

I. INTRODUCTION

I.1. Élaboration des métaux ferreux (Fontes et aciers)

Parmi les éléments chimiques connus 70 sont des métaux. Les métaux n'existent pas à l'état pur dans la nature, mais sous forme de combinaisons chimiques, uniquement dans certains cas le cuivre, l'argent et For se trouvent à l'état pur c'est à dire à l'état métallique.

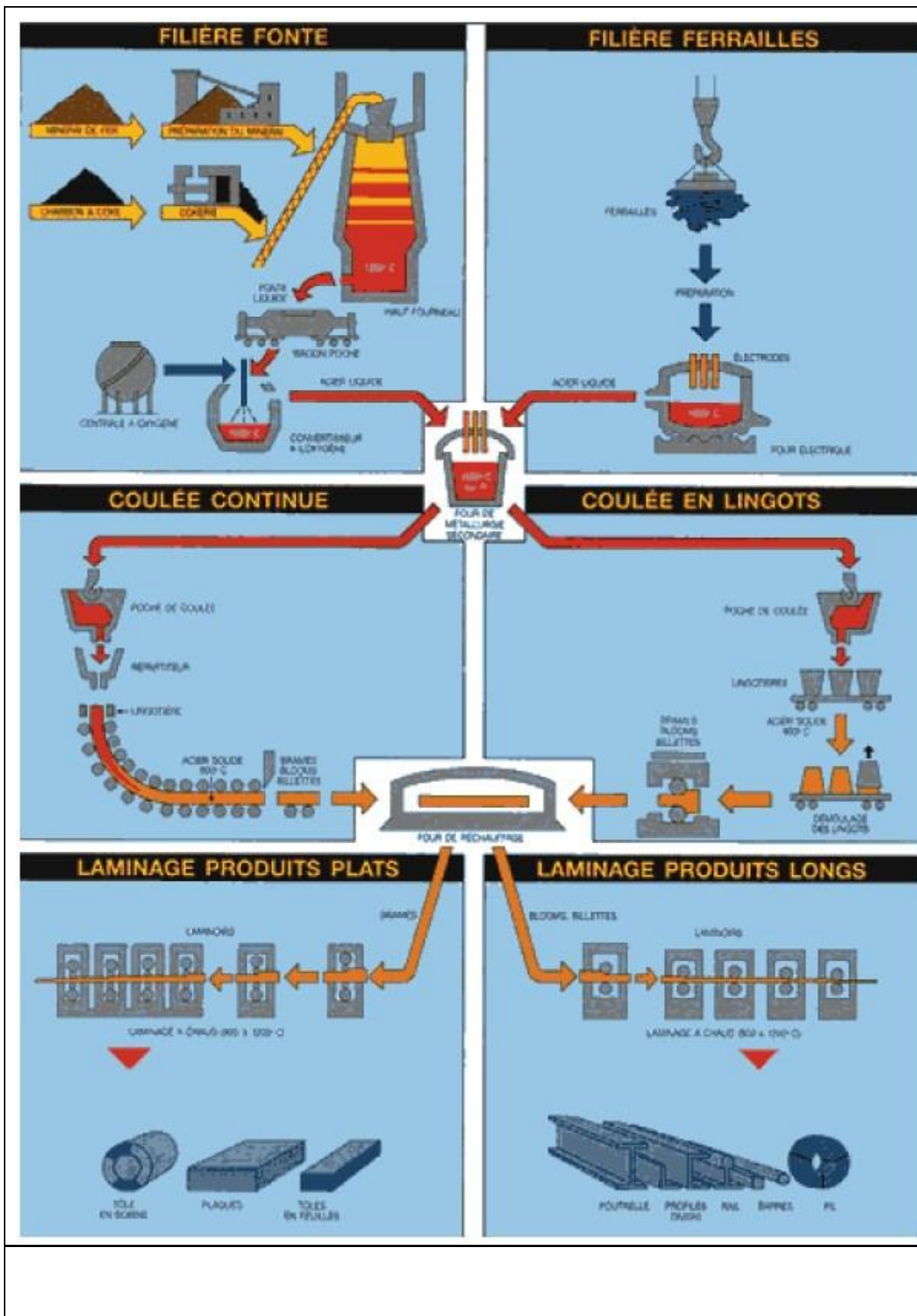
Les $\frac{3}{4}$ de la croûte terrestre (1 km de profondeur) sont constitués par l'oxygène (46,6%) et le silicium (27,7%) le reste par l'aluminium (8%), le fer (5%), Na (2,8%), Mg (2,1%), Cu (0,01%). Le reste est constitué par les autres éléments dont la part est insignifiante par exemple l'or ($5.10^{-5}\%$), Ag($1.10^{-5}\%$).

