

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science De l'Ingénierat
Département : Génie Des Procédés
Domaine : Science Et Technologie
Filière : Génie Des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**ELABORATION DE LA FONTE AU NIVEAU DU
HAUT FOURNEAU, EL HADJAR-ANNABA**

Présenté par : *BENATTIA Mohamed*
ITIM Seyf Eddine

Encadrant : *SAMAR Med El Hadi* Pr *Université BADJI Mokhtar - Annaba*

Jury de Soutenance :

Derradji Ahmed	Pr	U. Annaba	Président
SAMAR Med El Hadi	Pr	U. Annaba	Encadrant
Lachgar Med Saddek	M.C	U. Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Au terme de la rédaction de ce mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que nous devons à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation et à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici nos vifs respects et notre profonde gratitude.

En effet, nous souhaitons dans un premier temps remercier Dieu le tout-puissant et le Miséricordieux de nous avoir donné la force et la foi pour parvenir à ce petit travail.

En second lieu, nous voulons remercier nos parents qui sans eux nous ne serions jamais arrivés jusque-là qui nous ont épaulé du début jusqu'à la fin de nos études.

Nous tenons également à remercier le Professeur SAMAR EL HADI qui en sa qualité de directeur de mémoire nous a guidés, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Pour finir, nous remercions nos enseignants du cycle de master du département de Génie des procédés qui nous ont appris tant de choses.

Dédicace

À la fidélité et à la sincérité.

Je dédie Ce modeste travail à:

Plus respectivement à mes très chers parents qui grâce à eux et leur sacrifice pendant toute la durée de mes études, je suis arrivé à mon but.

À ceux qui m'ont accompagné avec amour, affection, tendresse et compréhension A:

- *Toute ma famille*
- *Et à tous les amis que j'ai connus depuis mon enfance.*

Seyf

Dédicace

Je tiens est avec grande plaisir que je dédie ce modeste travail:

*À l'être le plus cher de ma vie, **ma mère.***

*À celui qui m'a fait de moi un homme, **mon père.***

À Mes chers frères et Sœurs.

À tous mes amis de promotion de 2^{ème} année Master Génie Chimique, toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

*À tous les membres de ma famille, je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à
ma réussite.*

Mohamed

Résumé

La fabrication de l'acier se fait selon deux filières, filière ferraille et filière fonte, ce dernier occupe 70 % de fabrication de l'acier.

La fonte est très importante dans une usine sidérurgique car elle peut être utilisée directement par moulage ou transformer en acier dans les aciéries.

L'équipement responsable à la production de la fonte est le haut-fourneau pour cela il y a une partie importante dans notre mémoire sur l'explication de ce qui se passe dans le haut fourneau (les transformations et les réactions chimiques qui se déroulent au cours du procédé de fabrication de la fonte).

Et on termine par le modèle mathématique des hauts fourneaux qui permet de calculer les sorties du modèle (Les Inconnus) à partir des données (connues) pour assurer et faciliter le bon fonctionnement de haut-fourneau.

Liste des figures

Figure 01 : Haute-fourneau pour la production de la fonte	04
Figure 02 : Hématite : le principal minerai de fer extrait au Brésil	06
Figure 03 : Photo panoramique d'une coulée au Haut fourneau 2 de <u>Dąbrowa Górnicza</u> (Pologne)	09
Figure 04 : Schéma d'ensemble (gauche) et une photographie (droite) d'un haut fourneau (Corus).....	11
Figure 05 : schéma descriptif du haut fourneau conventionnel	12
Figure 06 : Création et circulation de CO et CO ₂ entre les couches de coke et de minerai.....	13
Figure 07 : Morceaux d'aggloméré obtenus par le <u>procédé Dwight-Lloyd</u> , posés sur une feuille A4.....	19
Figure 08 : Schéma de procédé	20
Figure 09 : Principe de fonctionnement du procédé Dwight-Lloyd, dit « chaîne d'agglomération » ou « agglomération sur grille ».....	23
Figure 10 : Photographie de coke	25
Figure 11 : schéma d'un cokerie.....	28
Figure 12 : Coke après sa sortie du four ou défournement.....	29
Figure 13 : Schéma générale du procédé	39
Figure 14 : schéma descriptif de haut-fourneau	31
Figure 15 : Schéma du procédé	33
Figure 16 : les étapes de fabrication de la fonte.....	35
Figure 17 : Températures des gaz dans le haut fourneau telles qu'interprétées à partir des données.....	37
Figure. 18 : Vue schématique de la région des tuyères du haut fourneau, (Nakamura, 1978).....	39
Figure. 19 : Composition du gaz directement devant une tuyère expérimentale de haut fourneau (Brunger, 1970)	40

