

## Licence Sciences et Techniques (LST)

### *GENIE CHIMIQUE*

### PROJET DE FIN D'ETUDES

# Industrie du Fer Métallurgie – Sidérurgie-Acier

#### Présenté par :

◆ El Amri Hanae

#### Encadré par :

◆ Pr .Bouayad Abdelouahed (FST Fès)

#### **Soutenu Le 8 Juillet 2021 devant le jury composé de :**

- Pr Bouayad Abdelouahed (FST Fès)

- Pr Kandri Rodi Youssef (FST Fès)

- Pr Bouayad Abdesalam (FST Fès)

#### **Année Universitaire 2020/2021**

# REMERCIEMENTS

*Avant d'entamer au vif de notre rapport, nous adressons d'abord nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer ce rapport.*

*Mes remerciements s'adressent en premier lieu à mon encadrant **Pr. Abdelouahed Bouayad** pour les conseils précieux, l'orientation, la disponibilité et la patience dont j'ai bénéficié pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer cordialement toute ma reconnaissance aux membres du **jury**, pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger ce travail.*

*Je ne laisse pas cette occasion passer sans remercier très vivement mes chers **enseignants** de la faculté des sciences et techniques de Fès, pour les connaissances qu'ils m'ont permis d'acquérir.*

# DÉDICACES

*A mon père,*

*Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin.*

**Ma chère mère,**

*Honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez suffisante pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

**Mes frères,**

*Qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études*

**Ma famille EL Amri, Benchaaboune,**

Pour votre soutien et encouragements

**A mes amies,**

Qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

*Merci pour tous,*

## LISTE DES FIGURES

Figure1: La masse atomique standard du Fer.....	4
Figure 2: La poudre noire (oxyde de Fer).....	5
Figure 3: Quelques utilisations de Fer .....	7
Figure 4: Aliments riche en fer .....	8
Figure 5: Boule de Nancy .....	8
Figure 6: Boules d'acier. ....	8
Figure7: Les opérations nécessaires pour passer du minerai de fer à la fonte ou à l'acier.....	10
Figure 8: Pyrite.....	15
Figure 9 : Greigite. ....	15
Figure 10 : pyrrhotite. ....	15
Figure11: Schéma et structure d'un ion carbonate.....	16
Figure12: La Sidérite.....	16
Figure13: Lépidochrome. ....	16
Figure14: goethite .....	16
Figure15: Concassage et criblage des minerais de Fer. ....	18
Figure16: Broyeur de minerais de Fer.....	19
Figure17: Procédé de traitement de minerais de Fer. ....	19
Figure18: Haut fourneau .....	22
Figure19: La production de la fonte et laitier .....	26
Figure20: Procédé du convertisseur à oxygène.....	28
Figure21: Procédé d'aciérie à oxygène.....	31
Figure22 : Image d'une aciérie électrique .....	31

Figure23: Images sur des lingotières de coulée types "brame et billette".....	32
Figure24: Le procédé d'une coulée continue.....	32
Figure25: Le procédé général de la coulée d'acier.....	33
Figure26: Schéma simplifié du procédé de laminage.....	33
Figure27: Le laminage à chaud.....	34
Figure28: Le laminage à froid.....	35
Figure 29: Schéma simplifié de la fabrication d'acier.....	35

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques caractéristiques physiques du Fer.....	4
Tableau 2 : Différents types de la fonte.....	11
Tableau 3: Les principaux oxydes de Fer.....	17

# SOMMAIRE

✓ Introduction.....	1
<b><u>Chapitre 1</u> : Le Fer : élément de transition.....</b>	<b>2</b>
I. Historique .....	3
II. Propriétés de Fer .....	4
II. 1. Propriétés physico-chimiques.....	4
II. 2. Degré d'oxydation .....	5
II.3. Récupération.....	6
III. Utilisation du Fer.....	7
<b><u>Chapitre 2</u> : La sidérurgie .....</b>	<b>9</b>
I. Définition.....	10
II. Les principales opérations industrielles.....	10
II.1. La fonte.....	10
II.2. L'acier.....	12
II.3. Produits sidérurgiques.....	12
II.4. Les risques sidérurgiques .....	12
<b><u>Chapitre 3</u> : Minerai de Fer et processus industriel .....</b>	<b>14</b>
I. Minerai de Fer .....	15
I.1. Définition .....	15
I.2 .Les principaux minerais de Fer .....	15
I.3. Traitements de minerai de Fer .....	18
II .Métallurgie .....	20

<b>II 1. Définition et trois spécialités</b> .....	20
<b>II 2. Grillage métallurgique</b> .....	20
<b>III. Processus de fonctionnement du Haut Fourneau</b> .....	21
<b>III.1. Définition du Haut Fourneau</b> .....	21
<b>III.2. Le bas fourneau</b> .....	21
<b>III.3. Caractéristiques du Haut Fourneau</b> .....	22
<b>III.4. Le coke</b> .....	22
<b>III.5. Processus de fonctionnement</b> .....	23
<b>III.5.a. Principe Générale</b> .....	23
<b>III.5.b. Les réactions dans le haut fourneau</b> .....	23
<b>III.5.c. Production de la fonte</b> .....	25
<b>III.5.d. Obtention du Laitier</b> .....	26
<b>III.5.e. Production des gaz</b> .....	26
<b>III.6. Le Convertisseur</b> .....	27
<b>III.6.a. Définition</b> .....	27
<b>III.6.b. Le convertisseur à oxygène</b> .....	27
<b><u>Chapitre 4 : La fabrication d'acier</u></b> .....	29
<b>I. L'acierie</b> .....	30
<b>II. La coulée d'acier</b> .....	31
<b>III. Le laminage d'acier</b> .....	33
<b>III.1. Le laminage à chaud</b> .....	34
<b>III.2. Le laminage à froid</b> .....	34
<b>IV. Le principe de la fabrication d'acier</b> .....	35
<b>✓ Conclusion</b> .....	37
<b>✓ Références Bibliographique</b>	

# INTRODUCTION

Le fer fait partie des métaux les plus présents sur terre 35% de poids de notre planète et on le trouve essentiellement dans le noyau de la terre, le fer est le principale composé chimique de l'acier. Ce minerai rouge vif sert à la construction de différents choses mais comment le fer est il extrait et transformé ?

L'acquisition de la métallurgie du Fer est une étape importante dans l'histoire des sociétés, aussi l'industrie des métaux (métallurgie), met en œuvre essentiellement des métaux solides extraits de minerais, est une industrie très importante et essentielle, les utilisations sont très nombreuses.

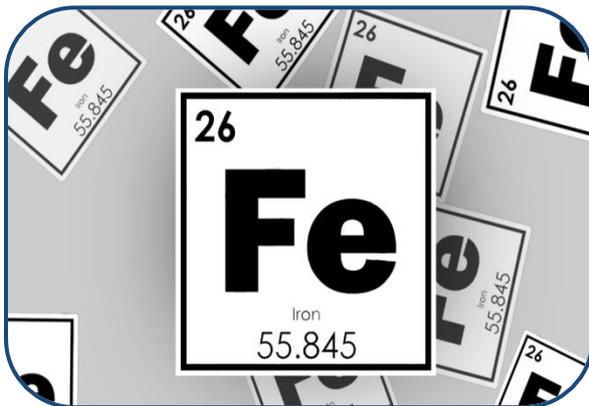
Durant cette recherche bibliographique on s'est intéressé de traiter le procédé de l'industrie sidérurgique, à partir de minerai de Fer (ou parfois de ferrailles récupérées), et de charbon (coke), la fonte et l'acier.

Ce Rapport est constitué de quatre chapitres, en un premier lieu on va présenter le Fer ses propriétés et utilisations, après on entamera le deuxième chapitre qui décrira les principales opérations de la sidérurgie.

Ensuite le troisième chapitre sera consacré aux principaux minerais de Fer et leurs traitements ainsi l'installation industrielle à l'aide d'un four haut fourneau, avec le processus de fonctionnement sur la fabrication et la production de la fonte et du Fer, et bien sur le principe d'un convertisseur .Enfin le quatrième chapitre portera sur la fabrication et l'obtention d'acier.

# Chapitre 1 :

## *Le Fer : élément de transition*



## *I. Historique :*

Les premières traces de l'industrie du fer sont attestées vers 1700-1500 av. J.-C. dans le sud du Caucase. À cette époque, les forgerons faisaient chauffer un mélange de minerai de fer et de charbon de bois dans un simple trou.

Ce procédé primitif évolue vers le bas foyer. Celui-ci est une sorte de four à moitié enterré dans lequel la combustion est activée par de l'air introduit au moyen d'un soufflet manuel. La température est portée vers 1 000-1 200 °C, et on obtient ainsi, par réduction (c'est-à-dire par élimination de l'oxygène du minerai) une masse pâteuse de quelques kilogrammes. Celle-ci est martelée, pour éliminer les scories, puis forgée pour fabriquer des objets.

Dans l'écorce terrestre, le fer est le deuxième métal le plus courant, après l'aluminium, et le quatrième élément (substance de base) le plus répandu.

Dans sa forme pure, le fer est un métal lourd, argenté et magnétique. Mais on ne le trouve presque jamais ainsi dans la nature. Il est bien plus fréquent sous forme de minerai de fer. Les minerais sont des minéraux mélangés à divers éléments. Les principaux minerais de fer sont composés de fer lié à de l'oxygène (oxydes) ou à de l'oxygène et à du carbone (carbonates).