Les éléments ne sont pas répartis d'une façon homogène dans les différentes régions. On peut rencontrer différentes compositions chimiques et différentes concentrations des éléments d'une région à une autre.

Donc les métaux sont rencontrés sous formes de minerais qui sont des minéraux ou mélange de minéraux à partir desquels on peut extraire un ou plusieurs métaux par les différents procédés métallurgiques.

Les minerais sont exploités de leurs gisements par exploitation à ciel ouvert ou souterraine et avant d'être acheminés vers les usines métallurgiques subissent des opérations de préparation tels que le concassage, broyage, tamisage, enrichissement etc.. Selon l'énergie et l'agent réducteur employés pour extraire le métal de ses minerais (élaboration du métal), on distingue :

- Procédé métallurgique par voie ignée (thermique) fusion et réduction du minerais, l'agent réducteur le plus employé est le carbone (C) ou le CO.
- Procédé par électrolyse en fusion.



Dans la plupart des pays industriels, le métal le plus utilisé est le fer et ses alliages (fonte et acier), car son importance technique est justifiée par les statistiques de la production.

I. ELABORATION DE LA FONTE

L'agrégat principal utilisé pour l'élaboration de la fonte est le haut fourneau, dans lequel se déroule le processus métallurgique de réduction, fusion, ainsi que la carburation du fer.

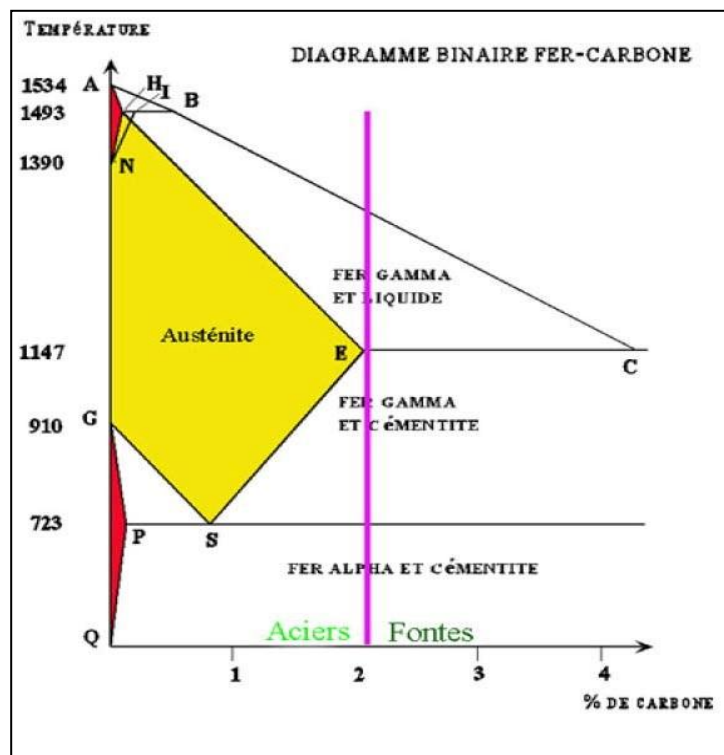
Le but principal du haut fourneau est d'**extraire le métal (fer)** de son minerai et sa séparation de la gangue.

Les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte sont :

- Le minerai de fer
- Le coke.
- Les fondants (addition)

Le produit principal du haut fourneau est la fonte appelée aussi fonte de première fusion. Elle est obtenue à l'état liquide à une température près de **1400°C** et avec **une teneur en carbone de 3,5 à 4,5%** et de teneur variable en Si, Mn, P, S. Elle peut aussi renfermer d'autres éléments tels que Ti, Cr, etc..

La fonte est définie comme un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2 % (voir diagramme Fer-Carbone). Le produit secondaire obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier (scorie) dont les principaux composants sont CaO, SiO₂, Al₂O₃ et MgO



I.1. Matières premières

Comme il a été mentionné que les matières premières destinées pour l'élaboration de le fonte sont :

- Le minerai de Fer.
- Le coke.
- Et les fondants.