Figure. 20 : Dessin descriptif de la structure interne d'un grand haut fourneau (Nakamura, 1978).....	41
Figure. 21 : Vue schématique de la réduction cyclique et de la gazéification du coke juste au-dessus de la zone de fusion.....	43
Figure.22 : Transfert de matière et chaleur dans les différentes zones du haut Fourneau.....	50
Figure.26 : Entre et sortie de carbone au niveau de le HF.....	61
Figure.27 : Exemple pour calculer W_u	63

Liste des tableaux

Tableau 01 : Quelques valeurs de résistances mécaniques de la fonte grise	07
Tableau 02 : Contenu en fer dans les différents minéraux (en %)	17
Tableau 03 : La composition d'une charge introduit et les produits obtenus.....	31
Tableau 04 : le tableau de dérivé 1	54
Tableau 05 : le tableau de dérivé 2	55
Tableau 06 : Exemple de tableau d'erreur	56
Tableau 07 : les données nécessaires pour l'utilisation de MMHF.....	57

Abréviations

HF : Haut fourneau.

MMHF : Modèle mathématique du haut fourneau.

PMA : Préparation des Matières et Agglomération.

RONF : Réduction des oxydes non-ferreux.

MM Coke : Mise en mille de coke.

MM charbon : Mise en mille de charbon.

Y0 : Degré d'oxydation initial de la charge.

RCO : Rendement du CO [%].

RH2 : Rendement du H₂ [%]

Wu : Chaleur sensible.

T : Température [C ; K].

n : Nombre de mole [mol].

X : Fraction molaire du gaz.

Y : Fraction molaire du liquide.

H : Enthalpie

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1 : les fontes et les hauts fourneaux

I.1	Historique	04
I.1.1	Découverte de la fonte et du haut fourneau.....	04
I.1.2	La fonte venait de naître.....	05
I.2	Les fontes.....	05
I.2.1	Définition	05
I.2.2	Déférents types des fontes.....	06
I.2.2.1	Fonte blanche.....	06
I.2.2.2	Fonte grise	06
I.2.2.3	Fonte GL (Graphite Lamellaire	07
I.2.2.4	Fonte GS (Graphite Sphéroïdal)	07
I.2.3	Autres utilisation du terme fonte	08
I.3	Les Hauts Fourneaux.....	09
I.3.1	Généralités Sur Les HF	09
I.3.2	Description du haut fourneau	11

Chapitre II : Procédé de fabrication des fontes

Introduction.....	15
-------------------	----

II.1 les éléments principaux	16
II.1.1 Minerai de fer	16
II.1.1.1 La préparation mécanique du minerai.....	17
II.1.1.2 L'agglomération.....	19
II 1-2 Le coke	24
II.1.2.1 Fabrication	25
II 1-3 Les fondants	30
II.1.4 Le haut-fourneau.....	31
II.2 Procède de fabrication.....	33

Chapitre III : Un regard à l'intérieur du four

Introduction.....	37
III.1 Comportement devant les Tuyères	38
III.2 Réactions dans le creuset, Tuyères, les chemins de l'air chaud et l'étalage ...	39
III.3 La zone de fusion	40
III.4 Réduction au-dessus de la zone de fusion.....	42
III.5 Cinétique de la réaction de gazéification du coke	44
III.6 Réactions dans les régions au-dessus de l'isotherme 1200 K.....	44
III.7 Réduction des oxydes supérieurs	44
III.8 Le quart supérieur de la cuve et le gaz de sortie.....	45
III.9 Temps de résidence « séjour ».....	46
III.10 L'arrangement de la charge	47

