

I-1- Élaboration de l'acier.

I-1--1-Minerais de fer

Le fer est le 4^{ème} élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Il a une dureté entre 4 et 5 sur l'échelle de Mohs. La principale source de fer dans le monde provient de minerais contenant de l'hématite, dont il existe deux variétés : l'hématite rouge et l'hématite brune ; ceux qui contiennent de la magnétite ne fournissent qu'environ 5% du fer mondial et la source la plus importante de tels minerais est la Suède et l'Oural. Le plus important minerais contenant de la sidérite se trouve à Erzberg, en Autriche. La pyrite, minerais de fer sous forme de sulfure, le fer étant difficile à séparer du soufre. De petites quantités de fer sont présentes sous forme combinée dans les eaux naturelles.

La qualité d'un minerais de fer se mesure, entre autres, par sa pureté. Les minerais à haute teneur contiennent 60 à 70% de Fe, à teneur moyenne contiennent 40 à 60% de Fe et à teneur inférieure contiennent 40% de Fe.

Considérant de son abondance dans la croûte terrestre, le fer se présente en un très grand nombre de minerais. Cependant, les minerais employés dans la sidérurgie sont limités, avec :

- Magnétite (Fe_3O_4), 72% de fer
- hématite, Fe_2O_3 , 70% de fer
- Goethite (Fe_2O_3, H_2O), 63% de fer
- Sidérose ($FeCO_3$), 48%

Le figure I-1-1 [1] présente bien les différences, de plus en plus importantes, qui séparent les sidérurgies basées sur :

- les minerais de fer ;
- les ferrailles.

On peut rappeler que, au temps des aciéries Martin, on pouvait employer toutes les combinaisons de fonte et de ferrailles ; la disparition des convertisseurs Martin, la croissance des aciéries à l'oxygène et l'avènement des fours électriques ont créé cette coupure de la sidérurgie. On a donc, actuellement, deux sidérurgies ou, précisément, deux filières bien différentes :

- les « mini-usines » basées sur le four électrique et les ferrailles ;
- les usines basées sur le minerais de fer, le haut-fourneau et l'aciérie à l'oxygène.

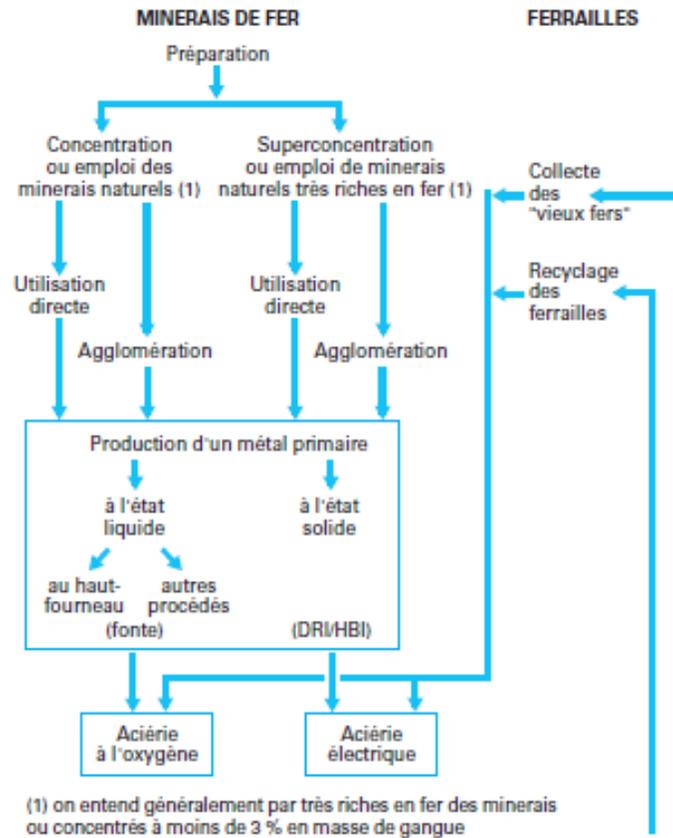


Figure I-1- détail de la production ou de la collecte des métaux primaires [1]

I-1-2- Les usines basées sur le minerai de fer, le haut-fourneau et l'aciérie à l'oxygène :

La filière globale de la production d'acier est composée de quatre procédés (figure I-1-2) :