I.1.1. Le minerai de fer

Ce sont des roches contenant le fer en quantité importante et économiquement peuvent être traités en procédé métallurgique.

Selon la forme de combinaisons chimique on distingue plusieurs types de minerais de fer :

- la magnétite (Fe_3O_4), sa couleur varie du gris foncé au noir.
- l'hématite rouge (Fe_2O_3), sa couleur varie du rouge foncé au gris foncé.
- l'hématite brune ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sa couleur varie du noir au jaune.
- fer spathique ou sidérose (FeCO_3), sa couleur varie du jaune pale au gris.

Le tableau ci-dessous nous donne un aperçu sur la composition chimique des différents minerais.

Type	Composition chimique								
	Fe	Mn	P	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	CO_2	humide
Magnétite Fe_3O_4	50-70	0.04-0.2	0.02-3	0.1-7	0.3-1.2	1.0-6	0.5-1.5	-	1
Hématite rouge Fe_2O_3	40-70	0.1-1.0	0.1-0.8	5-18	1-6	0.5-5	0.2-1.0	0-8	1-10
Hématite basse $\text{FeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	25-58	0.5-5.0	0.1-1.0	5-15	1-10	1-25	0.2-2	8-30	5-15
Fer spathique ou sidérose FeCO_3	30-40	1-7	0.02	7-10	0.1-3	0.5-3	0.5-3.5	20-30	0.5-2

Certains éléments additifs du minerai de fer sont indésirables et d'autres sont utiles. Les éléments nocifs sont le soufre, phosphore, arsenic, plomb, zinc, cuivre, le reste tels que Mn, Cr, Ni, Al, Na, MO sont utiles.

I.1.2. Le minerai de manganèse

Les minerais de fer sont souvent très pauvres en manganèse, qui est un des éléments améliorant les propriétés de fonte. Il est essentiellement utilisé pour l'élaboration des fontes riches en manganèse tels

que les ferro-manganèse et fonte spiegel. Le plus souvent on utilise les oxydes tels que MnO_2 et Mn_2O_3 dont la teneur en manganèse peut atteindre 50.

I.1.3. Les fondants

Les fondants sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte.

Comme fondants on utilise le plus souvent le calcaire CaCO_3 et très rarement la dolomite $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$

I.1.4. Le coke

Généralement plus de 90% des fontes sont produites avec du coke. Le coke est obtenu par cokéfaction de la houille. Selon les variétés de la houille utilisée le coke est constitué de:

78 -83% carbone

8 + 11% sandre

2 + 6% H_2O

0,8- 1,2% Soufre

2 - 3% éléments volatils Le rôle du coke dans le haut fourneau est :

- Fournir la chaleur nécessaire pour la marche du processus du haut fourneau.
- Réduction du fer et des alio-éléments de leurs liaisons dans le minerai et en même temps carburation du fer.
- Ameublir la charge dans le haut fourneau afin d'avoir une bonne perméabilité aux gaz, grâce à sa grande résistance à l'écrasement.

I.2. Le haut-fourneau

- Le haut-fourneau est un four à forme circulaire figure 42 et 43 destiné à l'élaboration de la fonte. Son espace de travail se compose du bas vers le haut des parties suivantes :
- Le creuset : partie cylindrique, dont la partie supérieure est appelée ouvrage et porte les tuyaux qui amènent l'air chaud. La partie inférieure porte deux trous, l'un pour la coulée de la fonte et l'autre pour la scorie (laitier).
- L'étagère : tronc de cône évasé vers le haut
- 3- Le ventre : partie cylindrique.
- 4- La cuve : tronc de cône évasé vers le bas.
- 5- Le gueulard : ouverture par laquelle on introduit la charge et d'où s'échappent les gaz.
- 6- Blindage métallique ayant même profil que le haut-fourneau.
- 7- 8 éléments de refroidissement du blindage métallique.
- 9-fondation.
- 10- minerais de fer + fonte.

11- coke.

12- évacuation des gaz.