L'âge du fer est une période archéologique caractérisée par l'usage de la métallurgie du fer et faisant généralement suite à l'âge du bronze. Cependant, les limites chronologiques de l'âge du fer varient considérablement selon l'aire culturelle et géographique considérée.

Le chemin de Fer associe une voie ferrée et des véhicules spécifiques tractés par un engin à moteur, commence en grande Bretagne à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle et au début du 21<sup>ème</sup> siècle, puis progresse en quelques décennies au fur et à mesure des progrès techniques, pour donner lieu à l'intense développement ferroviaire des années 1840.

Le chemin de Fer se développe en France à partir des années 1820. Long temps considéré comme une curiosité. Depuis 1937 la majeure partie du réseau ferroviaire est exploitée par la société nationale des chemins de Fer Français (la SNCF), cette dernière commence au début du 21<sup>ème</sup> siècle, le développement de la voie ferrée en France repose en grande partie sur une forte volonté politique de l'état dans les orientations choisies et Les moyens mis en œuvre<sup>[1]</sup>.

## II. Propriétés de Fer :

### II.1. Propriétés physico-chimiques :

Le fer est l'élément chimique métallique de numéro atomique 26, de symbole Fe. Le fer possède 28 isotopes connus, de nombre de masse variant de 45 à 72. Parmi ces isotopes, quatre sont stables,  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  et  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  étant largement le plus abondant (91,754 %), suivi de  $^{54}\text{Fe}$  (5,845 % possiblement légèrement radioactif avec une demi-vie supérieure à  $3,1 \times 10^{22}$  années),  $^{57}\text{Fe}$  (2,119 %) et  $^{58}\text{Fe}$  (0,282%) . (Figure 1)

Figure 1 : La masse atomique standard du Fer.



Dans la classification périodique, il se place dans la première série de transition entre le manganèse ( Mn ) et le cobalt( Co ). Ses propriétés chimiques sont voisines de celles du cobalt.

C'est un métal très ductile et malléable qu'on peut modeler sans le fondre. Les propriétés mécaniques dépendent de la pureté et sont en particulier grandement modifiées dans les aciers (alliages avec le carbone et divers éléments). Elles peuvent être très améliorées par des traitements thermiques ( Tableau 1 ) .

Tableau 1 : Quelques caractéristiques physiques du Fer.

Masse atomique	55,845 g/mol
Masse volumique à 20 °C	7,87*10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique à 1556°C(Liquide)	7,03*10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>
Volume à 25°C	0,13*10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /Kg
Température de fusion	1535 °C
Température d'ébullition	2750 °C
Rayon covalent	0,117 nm
Rayon métallique	0,127 nm
Rayon ionique Fe <sup>2+</sup>	0,075 nm
Rayon ionique Fe <sup>3+</sup>	0,069 nm
Energie de fusion	13,8 kJ/mol
Energie de vaporisation	349,6 KJ/mol
Volume molaire	7,09*10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /mol

En outre le fer subit une importante corrosion, ce qui explique qu'il subsiste peu d'objets anciens façonnés dans ce métal, par comparaison à ceux qui sont en or, en argent ou en cuivre<sup>[3]</sup>.

## II.2.Degré d'oxydation :

Le Fer présente essentiellement trois degrés d'oxydation :

- ✓ 0 dans le corps simple Fer et ses alliages.
- ✓ +II dans les composés ferreux (ion ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  dans les composés ioniques).
- ✓ +III dans les composés ferriques (ion ferrique  $\text{Fe}^{3+}$  dans les composés ioniques).

Le Fer combiné à l'oxygène, s'oxyde suivant les conditions en trois oxydes de Fer :

### ❖ L'Oxyde de Fer (II) :

Egalement appelé oxyde ferreux, est un composé chimique de formule brute  $\text{FeO}$ . Il s'agit d'un oxyde de Fer se présentant au laboratoire sous la forme d'une poudre noire, sa forme minérale étant la Wustite. (Figure 2).



Figure 2: La poudre noire (oxyde de Fer).

De l'oxyde de Fer (II)  $\text{FeO}$  se forme en chauffant de l'oxalate de Fer (II)  $\text{FeC}_2\text{O}_4$ , sous vide :



Thermodynamiquement instable en dessous de  $575^\circ\text{C}$ , et se dismute en Fer métallique, Fe et oxyde de Fer (II, III),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , sous la réaction suivante :



### ❖ L'Oxyde de Fer (III) :

Egalement appelé oxyde ferrique, est le composé chimique de formule  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dont la formule minérale est l'Hématite, il est la principale source de Fer pour l'industrie sidérurgique.

Il entre souvent dans la composition des thermites (mélange d'aluminium métallique et d'oxyde d'un autre métal, généralement l'oxyde de Fer), dont la combustion est très exothermique :



Cette réaction est utilisée pour souder de grandes pièces métalliques (rails de voies ferrées).

❖ **L'Oxyde de Fer (II, III) :**

Est un composé chimique de formule  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , (nommé aussi tétr oxyde de trifer), c'est un oxyde de Fer présent dans le milieu naturel sous forme de magnétite, il se présentant généralement au laboratoire sous forme d'une poudre noire, il contient à la fois des cations  $\text{Fe}^{2+}$ , et d'autre au fois des cations  $\text{Fe}^{3+}$ , et sa forme est parfois écrite :  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . La réaction chimique peut donc être représentée par l'équation bilan :



À l'air libre en présence d'humidité, il se corrode en formant de la rouille, constituée d'oxydes ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), et d'oxyhydroxydes ferriques hydratés ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), le Monohydrate ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) peut être également décrit comme l'hydroxyde de Fer (III)  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , également appelé oxyde de Fer hydraté.

Le Fer métallique n'est pas stable en milieu aqueux à cause des potentiels de référence des couples de Fer, il s'oxyde d'autant plus vite que le PH est bas.  $\{\text{Fe}^{2+} / \text{Fe} : E^\circ = -0,44 \text{ V}\}$  ;  $\{\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+} : E^\circ = +0,77 \text{ V}\}$ .<sup>[2]</sup>

**II.3 Récupération :**

La récupération des métaux ferreux (comme le Fer, la fonte, l'acier...) est très importante par ce que cette activité permet de réduire l'extraction des matières premières autrement requises pour combler les besoins des industries ainsi que l'empreinte.

La récupération est le pourcentage de métal présent dans le concentré/à tout le métal contenu dans le minerai.<sup>[12]</sup>

$$R_m = \frac{tC * C}{tA * A}$$

$t_c, t_A$  : sont des teneurs de minerai dans le concentré et l'alimentation en g/t.

$C, A$  : Des quantités de minerai dans le concentré et l'alimentation en t/h.

➤ La quantité de Fer dans l'alimentation et le concentré (en tonne) :

• Dans l'alimentation :  $m_{\text{Fe}/A} = \% \text{Fe} * A$

$\% \text{Fe}$  : Le pourcentage du Fer dans l'alimentation.

$A$  : La quantité du Fer dans l'alimentation en t.

• Dans le concentré :  $m_{\text{Fe}/C} = \% \text{Fe} * C$

%Fe : Le pourcentage du Fer dans le concentré.

C : La quantité du Fer dans le concentré en t.

⇒ Le rendement de métal Fer : 
$$R = \frac{m_{Fe/C}}{m_{Fe/A}} * 100$$

### III. Utilisation du Fer :

Le métal le plus utilisé car il est bon marché et de bonne propriétés mécaniques. Au 21<sup>ème</sup> siècle, le Fer devient plus abondant et moins onéreux (on dit que le 21<sup>ème</sup> siècle est le siècle de Fer).

Le fer est largement utilisé dans la technologie et l'industrie généralement sous forme d'acier. On le trouve dans la construction métallique (sous forme de barres dans les charpentes ou d'armatures dans le béton armé), dans l'outillage, dans la construction automobile (carrosserie de voiture), dans l'emballage (boîtes de conserve, canettes) et il est aussi utilisé en électronique pour fixer les informations analogiques sur des supports appropriés (bande magnétique, cassette audio et vidéo). (Figure 3).<sup>[3]</sup>



Figure 3 : Quelques utilisations de Fer

#### Dans l'alimentation :

Le fer est un oligo-élément et fait partie des sels minéraux indispensables qu'on retrouve dans les aliments, mais peut être toxique sous certaines formes.

Le fer est essentiel au transport de l'oxygène et à la formation des globules rouges dans le sang. Il est un constituant essentiel des mitochondries, puisqu'il entre dans la composition de l'hème du cytochrome C. Il joue aussi un rôle dans la fabrication de nouvelles cellules, d'hormones et de neurotransmetteurs. Le fer contenu dans les végétaux (fer dit « non héminique »)  $Fe^{3+}$  ou fer ferrique est moins bien absorbé par l'organisme que celui contenu dans les aliments crus d'origine animale (fer « héminique »)  $Fe^{2+}$  ou fer ferreux. Une carence en Fer est source d'anémie.

En revanche son absorption est inhibée par la consommation de thé et/ou de café car les tanins (polyphénols) sont des chélateurs de fer. Les buveurs de thé en très grande quantité ont donc parfois des anémies ferriprives. (Figure 4) .