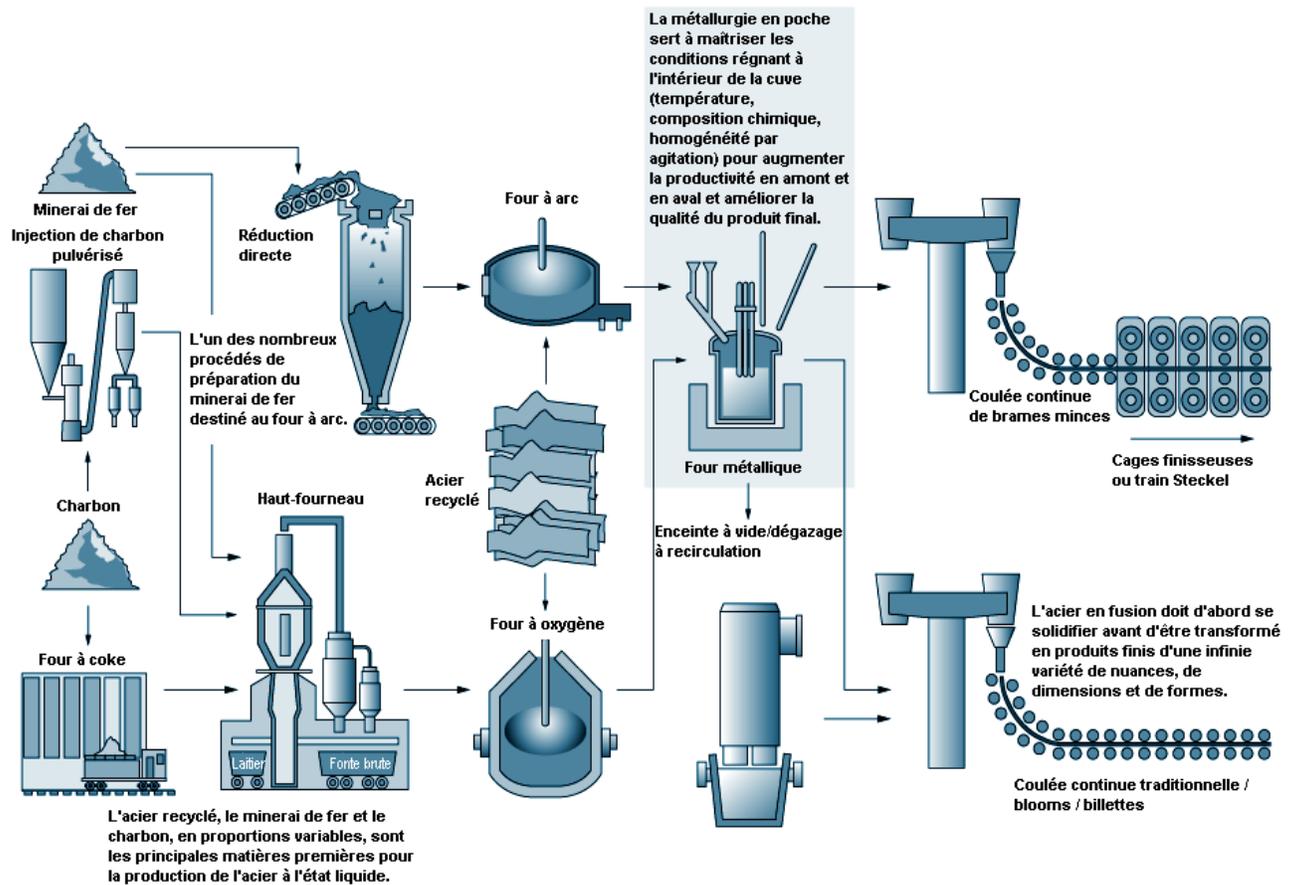
- L'agglomération
- La cokerie
- Le haut fourneau
- Le convertisseur

I-1-2 -1- L'agglomération

I-1-2 -1 -1- Présentation

Le minerai de fer avant son introduction directe dans le haut fourneau est donc préalablement converti en un mâtereau plus adapté. Le rôle principal d'une unité d'agglomération est donc de convertir et de préparer le minerai de fer avant le haut fourneau. Elle garantit l'amélioration de la nature chimique, minéralogique et physique de minerai de fer pour pouvoir réduire la mise au mille, accroître la qualité de la fonte et

améliorer le rendement. Le schéma ci-dessous (figure I-1-3) [3] décrit les installations que comprend cette unité.



Source: American Iron and Steel Institute (AISI), 1995.