13- tuyère

La composition d'une charge à introduire dans le haut-fourneau pour l'élaboration d'une tonne de fonte ainsi que les produits obtenus.

a) Charge introduite

minerais de fer et addition	2160 kg/t de fonte
fondant (calcaire)	470 kg/t de fonte
coke	960 kg/t de fonte
rend chaud (humide)	3 125 kg/t de fonte

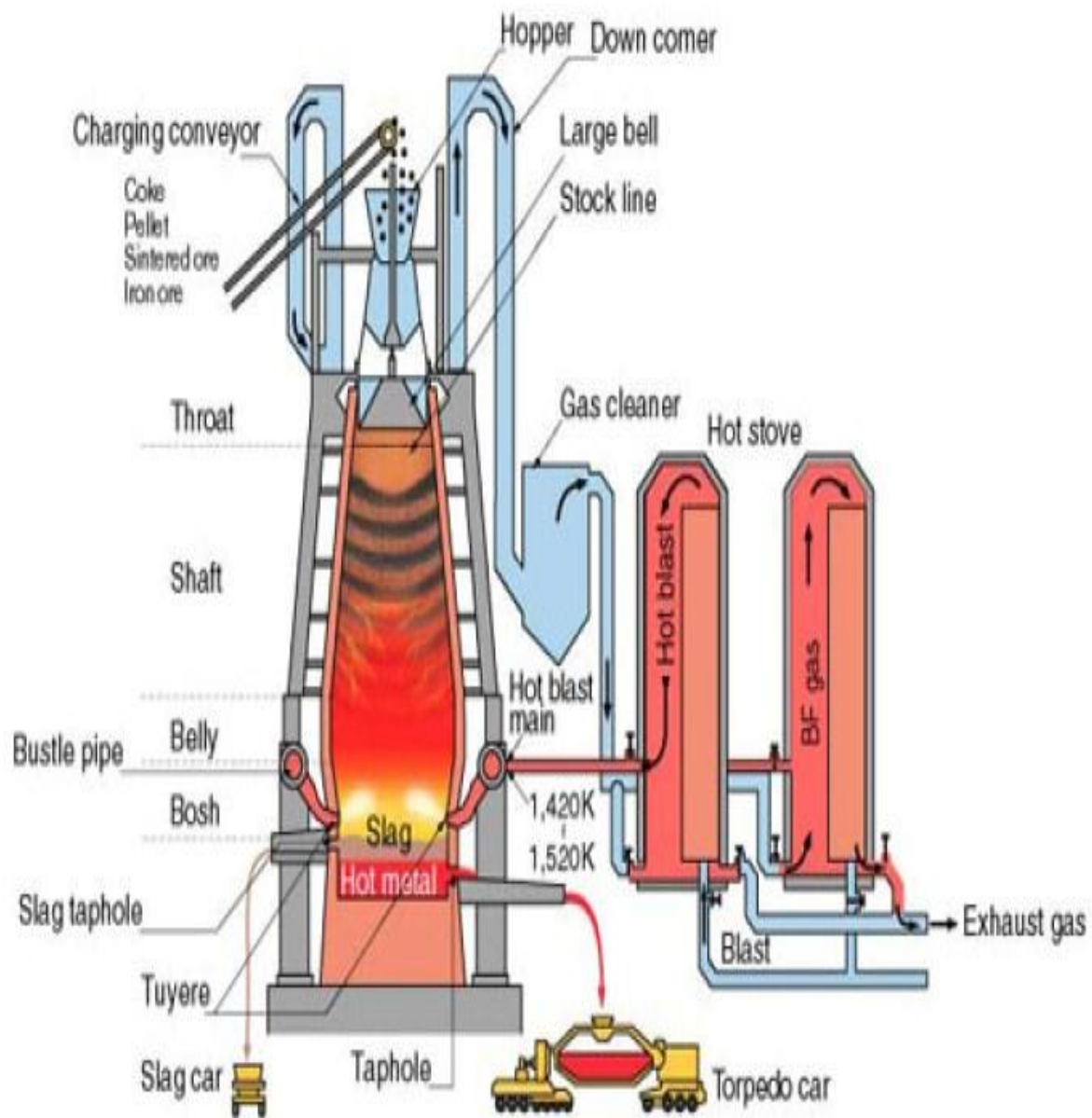
Total =	6715 kg/t de fonte
---------	--------------------

b) Produits obtenus

Fonte	1000 kg
Laitier	905 kg/t de fonte
Poussière de gaz	130 kg/t de fonte
Gaz de Gueulard (humide)	4680 kg/t de fonte