Figure 4 : Aliments riche en fer

### En pharmacie :

Le fer est utilisé pour la préparation de médicaments. il était l'un des principaux composants des boules d'acier vulnéraires, boules de Nancy, boules de Molsheim, boules minérales des Chartreux, qu'on faisait tremper dans de l'eau pour la charger en substances réputées bénéfiques. (Figure 5-6)



Figure 5 : Boule de Nancy.



Figure 6 : Boules d'acier.

# Chapitre 2:

## *La Sidérurgie*

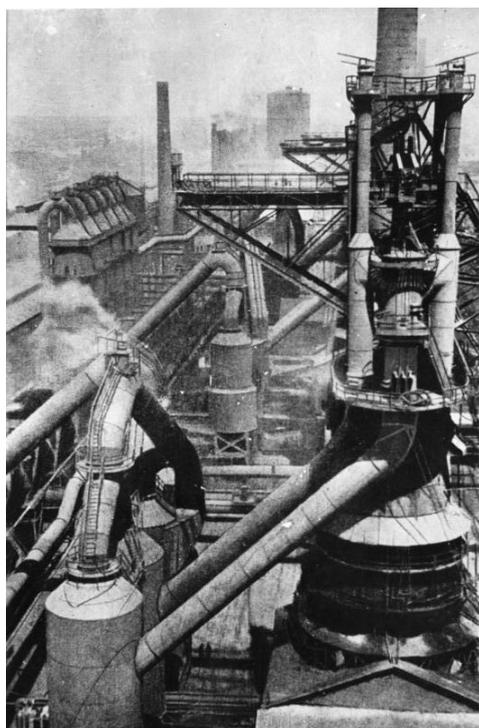


Photo: AFP, UIC



## I. Définition:

La sidérurgie est l'ensemble des techniques et des industries qui assurent la fabrication du fer et des alliages qui en sont composés (appelés alliages ferreux). C'est un sous-domaine essentiel de la métallurgie, qui étudie la fabrication des métaux de façon générale. Ces alliages désignent en particulier la fonte et l'acier, qui sont tous les deux constitués de fer et de carbone. La fonte, qui contient plus de carbone que l'acier, est ainsi beaucoup plus cassante.

La sidérurgie moderne succède à la production de métal dans les bas fourneaux, avec le remplacement du charbon de terre par du coke, il produit de la fonte de bonne qualité, mais qui n'est apte qu'au moulage.<sup>[4]</sup>

## II. Les principales opérations industrielles :

Dans la sidérurgie, les hauts fourneaux convertissent le minerai de Fer en Fer brut par l'action réductrice du carbone à haute température. Ce Fer brut également appelé « Fonte », contient encore beaucoup de carbone et autres impuretés qui doivent être supprimées partiellement ou totalement par une réaction avec l'Oxygène. (Figure 7)

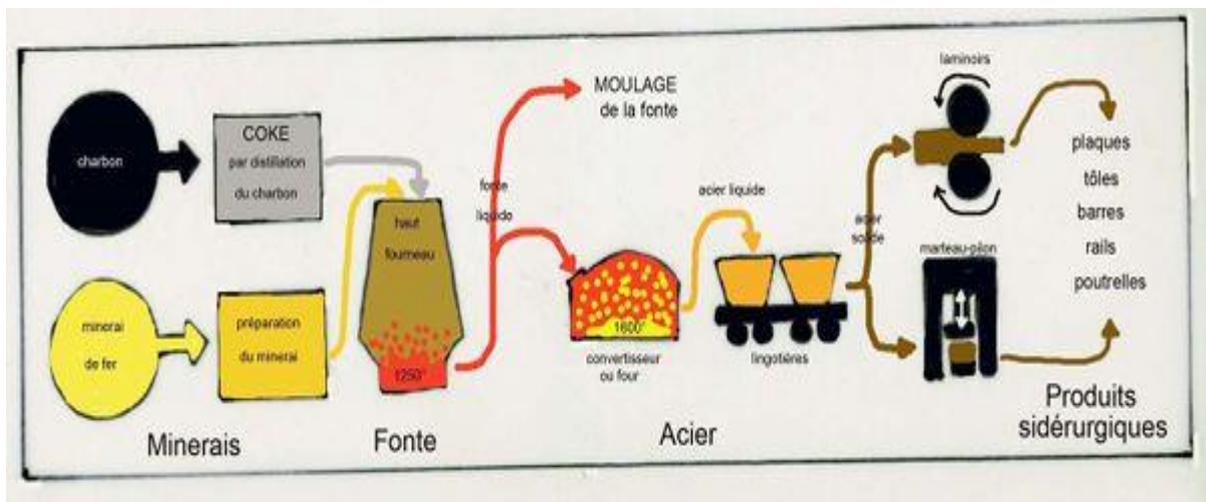


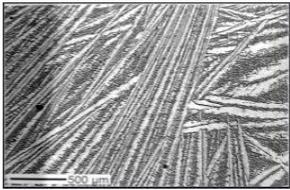
Figure 7 : Les opérations nécessaires pour passer du minerai de fer à la fonte ou à l'acier

### II.1. La fonte :

La fonte est produite en fondant des alliages fer-carbone ayant une teneur en carbone supérieure à 2%. Après la fusion, le métal est versé dans un moule. Il existe également des différences dans la composition la fonte contient de 2–4% de carbone et autres alliages et 13% de silicium, qui améliore les performances de coulée du métal en fusion. De petites quantités

de manganèse et certaines impuretés comme le soufre et le phosphore peuvent également être présentes. Il existe différents types de fonte, la différence se remarque par l'aspect de la cassure d'un bloc de fonte, parmi lesquelles on a (Tableau 2)<sup>[4]</sup> :

**Tableau 2** : Différents types de la fonte.

Type de la fonte	Composition en carbone	Forme	Caractéristiques
<p>Fonte grise</p> 	3,5% à 6%	Graphite en lamelle ou de sphère	<p>-Obtenu après un refroidissement très lent.</p> <p>-Fabriquer des blocs moteurs des tambours de frein.</p>
<p>Fonte blanche</p> 	2,2% à 3,5%	Carbure de Fer (Cémentite :Fe <sub>3</sub> C)	<p>-Obtenu après un refroidissement lente.</p> <p>-Très résistante à l'usure et à l'abrasion.</p> <p>-Elle a un bel aspect ce qui la fait employer en fonderie d'art.</p>
<p>Fonte brute</p> 	Très faible quantité de carbone (0,025%)	Sous forme de carbure de Fer	<p>-Sort d'un haut fourneau donnera de l'acier après une opération de fusion oxydante cette opération se fait dans un convertisseur.</p> <p>-Sera affiné en acier par décarburation.</p>

## II.2 .L'acier :

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

Une autre partie de la fonte est envoyée vers les convertisseurs afin de procéder à la fabrication de l'acier. On brûle alors la fonte liquide, les atomes de carbone en trop disparaissent ainsi et la proportion de fer augmente dans le produit : on a alors l'acier liquide. On fabrique également de l'acier grâce aux ferrailles de récupération. Celles-ci sont fondues dans des fours spéciaux et donnent alors directement de l'acier.<sup>[2]</sup>

## II.3.Les produits sidérurgiques :

Les produits sidérurgiques constituent un mélange de commodité et de spécialités, pour adopter une typologie liée à l'économie du secteur, cette distinction est fluctuante, dans la mesure où des applications entrent ou sortent au fil du temps de ces catégories.

Mais aussi que les produits sont souvent des produits services, conçus sur mesure avec les utilisateurs pour des applications très ciblées et individualisées.

Pour fournir deux exemples : les ronds à béton sont plutôt des commodités, alors que les aciers plats pour l'automobile sont plutôt des spécialités.

Les produits sidérurgiques traduisent en offre commerciale, la complexité de la métallurgie du Fer et de l'acier, ce dernier solidifié, forme des blocs de métal. Ceux-ci peuvent être transformés en tôles, rails, poutrelles..., après passage dans des trains de laminoirs qui vont leur donner la forme et l'épaisseur voulue.

## II.4.Les risques sidérurgiques :

L'industrie sidérurgique traite et transporte de grandes quantités de matières au moyen d'équipements lourds, les risques sidérurgiques sont d'une grande variété et d'une dangerosité élevée : l'intoxication par inhalation, l'exposition au bruit et à la chaleur intense des fours et des coulées, les équipements.

### ➤ Les risques physiques :

Les principaux problèmes physiques sont la chaleur ambiante et la chaleur rayonnante qui règnent, en particulier en haut des batteries, le bruit aussi peut être un problème sur les équipements mobiles, surtout celui qui provient des mécanismes d'entraînement et d'éléments vibrants mal entretenus, de plus des appareils produisant des rayonnements ionisants.

➤ Les risques chimiques :

On recourt généralement à de l'huile minérale pour le fioulage du charbon et le dépoussiérage des gazs, il se peut également que des produits aient été appliqués sur le charbon avant son chargement dans la trémie afin de faciliter son écoulement et l'évaciation des déchets dangereux provenant de la récupération des sous produits.