Figure I-1--2- Schéma de fabrication du fer et de l'acier [2]

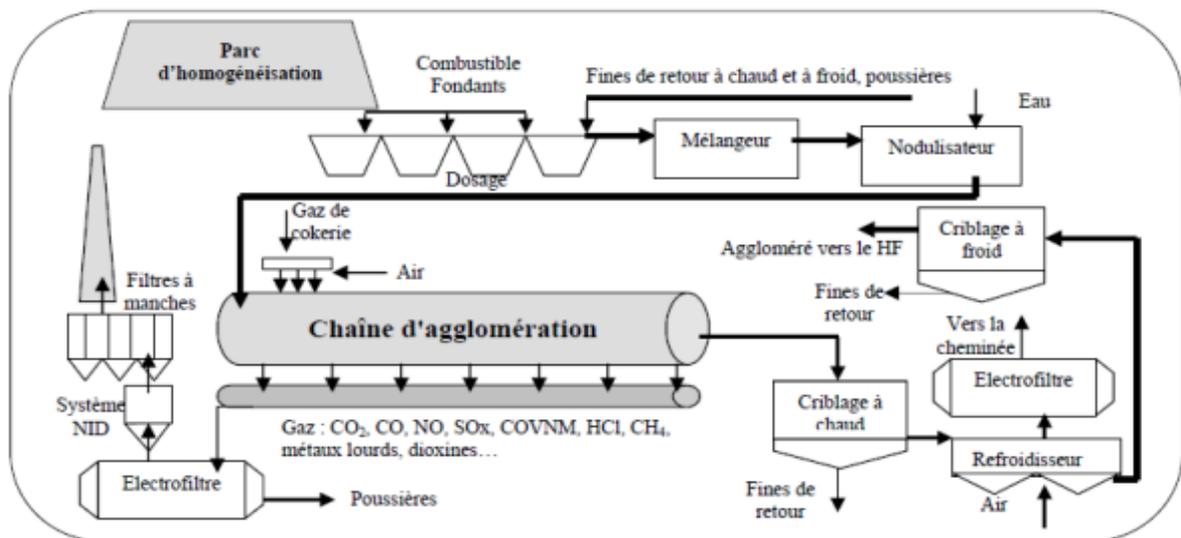


Figure I-1-3- Représentation schématique d'une usine d'agglomération [3]

Le tableau I-1-1 [4] donne les principaux phénomènes physico-chimiques intervenant dans la chaîne d'agglomération ainsi que les températures à partir desquelles ces phénomènes se produisent

Phénomènes	Température [°C]
Séchage : départ de l'eau de microboulettage et de l'humidité des minerais	< 200
Déshydratation de la limonite (Fe ₂ O ₃ hydratée) et de la goethite (FeOOH)	300
Départ des matières volatiles	300-500
Déshydratation de la chlorite (Fe(ClO ₂) ₂ hydratée)	530
Décarbonatation de la sidérose (FeCO ₃)	
Réduction par CO de l'hématite en magnétite	600
Début de la combustion	700
Décarbonatation de la castine	900
Formation de ferrites de calcium en phase solide	1150
Formation du laitier primaire	
Dissolution des minerais dans le laitier	1200-1350
Précipitation dans le laitier vitreux	1150
Formation de silicates et de ferrites de calcium	
Réoxydation de la magnétite	500
Formation de microfissures dans la phase vitreuse	

Tableau I-1-1 : Processus physico-chimiques intervenant sur la chaîne d'agglomération [4]

I-1-2 -2- La cokerie

Cette unité a pour rôle la conversion du charbon naturel en coke, matériau carboné plus adapté au fonctionnement du haut fourneau. Les avantages de ce processus sont de :

- réduire le pourcentage de minéraux volatiles,
- fritter les grains de charbon,
- avoir une granulométrie adaptée au haut fourneau,
- récupérer les hydrocarbures sous forme de gaz et de goudrons.

La cokéfaction consiste à chauffer à l'abri de l'air (pyrolyse) un mélange convenable de charbon, à haute température ensuite « éteindre » le coke en versant de l'eau afin de refroidir et empêcher qu'il ne brûle.

La figure I-1-4 [3] donne une représentation schématique d'une usine de cokéfaction classique.