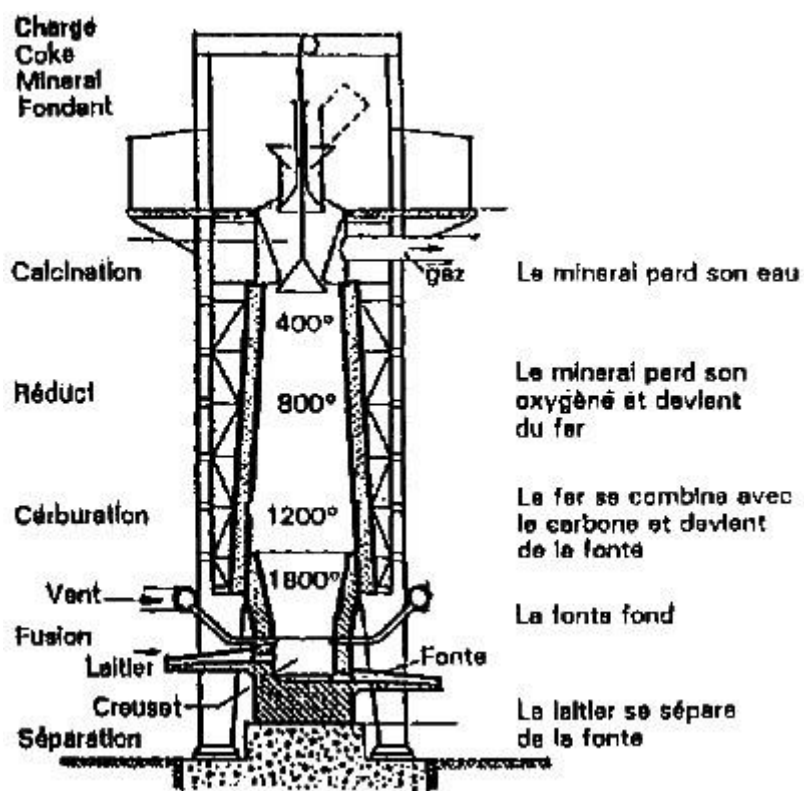
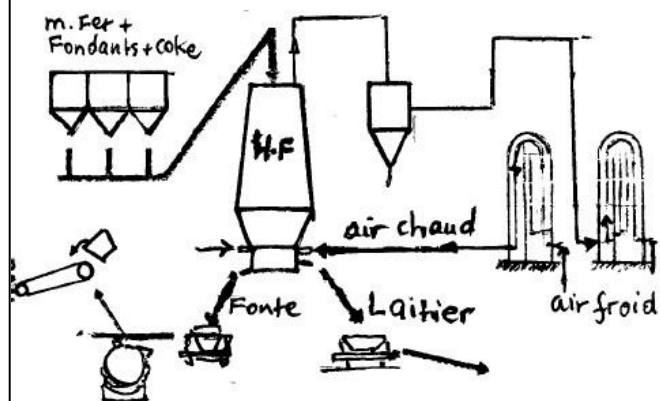
Total	6715 kg
-------	---------

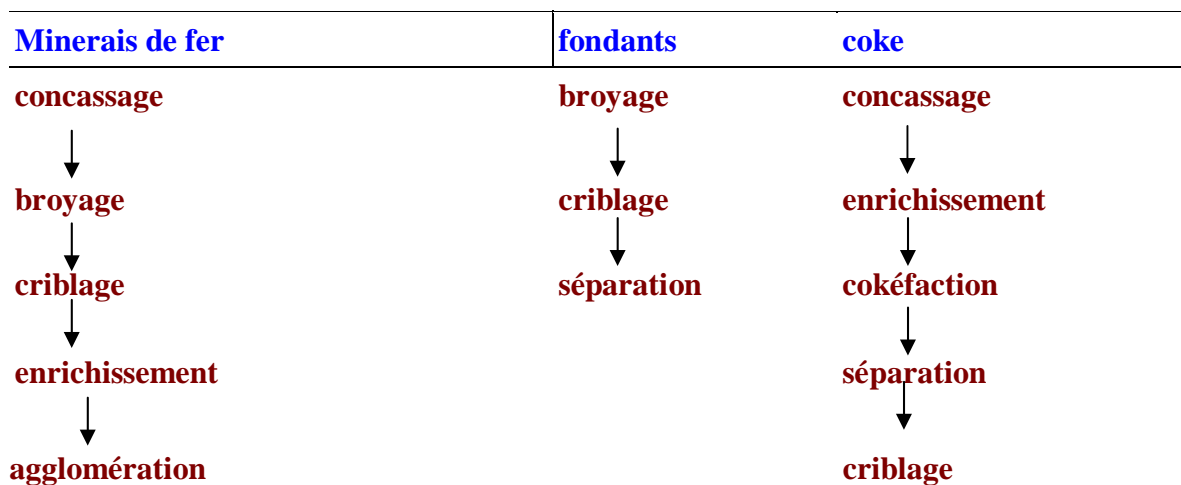
Blast Furnace (BF) Facilities



I.3. Flux des matières dans une usine métallurgique

La charge avant d'être introduite dans le haut-fourneau subit une préparation au préalable comme il est indiqué sur la figure suivante.