➤ Les risques mécaniques :

Les principaux risques mécaniques sont liés aux équipements mobiles côté bélier, côté coke, et au wagon-chargeur en haut des batteries pendant pratiquement toute la compagne, ces équipements mobiles fonctionnent dans un espace restreint, les coincements par des équipements mobiles sur rails sont responsables du plus grand nombre des accidents mortels survenus aux fours à coke .<sup>[5]</sup>

## Chapitre 3:

### *Minerai de Fer et processus*

### *Industriel :*



# I. Minerai de Fer :

## I.1. Définition :

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme l'hématite. Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère ; sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.<sup>[5]</sup>

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

- minerais pauvres :  $Fe \leq 30 \%$
- minerais moyens :  $30 \% < Fe < 50 \%$
- minerais riches :  $Fe > 50 \%$

## I.2. Les principaux minerais de Fer :

Les principaux minerais de Fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes :

### ➤ Les sulfures :

Un sulfure de Fer est un composé chimique résultant de la combinaison de soufre et de Fer sous forme de réaction suivant :



Il existe plusieurs variétés de sulfures-Fer qui diffèrent les unes des autres par leur stoechiométrie et leurs propriétés présentant. Les sulfures dont les représentants principaux sont la Pyrite (Figure 8) ( $Fe = 46,5\%$ ) de formule chimique  $FeS_2$ , et la Pyrrhotite (Figure 10) ( $Fe_{1-x}S$  ; où  $x=0$  à  $0,2$ ), un minéral ferromagnétique. On peut aussi citer la Greigite (Figure 9), un sulfure de Fer (II,III) de formule  $Fe_3S_4$ , analogue à la magnétite  $Fe_3O_4$  quant à ses propriétés ferromagnétiques.

Ces sulfures ne sont jamais utilisés directement pour la production du Fer à cause de l'effet fragilisant du soufre sur les alliages ferreux.<sup>[5]</sup>



Figure 8 : Pyrite.



Figure 9 : Greigite.



Figure 10 : pyrrhotite.

➤ **Les carbonates :**

En chimie un carbonate est un sel associant l'ion carbonate de formule chimique  $\text{CO}_3^{2-}$  à un ou plusieurs cations. En minéralogie les carbonates sont des minéraux, dont la composition chimique est celle d'un carbonate. (Figure 11)

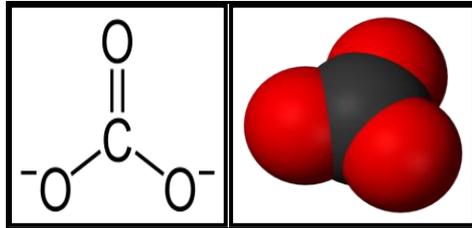


Figure 11 : Schéma et structure d'un ion carbonate.

Comme carbonate de Fer on trouve la sidérite (Figure 12) ( $30\% < \text{Fe} < 40\%$ ), de formule brute  $\text{FeCO}_3$ , avec des traces de Mg, Mn, Ca, Co, Zn. Rarement pure, et qui donne l'oxyde par calcination. À l'air humide la sidérite se transforme en lépidocrocite (Figure 13), ou bien en goéthite (Figure 14). Elle est fréquemment associée à la pyrite, la magnésite, le manganèse.



Figure 12 : La Sidérite



Figure 13 : Lépidocrocite.



Figure 14 : goéthite.

➤ **Les oxydes :**

Les oxydes de fer sont des composés chimiques résultant de la combinaison d'oxygène et de fer. Les oxydes de fer sont abondants dans la nature, soit dans des roches, notamment minerais de fer, soit dans les sols. Les oxydes de fer, surtout synthétiques, servent soit comme pigments, soit pour leurs propriétés magnétiques ( Tableau 3 ) [5]

Tableau 3 : Les principaux oxydes de Fe

Oxyde de Fer	Formule brute	Teneur en Fer	Caractéristiques
<b>Hématite</b> 	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	30% - 65%	<p>-Est le composant le plus abondant et le plus important des minéraux de Fer traités dans l'industrie sidérurgique.</p> <p>-C'est un composé d'oxyde de Fer (III), avec des traces de Ti, Al, Mn, et de H<sub>2</sub>O.</p> <p>-C'est un minéral très courant, de couleur noire à gris argenté, brun à rouge ou rouge, avec de nombreuses formes cristallines (oligiste, spécularite, martite...).</p>
<b>Maghémite</b> 	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	35% - 40%	<p>-Elle se forme à partir de la magnétite, et comprend les mêmes caractéristiques magnétiques que la magnétite.</p> <p>-C'est une forme métastable de l'Hématite.</p> <p>-c'est un oxyde mixte de Fer (II), et de Fer (III), obtenue par oxydation progressive de la magnétite, de structure spinelle.</p>
<b>Magnétite</b> 	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	50% - 67%	<p>-C'est une espèce minérale composée d'oxyde de Fer (II,III), avec des traces de Mg, Mn, Zn, Ti, Ni, Cr, V, Al.</p> <p>-Est un matériau ferromagnétique de couleur noire, aussi c'est le minéral de Fer le plus riche en métal.</p>
<b>Limonite</b> 	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	25% - 45%	<p>-C'est le principal composant du chapeau de Fer, elle peut perdre de l'eau et se transformer en hématite.</p> <p>-En sidérurgie la limonite a peu de valeur, à cause de son contenu en phosphates.</p> <p>-Il s'agit d'un minerai d'origine sédimentaire qui contient de la goethite, de lépidocrocite et en faibles quantités de l'hématite.</p>
<b>Ilménite</b> 	$\text{FeTiO}_3$	33% - 36%	<p>-C'est un minéral à structure d'hématite, elle est utilisée plutôt pour l'extraction du titane.</p> <p>-L'ilménite est opaque, et de couleur noire.</p>

### **I. 3. Traitements des minerais du Fer:**

L'utilisation des minerais de Fer dans un haut fourneau impose leur conditionnement préalable. ce sont les étapes d'agglomération ou de pelletisation, qui apportent au minerai la résistance mécanique, la perméabilité et la composition chimique à la gangue compatible avec leur utilisation .Lorsque le minerai de Fer est extrait de la mine, il doit subir six étapes principales de traitement<sup>[6]</sup> :

#### **1. Criblage :**

Nous recommandons de commencer par cribler le minerai de Fer afin de séparer les particules fines en aval de l'ouverture d'ajustement du broyeur avant l'étape de broyage, ces particules fines réduisent l'efficacité du broyeur et font augmenter la consommation d'énergie nécessaire pour broyer de ces petites particules, et aussi d'augmenter le rendement du broyeur.

#### **2. Concassage et stockage :**

Cette étape comprend le concassage du minerai de Fer, qui permet d'obtenir des particules de moyenne taille destinées à être ensuite broyées. Une fois le minerai est concassé ; il est acheminé et stocké en tas sur le sol. L'objectif de cette étape est d'assurer un processus de concassage continu et de réduire au minimum les temps d'arrêt en cas de panne ou de permettre l'entretien préventif du système de concassage sans interrompre l'étape de broyage et les étapes subséquentes. (Figure 15) .



Figure15: Concassage et criblage des minerais de Fer.

#### **3. Alimentation du concasseur (récupération) :**

Le stocke tampon permet d'alimenter le broyeur en continu, ce qui assure des résultats cohérents et la stabilité du processus de récupération du minerai.

#### **4. Broyeur :**

Le broyeur principal broie le minerai avant qu'il ne subisse la séparation gravimétrique par spirale, cette étape exige que la matière reste dans le broyeur pendant une période précise. Lorsque la matière sort du broyeur, le minerai est classifié au moyen

de cyclones ou de cribles vibrants qui séparent les particules fines des grosses particules, les grosses particules sont renvoyées dans le broyeur, et les particules fines subissent le processus de séparation gravimétrique par spirale. (Figure 16)



Figure 16 : Broyeur de minerais de Fer.

### **5. Séparation gravimétrique par spirale :**

La séparation gravimétrique est une concentration en matières solides d'environ 30%, l'eau de procédé est utilisée pour aider au processus de séparation. Les particules plus lourdes sont séparées des particules plus fines au moyen de la force centrifuge, un collecteur situé au bas de chaque spirale, recueille le concentré lourd ( le concentré d'Hématite) et élimine les particules indésirables plus légères (les mixtes et les résidus pauvres). Cette étape est reprise deux ou trois fois, en fonction de la libération désirée et de la concentration en Fer.

### **6. Séparation magnétique :**

Le concentré recueilli des mixtes et des résidus pauvres après la séparation gravimétrique a une concentration en Fer plus basse (Magnétite) ; il doit donc être reconcentré pour obtenir la concentration de 65% en Fer. Des tambours magnétisés recueillent la matière magnétique, pour qu'elle puisse être reconcentrée. Les particules plus légères qui ont été séparées au cours de l'étape de séparation gravimétrique par spirale sont roulées en boulettes et cuites dans un four à induction. Les matières non magnétique rejetées sont acheminées à la zone d'élimination des résidus. (Figure 17)



Figure 17 : Procédé de traitement de minerais de Fer.

## II.Métallurgie :

### I. 1.Définition et trois spécialités :

La métallurgie est la science des matériaux qui étudie les métaux, leurs élaborations et leurs traitements, art d'extraire les métaux de la terre et de les purifier. Celle de Fer, permet d'extraire le Fer métallique des minerais où il se trouve principalement à l'état d'oxyde ferrique  $Fe_2 O_3$  , il faut séparer le Fer de l'Oxygène, cette dissociation est réalisée

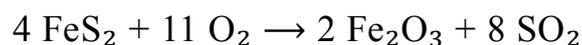
à température élevée par un traitement de réduction par le carbone.