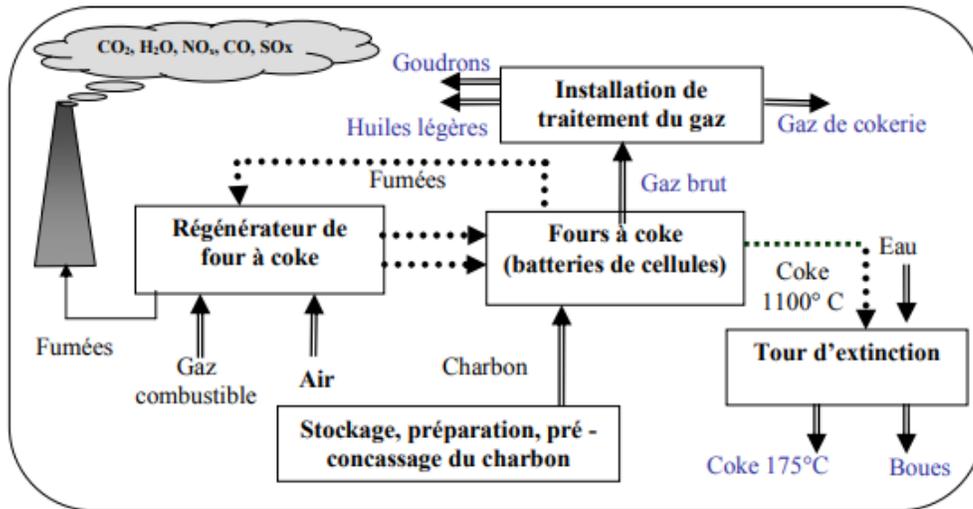


Figure I-1-4- Schéma d'une usine de cokéfaction [3]

I-1-2 -3- Le haut fourneau

I-1-2 -3- 1- Introduction

Le haut fourneau est considéré comme l'un des réacteurs industriels les plus complexes. Sa principale fonction est la production de la fonte. Ses dimensions varient entre 1 et 14 m de diamètre au creuset et peuvent atteindre jusqu'à 90 m de hauteur, en fonction de la production recherchée qui peut aller jusqu'à 9000 tonnes par jour . La figure I-1-5 montre une vue réelle d'un haut fourneau et un schéma des différentes parties qui le composent.

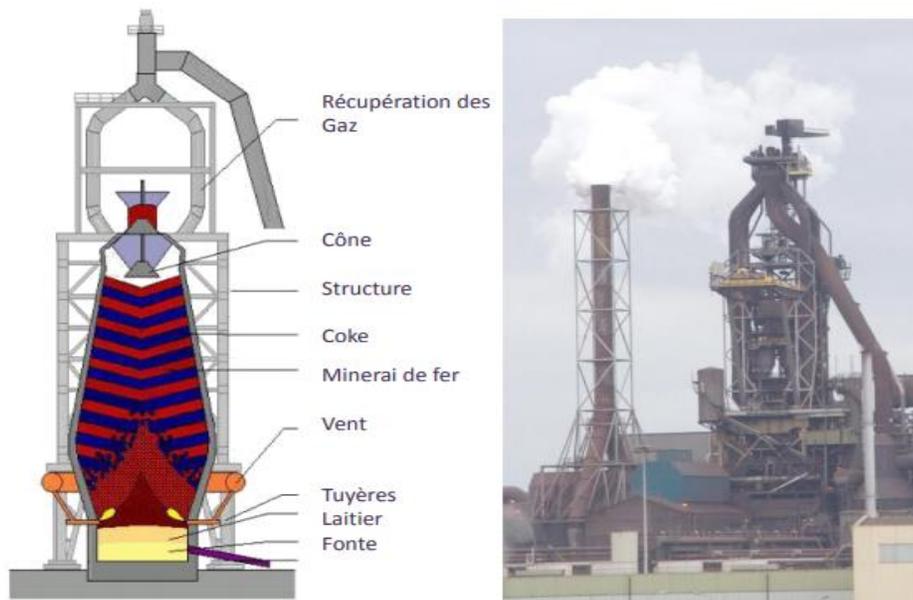


Figure I-1-5- schéma d'ensemble et une photographie d'un haut fourneau (Corus)

I-1-2 -3- 2- Description du haut fourneau

Le haut fourneau est un réacteur à contre-courant dans lequel les matières premières (coke, minerai de fer et aggloméré) introduites solides en haut du fourneau réagissent et échangent de la chaleur avec les gaz réducteurs ascendants. Ceux-ci proviennent de l'oxydation partielle du charbon et de l'air chaud injectés au niveau des tuyères et de la gazéification du coke. Au centre du four, les oxydes de fer et le fer fondent et forment la fonte par réaction avec le carbone du coke. Fonte et laitier sont extraits alternativement par le bas du four. La figure I-1--6 [5] représente une coupe schématique d'un haut fourneau.