C'est par le gueulard que la charge est introduite à l'aide d'un skip (monte charge). Les proportions du minerai de fer, fondants et du coke sont définies au préalable suivant le type de fonte à élaborer. Le minerai de fer et les fondants sont introduits de telle façon à former des couches qui seront séparées par des couches de coke. Il s'établit un courant descendant des matières d'abord solides, puis pâteuses et enfin liquide qui traversent le haut fourneau en quelques heures (la durée dépend du volume et de la hauteur du haut-fourneau).

L'air chaud provenant des cowpers (régénérateurs de chaleur chauffés par le gaz de gueulard) est soufflé par les tuyères, ainsi l'oxygène contenu dans l'air chaud participe à la combustion du coke en le transformant en oxyde de carbone CO, il en résulte un courant gazeux ascendant qui traverse aussi le haut-fourneau en quelques heures.

Le courant gazeux possède deux fonctions :

- Transmettre la chaleur obtenue près des tuyères (1800°C) à la charge. Donc la charge descendante se chauffe jusqu'à une température de 1500°C à son arrivée au creuset.
- La deuxième fonction est la réduction des différents oxydes.

La réaction fondamentale de réduction lors du processus métallurgique dans le haut-fourneau est la réduction du fer. L'agent réducteur est le carbone et son oxyde (CO), mais le carbone est plus énergétique que le Co. Donc leur rôle est d'éliminer l'oxygène des différents oxydes.

La réduction dépend essentiellement de l'affinité chimique de l'élément à réduire par rapport à l'oxygène. Plus l'affinité chimique (solidité chimique) de l'élément avec O₂ est plus grande, plus il est difficile à le réduire des ces oxydes.

Il existe deux types de réduction :

- La réduction directe, celle qui se passe avec le carbone pour former CO.
- La réduction indirecte avec CO et H₂ pour former CO₂ et H₂O vapeur

Près du gueulard et à une température avoisinant 200°C, la charge subit un séchage dont l'humidité contenue est évacuée sous forme de vapeur avec le gaz de gueulard.

À la partie supérieure de la cuve et entre 200°C et 400°C il y a décomposition des hydrates et entre 400°C et 800°C c'est la décomposition des carbures.

Les processus ci-dessus énumérés portent le nom de travail de la cuve, toutes ces réactions sont endothermiques.

Entre 800 et 1000°C on arrive au processus de réduction indirecte les éléments principaux tels que le fer et le manganèse (par rapport au fer le manganèse est difficile à réduire). Jusqu'au domaine de la réduction indirecte toute la charge se trouve à l'état solide.

À des températures supérieures à 1000°C et près du ventre et des étalages du haut fourneau se passe la réduction directe et commence la fusion de la charge.

Dans le domaine de la réduction directe le carbone du coke est très actif à ce que toutes les réactions de réduction se passent sans CO.