L'industrie de la métallurgie s'est organisée en trois spécialités principales. Chacune demande une spécialisation différente des deux autres. Il y a, d'une part, la métallurgie du fer et, d'autre part, celle des métaux non ferreux, lesquels se divisent en métaux précieux, comme l'or, et non précieux, comme l'aluminium :

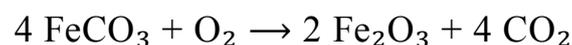
- la production d'acier et des alliages ferreux (sidérurgie) ;
- la production des métaux non ferreux et non précieux ;
- la production des métaux précieux.

### I. 2.Grillage métallurgique :

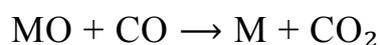
Le grillage est une chauffe en présence d'air à haut température de minerais ou de produits métallurgiques à l'état solide, il permet d'obtenir un oxyde de Fer débarrassé des impuretés qu'on y trouve généralement (soufre, phosphore et eau). La réaction qui se produit pendant le grillage est :



On voit très bien la modification du minerai de Fer pendant le grillage, pour certains minerais, on fait une calcination dont voici la réaction :



Il faut ensuite réduire l'oxyde pour obtenir du Fer métallique selon la réaction générale en métallurgie :

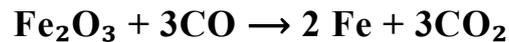


Où MO est l'oxyde métallique, CO le monoxyde de carbone qui sert de réducteur, M le métal réduit donc sous forme métallique utilisable, soit pour le Fer :

L'oxygène oxyde le Carbone (CO), à son tour le monoxyde réduit le minerai selon les réactions suivantes :



Et puis la réaction globale :



Cette réaction se produit vers 1 300°C.

D'autre part dans la colonne de chauffe se produit une oxydation de l'hématite qui donne de la magnétite laquelle sera transformée en scorie et Fer métallique.

Donc, après le grillage et concassage, on peut enrichir le minerai en le triant avec un aimant, la transformation en Fer se fait selon les étapes suivantes :

$\alpha\text{-Fe}_2 \text{O}_3$  à 400°C (Hématite)  $\rightarrow \gamma\text{-Fe}_2 \text{O}_3$  à 450°C (Maghémite aimantée)  $\rightarrow \text{Fe}_3 \text{O}_4$  à 700°C (Magnétite aimantée)  $\rightarrow \text{FeO}$  à 850°C (Wustite)  $\rightarrow \text{Fe}$  à 1200°C-1300°C (Métal Fer).

Pour réussir cette transformation il faut une colonne de four haut fourneau.<sup>[6]</sup>

### **III.Processus de fonctionnement du haut fourneau :**

#### **III. 1.Définition du haut fourneau :**

Un haut fourneau est une installation industrielle destinée à simultanément désoxyder et fondre les métaux contenus dans un minerai, par la combustion d'un combustible solide riche en carbone. En général le haut fourneau est un four qui sert à la transformation du minerai de Fer en fonte liquide, en brûlant du coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur.<sup>[7]</sup>

#### **III.2 Le bas fourneau :**

Le premier outil de réduction de minerai de Fer a été le bas fourneau, c'est un trou dans le sol d'environ 30 cm de diamètre, rempli de charbon de bois et de minerai. Le feu est généralement attisé au moyen d'un soufflet construit comme une outre en cuir. Au bout d'une dizaine d'heures, on démolit le four et récupère une loupe incandescente de la taille du poing, mélange hétérogène de Fer. Bien que la température atteinte entre 700°C et 900°C, y soit suffisante pour la réduction du minerai de Fer, c'est loin de la température de fusion du Fer de

1535°C. Le Fer issu d'une loupe obtenue au bas fourneau, est alors fondu dans des fours hauts fourneaux.<sup>[7]</sup>

### III. 3. Caractéristiques du haut fourneau :

En haut, le gueulard, au niveau duquel est introduite la charge solide (minerai+coke+fondants) mais aussi sortent les fumées produites.

Au milieu, la partie étalage-ventre-cuve qui comprend le gros des transformations physico-chimiques.

En bas, le creuset, qui est la partie séparation où sont recueillis la fonte et le laitier à des niveaux différents.

Le vent est introduit entre l'étalage et le creuset. (Figure 18)

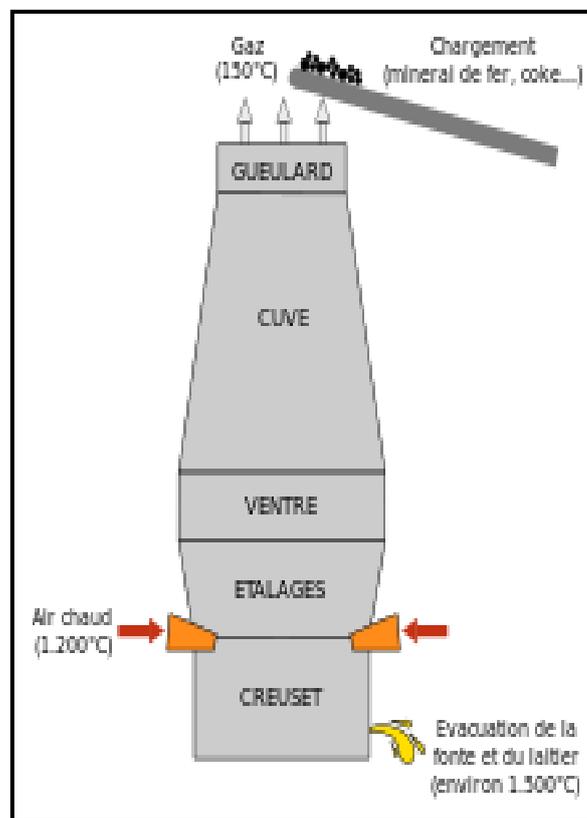


Figure 18 : Haut fourneau.

### III. 4. Le coke :

Le charbon est le facteur le plus important dans la production du coke, de façon simplifiée, le coke est du carbone presque pur, il est utilisé comme un puissant réducteur, et obtenu par pyrolyse de la houille dans un four à l'abri de l'air (fours à coke ou cokerie). Le coke est le plus souvent employé dans les hauts fourneaux, il assure la

stabilité de l'empilement de minerais ferreux, le dégazage permet de réduire sa teneur en soufre, ce qui permet la production des fontes de meilleure qualité.

### III. 5. Le processus de fonctionnement d'un haut fourneau :

#### III. 5. a: Principe générale :

L'appareil d'un haut fourneau est un réacteur chimique, dont le fonctionnement à contre-courant (les gaz montent alors que la matière solide descend) lui assure un excellent rendement thermique. Son principe consiste à créer du monoxyde de carbone dont l'affinité pour l'oxygène du minerai est plus forte que l'affinité entre oxygène et Fer, pour désoxyder le minerai. Plusieurs échanges thermiques et chimiques essentiellement entre gaz et solides dans la cuve, auxquels s'ajoutent des liquides dans les étages et le creuset, interviennent pour réduire et carburer le Fer.

#### III. 5. b : Les réactions dans le haut fourneau :

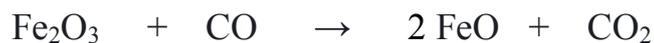
Les réactions sont de type oxydoréduction. Deux sortes de réductions sont mises en jeu : la réduction directe par les solides (le carbone) et la réduction indirecte par les gaz (CO, H<sub>2</sub>). La réaction fondamentale globale tourne autour de la réduction du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

On définit sept zones dans le haut fourneau .<sup>[7]</sup> :

##### -Zone de préchauffage :

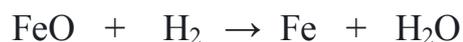
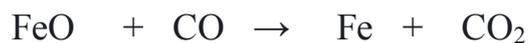
On assiste notamment à :

- L'évaporation de l'eau éventuellement contenue dans la charge solide.
- La calcination des carbonates CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> et des hydroxydes Fe(OH).
- Le début des réactions de réduction des oxydes de fer :



##### -Zone d'égalisation :

- La poursuite de la réduction indirecte des oxydes de fer par le CO :



- La décarbonatation du CaCO<sub>3</sub> continue et s'achève à ces températures plus élevées (décarbonatation plus difficile que pour le Mg)

### -Zone de BOUDOUARD :

Les réactions de réduction indirecte sont toujours présentes mais la réduction directe par le C prendra le pas sur la réduction indirecte car la température devient suffisamment élevée :



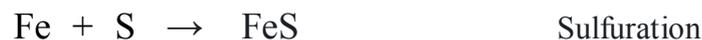
### -Zone de Fusion :

La température est assez élevée et dépasse les points de fusion du laitier et de l'éponge de fer. Deux phases liquides bien distinctes de densité et de composition très différentes apparaissent ainsi.

Les réactions de réduction sont toujours présentes.

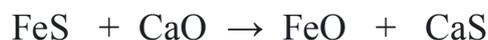
### -Zone de Métallurgique :

Poursuite de certaines réactions comme celles de réduction directe mais d'autres réactions entrent aussi en jeu :

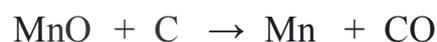
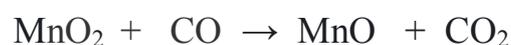


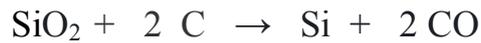
Cette dernière réaction est très gênante puisqu'elle conduit à la formation de sulfure de fer qui est nuisible aux propriétés de l'acier. Une grande partie du soufre est oxydée dans le haut-fourneau et sort avec les fumées sous forme de  $\text{SO}_2$  (d'où l'odeur).