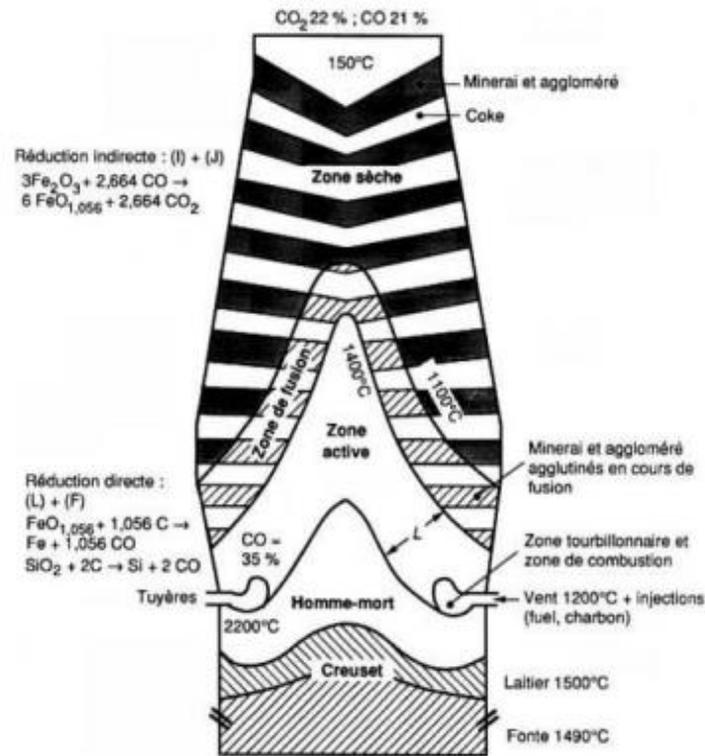


Figure I-1-6 : coupe verticale d'un haut fourneau [5]

On identifie cinq zones principales dans le haut fourneau.

Le gueulard : partie haute du haut-fourneau par laquelle s'exécutent le chargement de solide et l'évacuation des gaz.

La cuve : partie qui a la forme d'un cône agrandi vers le bas. Cette forme géométrique favorise l'écoulement de la charge solide et dans une certaine mesure contribue à la réduction de la charge dès son introduction dans le fourneau.

Le ventre : partie entre la cuve et les étalages où le haut-fourneau atteint sa largeur maximale. La charge pré-réduite dans la cuve termine sa réduction à l'état de fer. La zone de fusion du fer se trouve à ce niveau. Selon la position radiale l'état des matières et les phénomènes physicochimiques varient considérablement à ce niveau.

Les étalages : région où le minerai non encore complètement réduits entrent en fusion. Cette partie à la forme d'un tronc de cône inversé qui améliore la régularisation de la descente de la charge et son chemin vers la partie des tuyères et aussi la distribution du gaz vers la partie supérieure.

Le creuset : le récipient cylindrique garni de réfractaires où s'accumulent les liquides (fonte et laitier) avant d'être extraits et séparés par décantation.

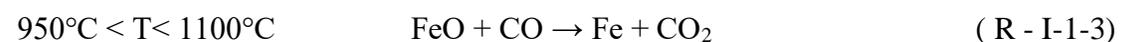
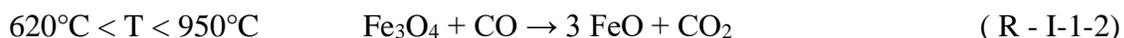
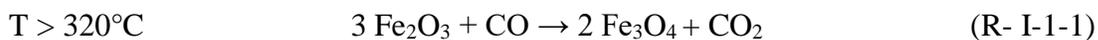
Le minerai, le fondant et le coke sont introduits par un système de répartition qui favorise une alternance des couches. Cette distribution est essentielle pour garantir une bonne marche du haut fourneau.

I-1-2 -3- 3- Description physico-chimique du haut fourneau

Au cours de sa descente la charge de ferrifère est réduite par le gaz réducteur chaud produit de la combustion du coke au niveau des tuyères. A son introduction, le minerai de fer est composé d'hématite, s de magnétite et de wüstite, en plus des impuretés.

Les principales réactions chimiques selon les zones.

• La zone sèche est le siège de la réduction des oxydes de fer par le monoxyde de carbone et l'hydrogène, dans la partie supérieure de cette zone, l'hématite est réduite en magnétite qui est ensuite réduite en wüstite. Suite à l'accroissement de température dans le haut fourneau, les réactions présentées ci-dessous interviennent successivement:



Dans la partie supérieure de la zone sèche, aux températures inférieures à 950°C, la réduction se fait par un gaz CO/CO₂. La réduction de FeO se continue jusqu'à l'équilibre avec le gaz à une température de voisinage 950°C. Au niveau de la partie inférieure de la

cuve, en plus de la réduction de FeO en Fe, se produit le monoxyde de carbone réducteur selon la réaction de Boudouard (**R -I-1-4**).



