciement de la mine de zinc, une baignoire de voyage en zinc que le monarque aurait utilisé dans les campagnes d'Allemagne, de Russie et de France.

Le zinc est utilisé dans le bâtiment : tôles de toiture, tuyauteries... Il permet aussi de réaliser la galvanisation, qui est le principal revêtement anti-corrosion de l'acier. L'acier ainsi revêtu sera utilisé pour fabriquer les carrosseries d'autos, appareils électroménagers ...



Baignoire de voyage de Napoléon

LES MINERAIS DE ZINC AUJOURD'HUI

Le minerai le plus utilisé est le sulfure de zinc appelé blende ou sphalérite (ZnS). Le mot blende, désormais abandonné dans la littérature minéralogique, provient du mot allemand *blenden* : « éblouir, tromper ». Ce sulfure — le plus répandu dans la lithosphère — cristallise dans le système cubique. Il peut contenir des impuretés métalliques, telles que celles du fer (blendes foncées) : la marmatite, $(Zn,Fe)S$, contient jusqu'à 14 % de fer. Dans la nature, la sphalérite est associée à d'autres sulfures, comme la galène (sulfure de plomb : PbS).

La wurtzite a la même composition chimique mais cristallise dans le système hexagonal : c'est le polymorphe de haute température de ZnS .

Sous l'ancien vocable de calamine on trouve la smithsonite (carbonate de zinc : $ZnCO_3$) et l'hémimorphite (silicate de zinc : $Zn_4Si_2O_7(OH)_2, H_2O$). Les deux minéraux peuvent être associés. Si historiquement la calamine fut utilisée au début du développement industriel de ce métal, elle est maintenant peu exploitée.