Le sulfure ferreux formé est éliminé de la fonte par l'action de la chaux et du manganèse :



D'autres réactions sont aussi présentes dans cet



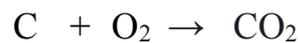


La totalité du phosphore (même si elle est non souhaitable) finit dans la fonte, tandis que le manganèse se répartit moitié-moitié.

La silice est plus difficile à réduire et aura tendance à rester dans le laitier. Les autres oxydes accompagnant le minerai nécessitent des températures dépassant 2200°C pour être réduits (CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .....)

#### -Zone de Combustion :

L'oxygène de l'air brûle le carbone et la température augmente jusqu'à des valeurs supérieures à 2200°C. On peut assister aux réactions suivantes :



#### -Zone du creuset :

On assiste toujours dans le creuset à un ensemble de réactions, mais son rôle principal reste le rôle de décanteur du fait que le laitier et la fonte apparaissent sous forme de deux phases liquides distinctes. Le laitier est au dessus car il a une densité 2 à 3 fois plus faible que celle de la fonte.<sup>[7]</sup>

#### III. 5. c :La production de la fonte :

La production de la fonte comme sa conversion en Fer, est faite dans un haut fourneau, sa température de fusion est comprise entre 1135°C et 1350°C en fonction de la Qualité de carbone. Un haut fourneau consommant pour chaque tonne de fonte, 294Kg de coke et 180 Kg de charbon aux tuyères, on a :

- 100% du charbon et 44% du coke est brûlé aux tuyères.
- 36% du coke est consommé pour la régénération du CO.
- 18% du coke se dissout dans le métal et carbure ainsi la fonte.
- 2% sert à la réduction des oxydes non ferreux et à la désulfuration.



Figure 19 :La production de la fonte et laitier

Une grande partie de la fonte provient du haut fourneau, dans cet installation on introduit un mélange de minerai de Fer et de coke. Le minerai fond sous l'effet de la combustion du coke, cette combustion est arrivée par l'injection d'air très chaud (c'est l'air réchauffé par les gaz récupérés par la combustion du coke dans le haut fourneau). Cet air est envoyé sous pression, il se produit alors une réaction chimique des atomes de Fer s'unissent à des atomes de carbone, et donnent alors un nouveau produit qui est la fonte. (Figure 19)

Après le remplissage du haut fourneau, la transformation dure environ 6 heures, une fois la fonte obtenue, on vide le haut fourneau par le bas, c'est la coulée, une partie de la fonte est envoyée vers les ateliers de moulage pour fabriquer les objets en fonte, une autre partie part pour l'aciérie.<sup>[7]</sup>

### III. 5. d :Obtention du laitier :

Le laitier correspond à la gangue du minerai à laquelle s'ajoutent les cendres du coke, sa composition est étudiée pour assurer une vidange facile du creuset, mais aussi désulfurer la fonte. Il peut être transformé sur place en vue d'autres utilisations comme la fabrication du ciment, remblais routier, granulats de béton.<sup>[8]</sup>

### III. 5.e:Production des gaz réducteurs :

Pour réduire le minerai de Fer, il faut fabriquer les gaz réducteurs nécessaires. Ceci se produit dans la partie inférieure du haut fourneau par la combustion du carbone du coke avec l'oxygène du vent :



Cette réaction étant très exothermique, la température au niveau des tuyères d'injection du vent chaud s'élève à 1800°C à 2000°C. Voire 2250°C si le vent est enrichi

en oxygène. Toute fois une réaction endothermique suit immédiatement, qui abaisse la température entre 1600°C et 1800°C :



(équilibre de boudouard)

Le CO<sub>2</sub> se maintient dans le domaine de température supérieures à 1000°C, il est transformé par la réaction de boudouard en CO, qui reste ainsi à la disposition du processus de réduction.

Un autre gaz réducteur, le dihydrogène H<sub>2</sub> est produit par la décomposition thermique de la vapeur d'eau, naturellement présente dans le vent :



Très endothermique .<sup>[8]</sup>

### III.6.Le convertisseur :

#### III. 6 .a: Définition :

Le convertisseur est un four servant de réacteur chimique pour une opération d'affinage des métaux en fusion. Est un appareil où l'on transforme et affiner la fonte en acier.<sup>[11]</sup>

#### III. 6 .b: Le convertisseur à oxygène :

Cet outil assure la conversion de la fonte en acier, la fonte en fusion est versée sur un lit de ferrailles, on brûle les éléments indésirables (carbone et résidus) contenue dans la fonte en insufflant de l'oxygène pur. Au moment de la vidange du convertisseur, on est séparé le résidu (le laitier d'aciérie) devient l'acier, ce dernier était liquide, est versé dans une poche, il est appelé acier sauvage, car s'il était coulé, il se solidifierait en provoque de nombreuses projections dues au rejet des gaz dissous (essentiellement du CO).

(Figure 20).

Soit seulement à la surface du bain à l'aide de lances verticales comme dans les procédés LD : (Linz-Donawitz) appelé aussi procédé BOF (Basic Oxygène Furnace) où l'oxygène est insufflé par lance dans un four rotatif incliné contenant la fonte et où le monoxyde de carbone CO est directement brûlé en donnant CO<sub>2</sub> .

OLP (Oxygène-Lance-Poudre) où l'on injecte de la poudre de chaux en suspension dans le jet d'oxygène pour faciliter la déphosphoration .<sup>[12]</sup> :

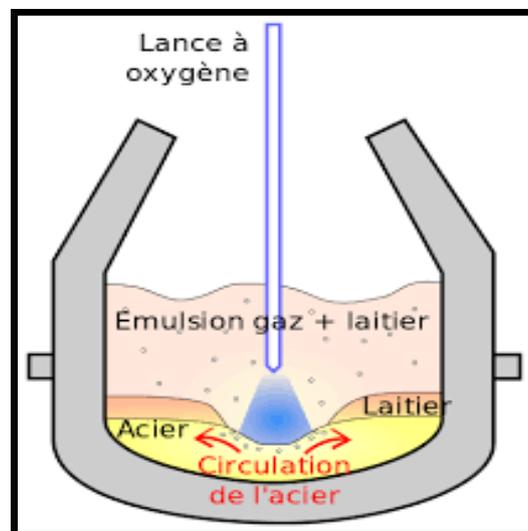
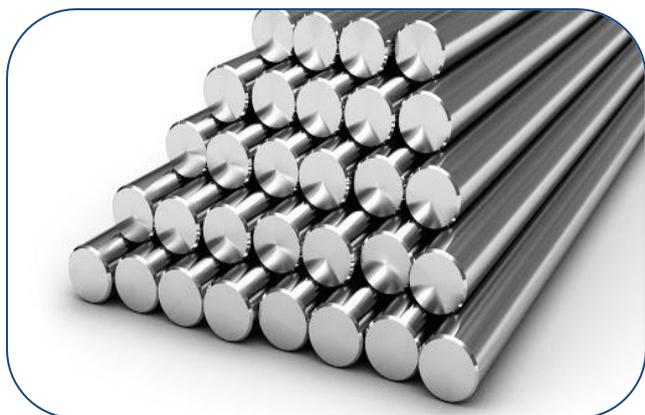


Figure 20 : procédé du convertisseur à oxygène.

## Chapitre 4 :

### *La fabrication d'acier*



## I.L'aciérie :

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

Il ya deux types d'acier :

- Aciers au carbone et faiblement alliés :

Teneur massive en carbone  $C \leq 2\%$  et sont par ailleurs historiquement les plus anciens. Les différentes microstructures que l'on peut rencontrer dans les conditions d'équilibre sur les aciers non alliés à la température ambiante. Les différentes catégories d'aciers fer – carbone .

- (1) austénite ;
- (2) ferrite
- (3) austénite + ferrite
- (4) austénite + cémentite;
- (5) ferrite + perlite
- (6) cémentite + perlite

Tout acier de teneur  $C \leq 0,05\%$  est appelé acier doux .

- Aciers fortement alliés :

Les aciers fortement alliés, en acier spéciaux, sont des aciers dans les quels le carbone cesse d'être l'élément principal d'addition, ou du moins se trouve à des teneurs inférieures à celles des éléments métalliques. On distingue deux grandes familles :

- les aciers inoxydables et réfractaires, à forte teneur en Chrome et Nickel.
- Les aciers à outils et à coupe rapide sont destinés à l'usinage et à la mise en forme à forte teneur en Tungstène, Molybdène, Chrome et Vanadium.