- Dans la zone de fusion, se forme le laitier par fusion de la gangue et de fondants. Cette partie est aussi siège de la fusion du Fe et du FeO non réduit,

- Dans la zone active : FeO restante est réduite en Fe, également que la fonte se carbure en carbone :



- Au niveau des tuyères, le CO est produit par combustion du coke par l'oxygène selon la réaction :



en parallèle avec :



- Enfin au niveau du creuset, la fonte et le laitier se séparent par décantation, la fonte s'affine et continue de s'enrichir en carbone jusqu'à saturation.

I-1-2 -4- Le convertisseur

Au niveau de ce processus on transforme la fonte liquide en acier. Le convertisseur est un réacteur industriel constitué d'une coque en acier, garnie intérieurement de briques réfractaires. Il fonctionne en discontinu, avec des étapes de chargement, affinage et coulée du laitier et du métal. La fonte liquide provenant du haut fourneau subit l'opération de « conversion ». Elle est réalisée par oxydation des éléments dissous (C, Si, Mn, Ti, P et S) dans le fer liquide ou solide. Cette opération d'affinage a pour objectif de diminuer les teneurs de ces éléments. Dans les convertisseurs actuels, on utilise à cet effet de l'oxygène pur soufflé par le haut au moyen d'une lance placée au-dessus du bain métallique. Pour un bon brassage du bain métallique, un gaz inerte (azote ou argon) est de plus injecté par la base du convertisseur. La figure I-1-7 schématise un convertisseur avec soufflage d'oxygène par le haut [6].

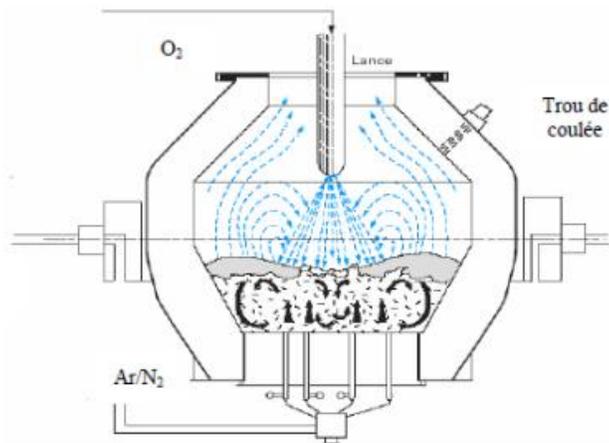


Figure I-1-7 : schéma d'un convertisseur à oxygène [6]

La chaleur dégagée par les réactions d'affinage est suffisante pour compenser les pertes thermiques, pour échauffer et fondre toutes les additions nécessaires aux opérations métallurgiques et pour amener le métal à une température supérieure à sa température initiale. L'ensemble des matières premières introduites dans le convertisseur sont rappelées par Béranger (1994) :

- La fonte liquide : elle arrive au convertisseur à une température approximative de 1370°C.
- Des additions contenant du fer (minerais et ferrailles, fonte solide...) introduites généralement à la température ambiante, destinées à ajuster le bilan thermique, pour obtenir la température d'acier visée.
- Des additions pour constituer le laitier et ajuster sa composition ; elles sont constituées de chaux et de dolomie cuite (CaO - MgO).

La chaux est utilisée pour favoriser le transfert dans le laitier du silicium et du phosphore contenus dans l'acier. La teneur en phosphore de l'acier est en effet un des critères de qualité du produit. La chaux permet de contrôler également la basicité du mélange en réagissant avec la silice. La dolomie permet de saturer le laitier en magnésie afin de limiter l'usure des réfractaires. Le laitier est essentiellement constitué de chaux, de silice et d'oxydes de fer.

- L'oxygène est injecté par une lance multi-trous. La présence d'oxygène dans l'acier liquide est due à la dissolution au cours du soufflage d'une certaine quantité de ce gaz dans l'acier. En pratique industrielle, la quantité d'oxygène nécessaire devant être injectée est calculée à partir de la composition de l'acier liquide et à travers des règles de priorité d'oxydation des éléments présents.

- L'injection d'azote pour favoriser le brassage du bain métallique. Une partie de ce gaz inerte peut se dissoudre dans le bain liquide et le reste se retrouve dans le gaz de convertisseur.

I-1--3- Réduction direct de minerai de fer

L'industrie sidérurgique est un fort émetteur de CO₂. En effet, la production d'acier se fait principalement à partir de minerai de fer, par séparation du fer et de l'oxygène grâce à un t réducteur qui contient du carbone. Elle demande aussi une importante dépense énergétique dont la plus grande partie provient de combustibles fossiles. Cette méthode conduit à la production de CO₂ dans des quantités importantes. Face à ce problème, et pour jouer son rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique, l'industrie sidérurgique a utilisé diverses méthodes de réduction directe pour réduire son empreinte carbone. Cette technologie récente utilisées pour réduire au plafond les résidus et produits font appel à des procédés de réduction directe du minerai de fer (procédés MIDREX, HyL et FIOR, ...)