Chapitre IV : Le Modèle Mathématique du Haut Fourneau et son application

Introduction.....	49
IV.1 Modèle Mathématique de Haut-Fourneau MMHF Temps réel	49
IV.1.1 Historique De Modèle	49
IV.1.2 Objectif du modèle	50
IV.1.3 Principe du modèle.....	51
IV.1.4 Les variables du modèle	51

IV.1.5	Les entrées du modèle	52
IV.1.6	Conditions d'utilisation du modèle.....	52
IV.2	Les utilisations possibles de MMHF	53
IV.2.1	Analyse du fonctionnement du haut fourneau (temps réel)	53
IV.2.2	Calcul prévisionnel.....	53
IV.2.3	Les tableaux dérivés	54
IV.2.3.1	Faciliter les calculs en utilisant le tableau dérivé.....	54
IV.2.3.2	Validité du tableau dérivé	55
IV.2.3.3	Tableau d'erreur.....	55
IV.3	Le modèle mathématique du haut-fourneau "Version Process"	56
IV.4	Principales étapes des calculs MMHF	58
IV.4.1	Bilan Azote	58
IV.4.2	Bilan Oxygène	59
IV.4.3	Bilan Hydrogène	60
IV.4.4	Bilan carbone	60
IV.4.5	Consommation spécifique de gaz réducteur, μ (at(C+H)/atFe)	61
IV.4.6	Ecart à l'idéalité de la réduction, W ou WP.....	61
IV.4.7	L'état thermique du haut-fourneau, W	62
	Conclusion générale	64

Référence bibliographique

Annexe

Introduction générale

Les métaux occupent une place importante aujourd'hui comme avant du fait qu'ils se prêtent à tous les usages (outils, armes, pièces mécaniques, divers équipements etc.).

L'utilisation des métaux purs possède beaucoup d'inconvénients tels que faibles propriétés mécaniques, électriques, coûts très élevés etc...

Déjà au 15^{ème} siècle on préparait empiriquement des alliages binaires qui sont faciles à travailler et plus résistants que leurs constituants, même on savait déjà expérimentalement comment durcir un métal en le trempant ou en le forgeant, mais l'apport scientifique à cette époque était très limité. C'est au 20^{ème} siècle que les chercheurs ont pu établir les bases essentielles et les techniques fondamentales (analyses chimiques, métallographie, etc..) qui ont permis de progresser efficacement dans l'élaboration de nouveaux matériaux. Le dernier siècle est caractérisé par l'apparition de beaucoup d'alliages, des matériaux réfractaires, des matériaux de construction et surtout les composés organiques (plastique, caoutchouc, résines, colles, goudron etc...), et surtout on a vu évoluer en force dans le domaine de la haute technologie, les céramiques techniques et les matériaux composites qui ont pris l'essor que l'on connaît actuellement outre cela il y a amélioration de la qualité des matériaux, réduction des poids des pièces mécaniques et de leur prix de revient.

Malgré toutes ces nouveautés dans le domaine des matériaux, l'acier et la fonte demeureront les métaux les plus utilisés dans l'industrie.

La fabrication de la fonte se fait dans les hauts-fourneaux. Le haut fourneau assure la réduction des oxydes de fer des minerais et la fusion du métal. Le passage par l'état liquide, s'il demande une quantité d'énergie importante, permet la purification du métal par transfert des impuretés majeures dans une scorie liquide. Le haut fourneau délivre à l'aciérie à l'oxygène une fonte liquide dont la qualité chimique et la température sont parfaitement contrôlées. À l'échelle mondiale, environ 70% de l'acier produit est issu

de la filière minerais-haut fourneau, alors que la filière par recyclage de ferrailles représente 30%.