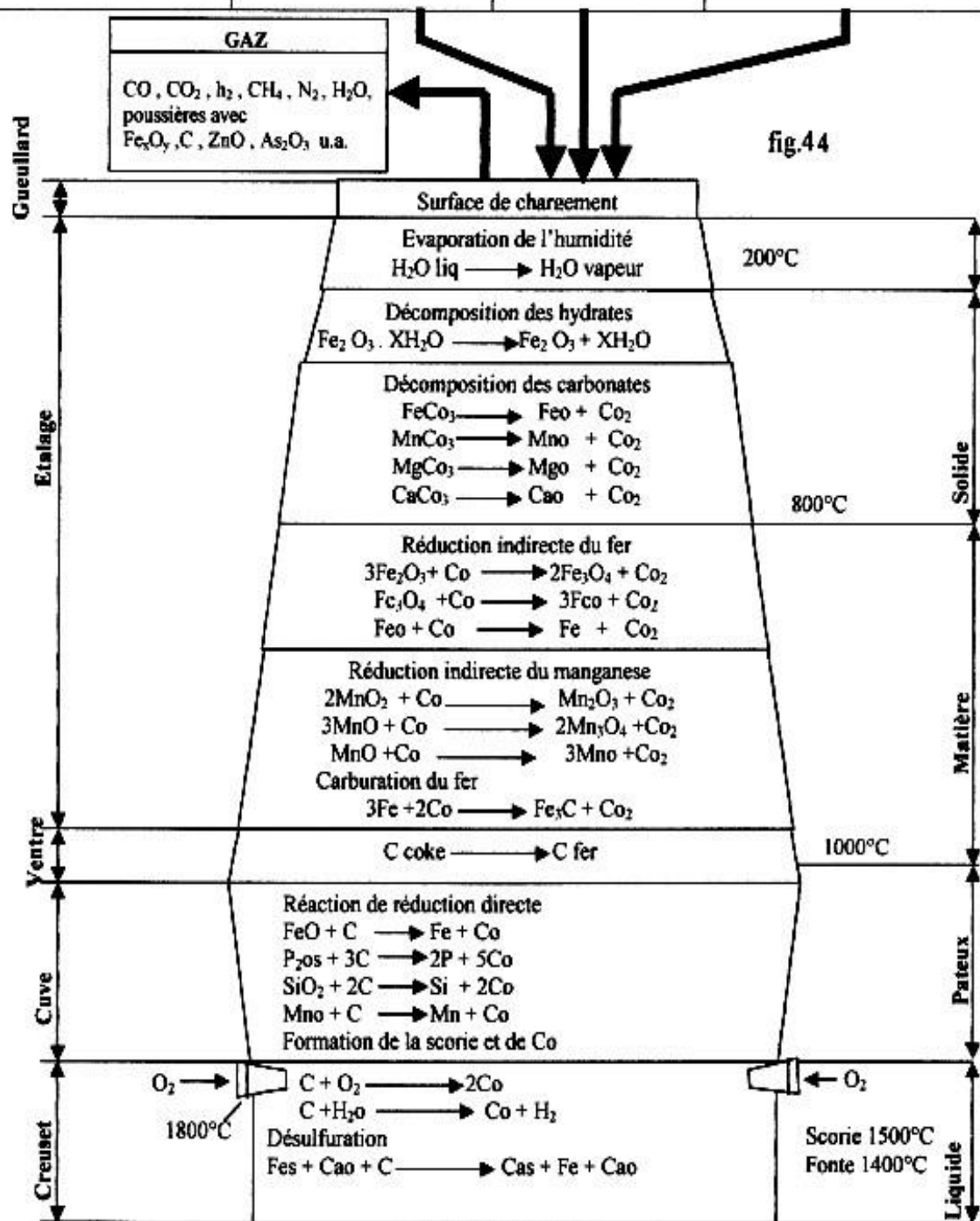
Avec l'augmentation de la température près de 1500°C, la charge est liquide et quelques réductions chimiques se poursuivent tels que la désulfuration de la fonte.

La formation de la fonte est caractérisée par la réduction du fer et sa liaison avec le carbone et autres éléments de la charge.

La carburation du fer commence déjà à l'état solides et à des températures inférieures à 1000°C. C'est le carbone du coke qui passe dans la composition chimique de la fonte, et au fur et à mesure que le fer se carbure sa température de fusion baisse.

La charge en passant à l'état liquide, elle s'écoule sous forme de gouttes entre les morceaux de coke, ce qui laisse poursuivre le processus de carburation du fer jusqu'à la teneur ordinaire nécessaire à l'obtention de la fonte liquide.

Matières	Coke	Minéri de fer	Calcaire
Element principal	C	Fe, O ₂	CaCO ₃ et CaO
Elements accompagnateurs	S, Si O ₂ , Al ₂ O ₃ , H ₂ O, Fe ₂ O ₃	SiO ₂ , CaO, MgO, Al ₂ O ₃ , Mn ₂ O ₃ , H ₂ O, FeS, Karbonate, P ₂ O ₃	SiO ₂ , MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃
Elements possible	Li ₂ O, P ₂ O ₃ , CaO, MgO, Alcalins et autres	As ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , V ₂ O ₃ , TiO ₂ , BaO, Pbs, Mos, Zns, Cas, Nis, Cus	S, TiO ₂ , etc..