Le fer se trouve sous forme d'hématite (Fe₂O₃) ou de magnétite (Fe₃O₄) dans les minerais. Lors de la réduction de Fe₂O₃, deux oxydes intermédiaires, Fe₃O₄ et (Fe_{1-x}O) sont formés, du moins aux températures supérieures à 570 °C (à une température supérieure, la wüstite n'apparaît pas), suivant le diagramme de stabilité Fe-O. Le suivi de l'avancement des réactions de réduction des oxydes de fer peut être caractérisé par le degré de réduction R et par le degré de métallisation M.

I-1--3-1- Les technologies de réduction directe

I-1--3-1-1 Procédé MIDREX

Le procédé MIDREX (figure I-1-8) [7] utilise habituellement le gaz naturel comme source d'énergie et source de gaz réducteur, mais un autre type dit MXCOL utilise le charbon qui est gazéifié. Une installation de MIDREX est constituée de deux parties principales : le four à cuve où le minerai de fer est réduit, et le reformeur qui génère le gaz de réduction, ou il faut additionner le système de production et de récupération de chaleur.

Le minerai de fer, en boulettes ou en morceaux, est introduit dans la partie supérieure du four à cuve. Lors de sa descente par gravité dans le four, la charge s'échauffe et l'oxygène est éliminé du minerai par des gaz réducteurs remontant à contre-courant (H₂ et CO). Ces gaz réduisent les oxydes de fer (Fe₂O₃, Fe₃O₄ et FeO) et les transforment en fer métallique, produisant en même temps la vapeur d'eau et dioxyde de carbone. Le DRI est refroidi et

cémenté par le méthane entrant dans la zone inférieure du four à cuve. Le plus souvent, le DRI froid est stocké pour une utilisation dans un four d'aciérie électrique. Le DRI peut pareillement être déchargé à chaud et alimenter une machine de briquetage pour la production de fer briqueté à chaud (HBI), ou bien alimenter à chaud un four électrique.

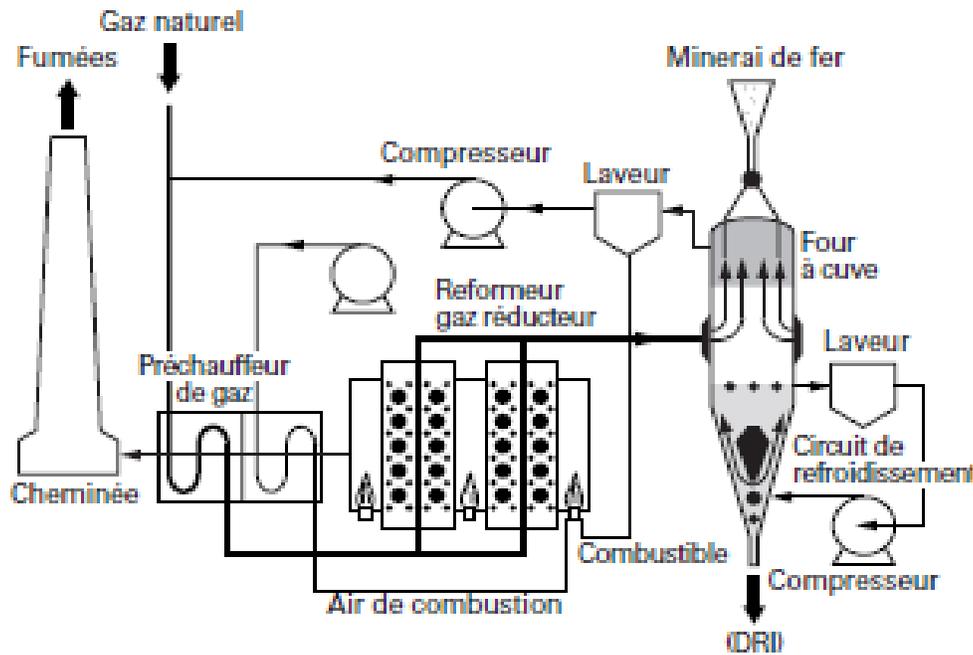


Figure I-1-8 : Procédé MIDREX [7]

Le gaz de tête, après lavage et élimination éventuelle du CO₂, est divisé en deux zones : une zone est utilisée comme gaz combustible et l'autre zone est mélangée avec le méthane et alimente le reformeur. Le gaz est chauffé et reformé lorsqu'il traverse les tubes, selon les réactions suivantes :



Le gaz reformé (syngaz) introduit dans le four à cuve comme gaz réducteur.