Les teneurs en carbone sont :

- Soit très faibles ( $C < 0,01\%$ )
- Soit très élevées (jusqu'à 2% suivant les objets visés .<sup>[12]</sup>)

Une aciérie est une usine servant à produire de l'acier en grandes quantités, sous la forme de produits semi-finis. On distingue généralement deux types d'aciéries : les aciéries électriques qui produisent de l'acier à partir de ferrailles recyclées, et les aciéries à oxygène qui travaillent à partir de fonte liquide produite par un haut fourneau. (Figure 21-22)

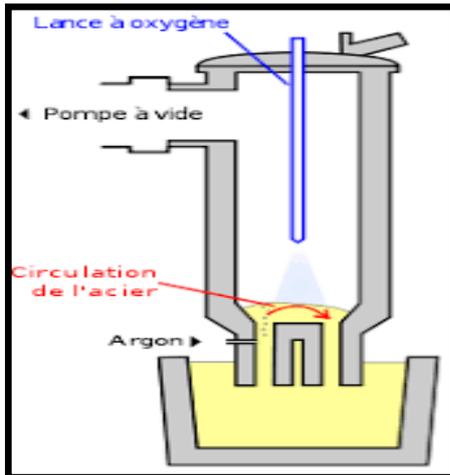


Figure 21 : Procédé d'aciérie à oxygène.

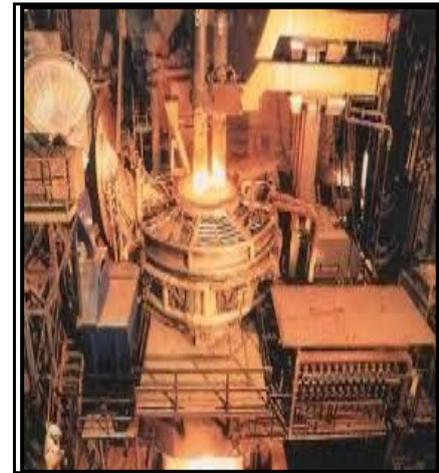


Figure 22 : Image d'une aciérie électrique.

Dans le cas d'une élaboration de l'acier à partir de la fonte liquide, à l'aide d'une aciérie à oxygène, on a généralement les outils :

- La désulfuration : Enlever le soufre de la fonte issue du haut fourneau.
- Les poches à fonte : Enfournement dans le convertisseur.
- Les augets : Enfournement des ferrailles dans le convertisseur.
- Les convertisseurs à oxygène : Transformation de la fonte en acier.
- Les poches acier : Le contenant de l'acier pour la métallurgie en poche et la coulée en coulée continue.
- La métallurgie en poche : Mise à nuance l'affinage de l'acier.
- La coulée continue : Solidification du métal par refroidissement à eau. Certains alliages étant incompatibles avec la solidification par coulée continue, on pratique alors la coulée en lingots.

Les principaux produits utilisés par cette aciérie sont :

- La fonte et l'oxygène.
- Les ferrailles.
- La chaux.
- Les éléments d'alliages.
- Les matériaux réfractaires

## II. La coulée d'acier :

L'acier est coulé et solidifié par deux procédés :

La coulée continue : Est un procédé de solidification du métal en fusion, l'acier liquide est coulé à environ 1560°C dans une lingotière en cuivre de section carrée rectangulaire

ou ronde (selon le demi-produit fabriqué). (Figure 23)



Figure 23: Images sur des lingotières de coulée types "brame et billeterie".

La poche acier est posée sur un pivoteur, qui possède deux bras, pour accueillir deux poches, et de ce fait couler en continu. Le métal s'écoule via le canal de coulée dans un distributeur qui va le répartir sur deux lignes de coulée. En sortie du distributeur, le métal arrive dans la lingotière qui va lui donner sa forme finale (brame, bloom, billeterie,...), par refroidissement à l'eau.

En fin de ligne la brame est coupée à la longueur souhaitée par oxycoupage, pour ensuite passer au laminage. (Figure 24).

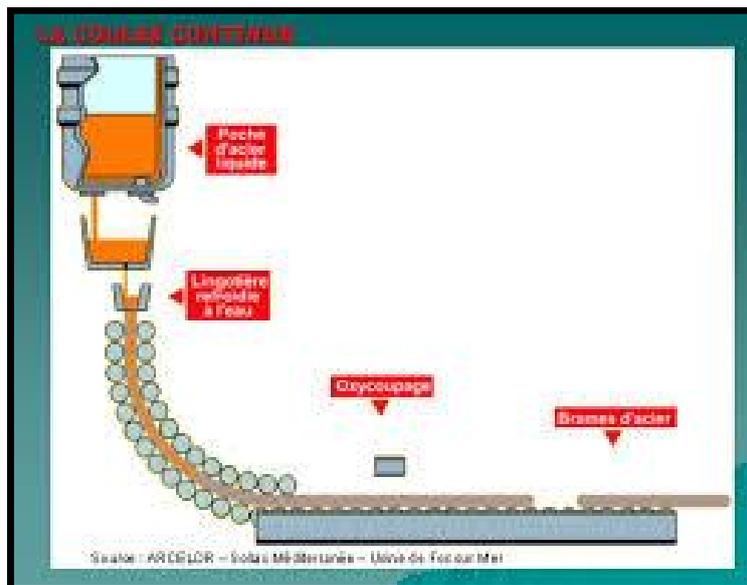


Figure 24 : Le procédé d'une coulée continue.

- La coulée en lingots : La coulée en lingot est l'ancêtre de la coulée continue, ce procédé peut être également fait en lingotière et permet l'obtention d'alliages spécifiques (aciers non calmés).

Une fois la solidification terminée, les lingots sont démoulés, après un réchauffage à 1200°C, ils sont écrasés dans un gros laminoir pour être transformés en brames ou en blooms. (Figure 25).<sup>[9]</sup>

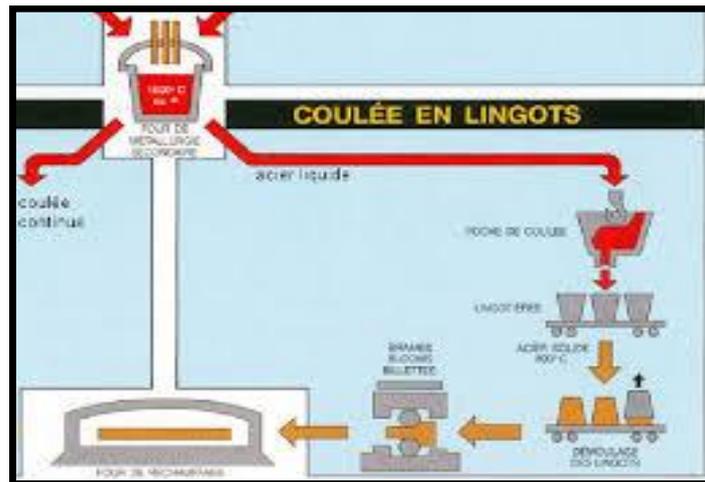


Figure 25 : Le procédé général de la coulée d'acier.

### III. Le laminage d'acier :

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres contrarotatifs (tournant en sens inverse l'un de l'autre) appelés laminoir. (Figure 26)

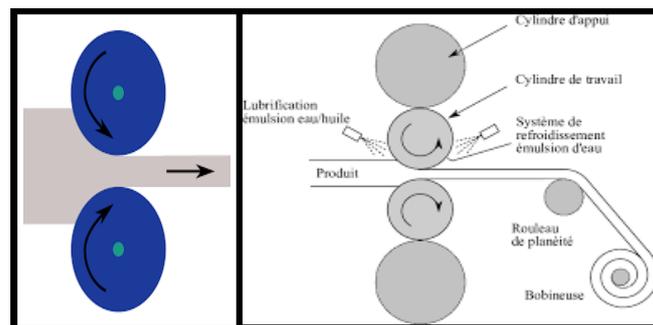


Figure 26 : Schéma simplifié du procédé de laminage.

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). Il permet également la production de barres profilées (produits longs). Il existe différents types de laminoirs :

- laminoir à produits plats
  - laminoirs industriels pour les métaux
  - laminoir à papier
  - laminoir à verre afin de produire les verres imprimés colorés ou non utilisés dans l'aménagement intérieur, les vitrages occultants et la décoration .
- laminoir à produits longs
  - laminoirs universels (métaux)

- laminoirs en cannelures (métaux)
- laminoirs à fils
  - fils industriels (cuivre par exemple)
  - laminoirs de bijoutiers
- laminoirs à rouleaux coniques : pour le formage des roues pour le chemin de fer
- laminoir à pâtes alimentaires : pour toutes les nouilles plates y compris les lasagnes
- laminoir de boulangerie/pâtisserie : pour les pâtes à tartes .<sup>[11]</sup>

### III. 1. Le laminage à chaud :

Le laminage à chaud est un type de déformation à chaud, le processus permet d'attribuer aux pièces métalliques issues de la coulée, une forme géométrique déterminée (longue, large ou épaisse).

Il permet de produire toutes les grandes familles de produits comme les plaques, les bobines, les ronds, les fils, les poutrelles, etc. On distinguera quatre étapes successives : le réchauffage, le dégrossissage, les finisseurs et le refroidissement avant les opérations de finissage.

Les fours de réchauffage sont que l'on utilise pour exposer le métal à un niveau de température le rendant flexible. Le laminoir dégrossisseur permet en partant de la brame, de former l'ébauche de dimensionnement voulue aussi bien en largeur qu'en épaisseur. Les finisseurs sont des trains de laminoirs permettant la prise en charge simultanée du matériau dans plusieurs cages en cascades. Durant l'étape de refroidissement, la bande ainsi obtenue est trempée dans de l'eau pour descendre à une température permettant son bobinage. (Figure 27) .<sup>[11]</sup>



Figure 27 : Le laminage à chaud.