I.4. Les fontes du Haut Fourneau

Les fontes obtenues dans le H-F sont destinées pour l'affinage de l'acier dans les différents fours et convertisseurs ainsi que pour le moulage des pièces mécaniques (fonderie). Elles se distinguent l'une de l'autre par leurs compositions chimiques.

Le tableau ci-dessous nous indique les différents types de fontes obtenues dans le H-F avec leur composition chimique.

Type de fontes H-F	% C	% Si	% Mn	% P	% S
Fonte pauvre en Mn	≈4%	Jusqu'à 1	(<1)	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05
Fonte riche en Mn	≈4%	Jusqu'à 1	(2-3)	0.08-0.12	Jusqu'à 0.05
Fonte Thomas	3.2 - 3,6	0,3 - 0,6	0.5 - 1,5	1,7-2.2	0,05-0.15
Fonte Bessmer	3.8	1.0-2.5	1 - 3	0,07 - 0,1	Jusqu'à 0.04
Fonte de Fonderie	3,5 - 4.2	2-3	Jusqu'à 1.0	0.5- 1.0	Jusqu'à 0.07
Fonte Hématite	3.5 - 4,2	2 - 2.5	0,7- 1.5	0,08-0.12	Jusqu'à 0.04
Fonte-manganèse	6-8	< 1.5	30 - 80	0.2 - 0.3	0.02
Fonte-silicium	1.2- 1.6	9- 15	0.5 - 0,7	0.12-0.16	0,02 - 0.04

La fonte liquide comporte des inclusions variées. Quelques une sont souvent introduites intentionnellement. Outre leurs caractères alphas ou gammagènes et leurs actions sur la trempabilité, valables pour les alliages ferreux, les éléments introduits dans les fontes sont caractérisés par leurs actions :

- Graphitisantes (Si, C, Al, Cu, Ni, Zr...) qui se traduisent par la création de germes servant de support de croissance pour le graphite.

-Antigraphitisantes (Cr, Mo, Mn, S, V, W, B...)

Nous donnons quelques indications spécifiques des principaux éléments contenus dans les fontes.

a) Cuivre et nickel : éléments graphitisants qui contribuent fortement au raffinement de la perlite par leur action γ -gène. En outre, le cuivre est fortement antiferritisant, alors que le nickel est sans effet.

L'introduction dans la fonte des ces deux éléments entraîne une augmentation de la résistance et de la dureté.

b) Silicium : élément graphitisant de base dans les fontes grises (% > 3) qui diminue la solubilité du carbone à l'état liquide dans l'eutectique et solide dans l'austénite. Il augmente la réfractairité des fontes et leurs tenus à certaines corrosions.

c) **Chrome** : élément antigraphitisant qui stabilise les carbures en retardant leur décomposition thermique ainsi que l'oxydation interne, et de ce fait améliore la tenue à chaud.

d) **Manganèse** : empêche la graphitisation et renforce les liaisons atomiques entre le fer et le carbone dans la cémentite.

e) **Molybdène** : il est surtout utilisé pour son importante action sur le " nez perlitique " des courbes

T.T.T. Il améliore considérablement la résistance au choc thermique.

f) **Soufre** : est un élément nuisible qui dégrade les propriétés mécaniques de la fonte. Il abaisse la coulabilité et contribue à la formation de soufflures dans les pièces moulées.

I.5. Formation du laitier

Le deuxième produit obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier. Le laitier résulte de la combinaison des éléments de la gangue de divers minerais, des fondants et de la sandre du coke.

Les principaux éléments constituant le laitier sont donnés sur le tableau ci-dessous.

% Cao	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% MgO	% FeO	% MnO	% P ₂ O ₅	% S	% Na ₂ O + K ₂ O
35-40	28-40	5 - 17	2 - 13	< 1	< 10	< 1	1 -2	< 2

La formation du laitier s'effectue en trois étapes :

- Près de la partie inférieure de la cuve se forme d'abord le laitier primaire facilement fusible et en grande quantité et contenant une quantité importante de FeO
- Avec l'augmentation de la température le FeO et MnO contenus dans ce laitier sont réduits simultanément et il y a dissolution d'autres oxydes dans ce laitier. Ce laitier est appelé laitier intermédiaire.
- Le laitier final se forme dans le creuset à des hautes températures par dissolution de la sandre du coke, fondant et le reste de la gangue.