Dans le procédé MIDREX, la chaleur est produite en plusieurs endroits par combustion du gaz naturel. Le four à cuve lui-même est chauffé par les gaz réducteurs. Il y a un important système de récupération de chaleur en amont de reformeur. Une partie de la chaleur sensible du gaz de combustion du reformeur est récupérée pour préchauffer le

mélange de gaz d'alimentation, l'air de combustion du brûleur et l'alimentation en gaz naturel.

I-1--3-1-2- Procédé HYL III

Les réacteurs HYL III (figure I-1-9) [7] sont caractérisés par un four à cuve sous pression (6-8atm). La charge d'oxyde de fer (boulettes ou en morceaux) est introduite à travers un mécanisme d'étanchéité. Un système automatisé de vannes permet la mise sous pression et la dépressurisation des bacs d'entrée. La vitesse de descente est réglée par une vanne rotative à la sortie du réacteur. La zone supérieure du four est alimentée en gaz réducteurs chauds à partir d'un réchauffeur de gaz, qui reçoit du gaz réducteur refroidi, épuré, du haut du réacteur, ainsi que du gaz de réduction frais provenant du reformeur de gaz naturel. La zone de refroidissement des solides dans la partie inférieure du four à cuve est alimentée en gaz de refroidissement, qui est recyclé au moyen d'un compresseur de gaz. Après refroidissement, le DRI est évacué par un mécanisme d'étanchéité similaire à celui de l'entrée du réacteur.

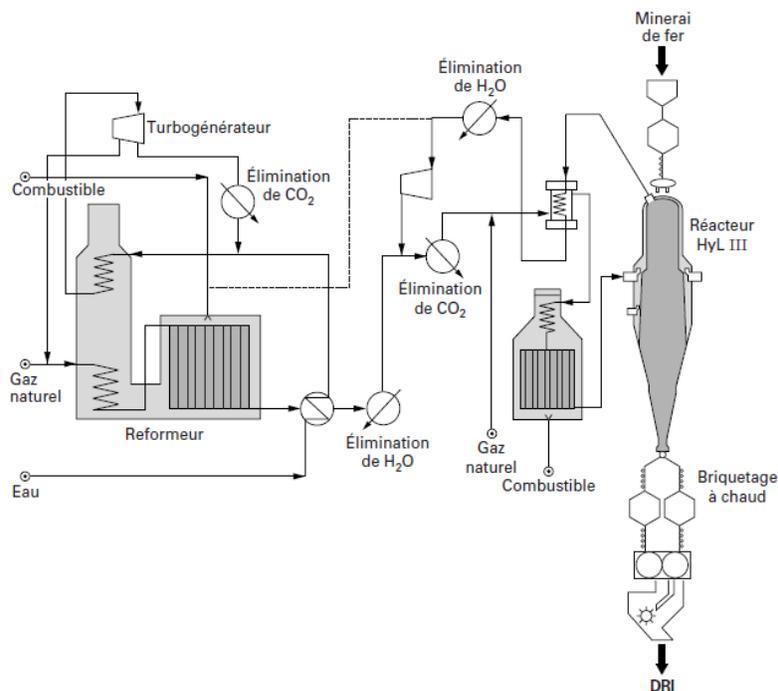


Figure I-1-9 : Procédé HYL III [7]

Les procédés de réduction directe basés sur le CH_4 utilisent un reformeur pour produire un syngaz réducteur CO-H_2 . Ces zones de reformage nécessitent un catalyseur pour

améliorer la cinétique des réactions. C'est le fer métallique présent dans DRI qui sert alors de catalyseur. Le gaz réducteur entrant dans le réacteur contient des concentrations contrôlées de l'eau et de dioxyde de carbone et quand -il rencontre d'énormes quantités du catalyseur, le reformage se produit. HYL a mis en œuvre ce concept de reformage in situ 'auto-reformage'.

Ce procédé commence par l'injection de méthane avec le gaz recyclé dans un humidificateur. La quantité d'eau est contrôlée le dépôt de carbone sur DRI. Puis, le syngaz est préchauffé dans le récupérateur de chaleur, ensuite chauffé dans le chauffe-gaz jusqu'à 900 ° C. une quantité d'oxygène est injecté dans la ligne de transfert pour une combustion du gaz réducteur destinée à augmenter sa température à environ 1020 °C.