### III. 2. Le laminage à froid :

L'acier laminé à froid est principalement un acier laminé à chaud qui a subi d'autres traitements. Une fois que l'acier laminé à chaud a refroidi, il est ensuite re-laminé à

température ambiante pour atteindre les dimensions exactes et une meilleure qualité de surface.

Ce processus permet la transformation d'un produit métallique laminé à chaud en une bobine d'acier mince et aplatie, il peut être réalisé avec un laminoir réversible dont lequel, la bande est traitée plusieurs fois dans une même cage. Ou bien par un tandem qui traverse plusieurs cages simultanément. (Figure 28).<sup>[11]</sup>

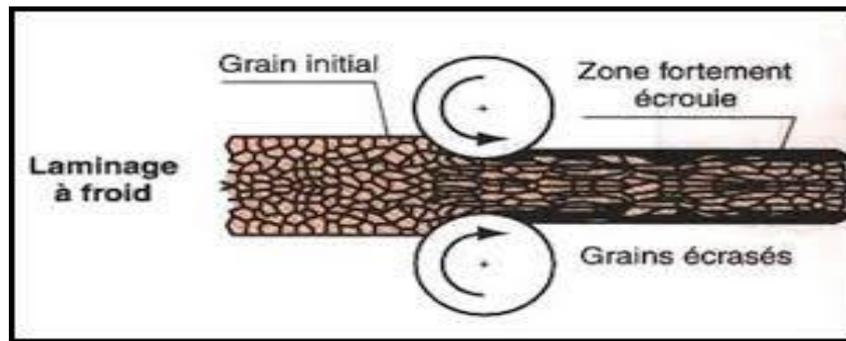


Figure 28 : Le laminage à froid.

#### IV. Le principe de fabrication d'acier :

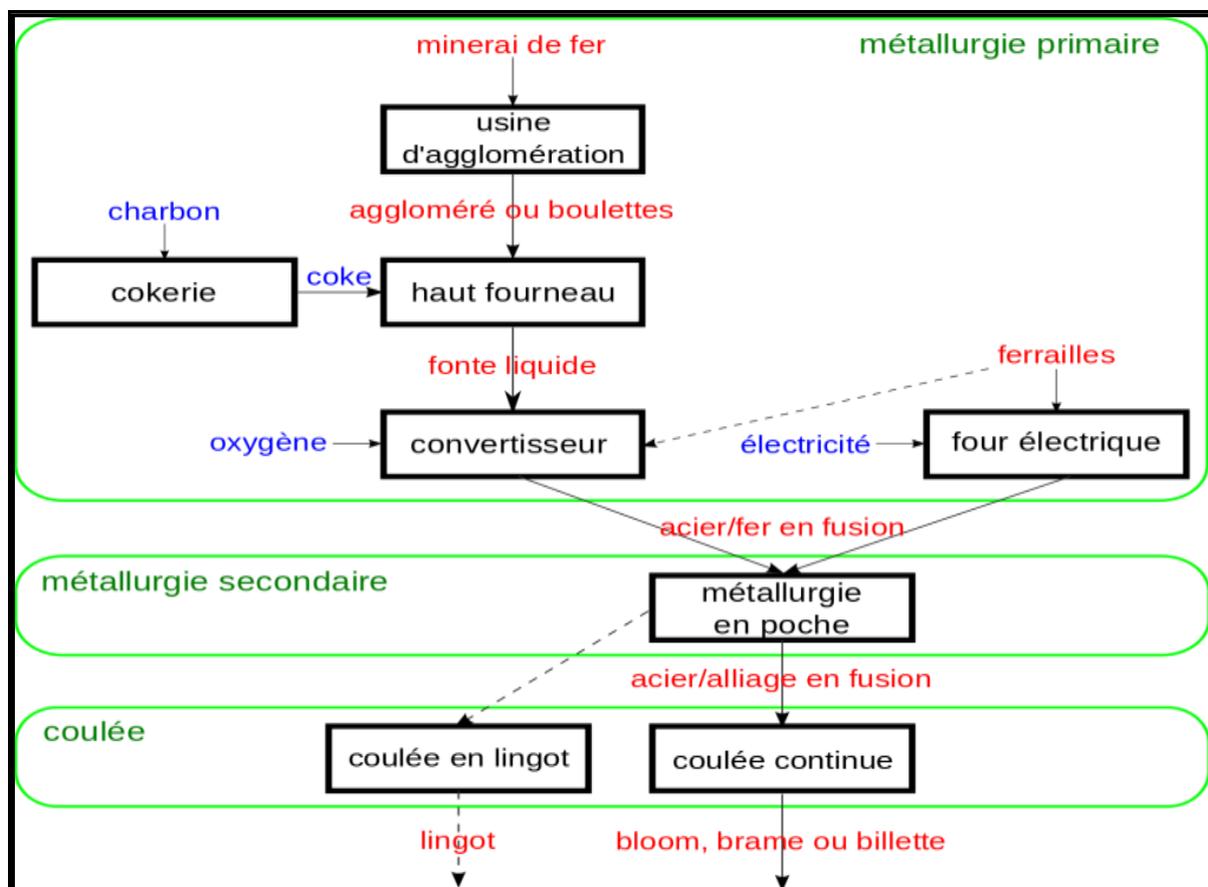


Figure 29: schéma simplifié de la fabrication d'acier.

Pour fabriquer de l'acier, il faut du minerai de Fer, du charbon, de la chaux et des ferro-alliages (Al, Cr, Mn, Si, Ti, V...), ces derniers confèrent à l'acier des caractéristiques particulières adaptées à ses divers usages (architecture, ameublement, machines-outils, conditionnements alimentaires...). La fabrication nécessite aussi beaucoup d'eau pour le refroidissement des installations, la température de fusion dépassant 1500°C.

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir de minerai de Fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.
- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération, on parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique.

Le processus de fabrication de l'acier peut être décomposé en cinq étapes nécessaires (Figure 29) :

**a. La formation de la fonte :**

Le minerai de Fer et le coke sont introduits dans le haut fourneau, la chaleur provoquant la combustion du coke et l'élimination des éléments chimiques contaminants. Le Fer se charge ensuite de carbone au cours de sa descente et se transforme en fonte, qu'il faut alors séparer d'un mélange de déchets appelé laitier.

**b. La conversion de la fonte en acier :**

La fonte en fusion est ensuite versée sur de la ferraille dans un convertisseur à oxygène pour éliminer le carbone sous forme de CO<sub>2</sub>.

**c. L'affinage :**

L'acier obtenu est affiné en ajoutant des éléments (Ni, Cr...), pour former différents alliages et modifier les propriétés mécaniques de l'acier.

**d. La coulée :**

L'acier est refroidi progressivement jusqu'à solidification qui se fait ensuite par la coulée continue, à l'issue de laquelle on obtient des pré-produits (brame, bloom, billeterie...).

**e. Le laminage (à chaud et à froid) :**

L'acier est à nouveau monté à température pour le rendre malléable, il est ensuite aplati dans des laminoirs et la forme voulue lui est donnée.

# CONCLUSION

Mondialement , l'industrie du fer et d'acier a connu un développement très considérable , puisque le fer est l'élément le plus abondant sur la planète et aussi dans la croûte terrestre qui reste la première ressource ( 60% ) suivie des ferrailles (40% ) à la production mondiale d'acier, et joue un rôle essentiel dans les économies modernes en raison de ses propriétés et ses utilisations importantes pour la construction automobile , les infrastructures ferroviaires et routière , et d'autres utilisations .

Le fer demande pour être réduit à l'état de métal une quantité d'énergie, qui se situe dans une gamme médiane par rapport aux autres métaux, ses propriétés physiques et mécaniques sont très étendues, ce qui explique ses volumes de production. C'est une des raisons pour lesquelles l'acier est bon marché.

L'acier est aussi un matériau facilement recyclable et résistance au poids et aux températures, collecté avec un taux très élevé, ce qui en fait le matériau le plus recyclé du monde, il est en outre recyclable indéfiniment. L'utilisation de ferrailles permet de réduire les besoins en énergie pour produire cet alliage.

## Références Bibliographiques :

[1] Nicole CHÉZEAU, « APPARITION DE L'INDUSTRIE DU FER », Encyclopaedia Universalis [en ligne].fr/

[2] Bureau international du travail (BIT), 1992 : Evolution récente dans l'industrie du Fer et de l'acier.

[3] Dossier sur le Fer : Le Fer tombe le masque, Futura-Sciences.

[4] Les fontes, Techniques de l'ingénieur-TBA 1064, 1<sup>er</sup> décembre 2004.

[5] Dossier - Futura-Sciences Minerais de fer et métallurgie du fer

[6] Techno-science.net : Fer

[7] Pyrométallurgie de fer : résumé de cour procédé de chimie industrielle .

[8] Jean le coze, « Histoire de fontes entre le phlogistique et la plombagine : où situer la fonte à oxygène », comptes rendus de chimie, Vol, Juin-Juillet 2008.

[9] Jean-Pierre Birat, « Coulée de bandes d'acier », Techniques de l'ingénieur, n° 2507, 10 mars 2000.

[10] Ferial Belcadhi, « Tout savoir sur le laminoir industriel », sur l'usine nouvelle, 18 avril 2016.

[11] Futura-Science.com/Laminage d'acier .

[12] Cour de chimie industrielle S6 .