Les connaissances acquises en matière de fonctionnement du haut fourneau résultent des efforts conjoints des équipes de recherche et des exploitants au cours des décennies passées. La mise en œuvre des concepts scientifiques, l'instrumentation poussée, l'utilisation de modèles numériques, ont permis d'obtenir une bonne connaissance et une maîtrise efficace du fonctionnement complexe de l'appareil, ce qui a conduit à des progrès remarquables sur le plan de la fiabilité d'exploitation, de la productivité et de l'économie générale du procédé. [1]

CHAPITRE I : LES FONTES ET LES HAUTS FOURNEAUX

I.1 Historique

I.1.1 Découverte de la fonte et du haut fourneau

Au début du 14^{ème} siècle, la hauteur des fours a encore augmenté et le tirage aussi. Le soufflage s'est, lui aussi, encore perfectionné et de ce fait la température de combustion s'élève maintenant suffisamment pour que le minerai de fer absorbe une quantité croissante de carbone. Ce fer carburé qui commence à fondre à une température plus basse, dissout à son tour du carbone. C'est entre 1350 et 1400 que se produisit un événement tout à fait inattendu et involontaire. De ce type de four sortit un jour, certainement à la suite d'un soufflage mal contrôlé et un peu plus intensif qu'à l'ordinaire, un produit en fusion véritablement liquide (alors que le fer se présentait sous la forme d'une masse pâteuse). Ce nouveau métal dur et cassant n'était pas du tout malléable donc pas forgeable et encore moins soudable au feu, car sa teneur en carbone était trop importante, seule une

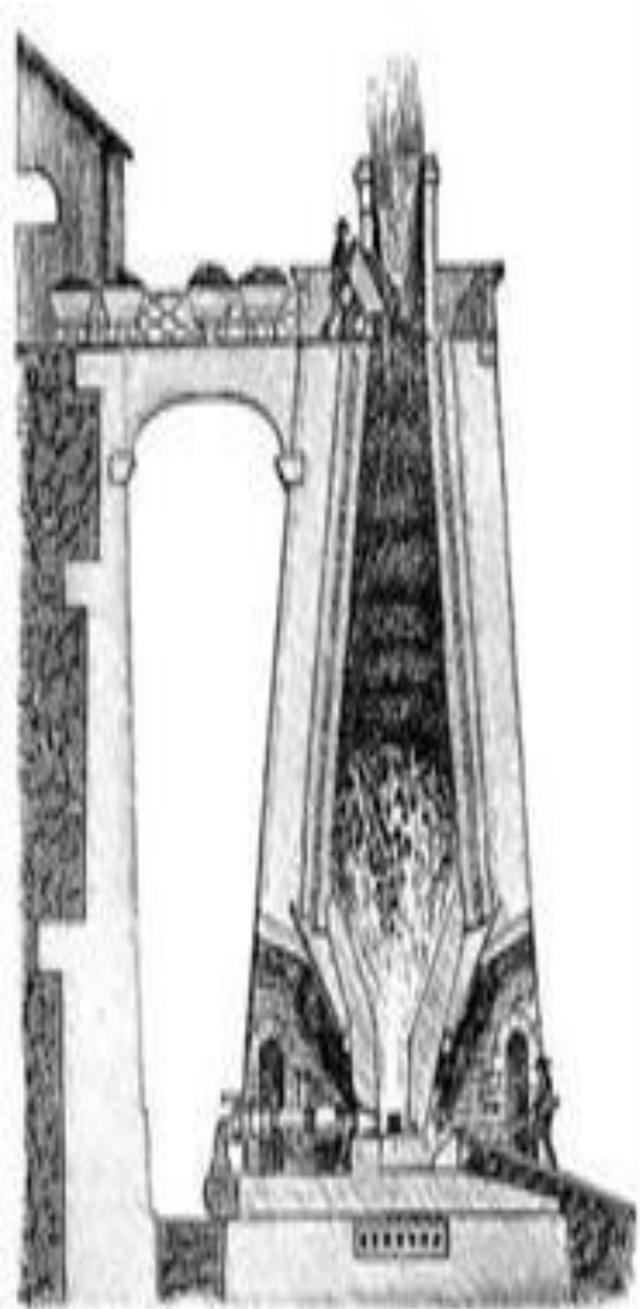


Fig 01 : Haute-fourneau pour la production de fonte

utilisation par moulage était possible.

I.1.2 La fonte venait de naître

Certains situent cet événement dans les environs de Liège en Belgique et d'autres dans la Ruhr en Allemagne.

Grâce à la fonte, on peut fabriquer, désormais, de plus en plus d'objets divers et indispensables tels que : grilles, rambardes, ancras pour bateaux, plaques de cheminée, marmites, caractères d'imprimerie, canons, etc. C'est par tonnes/mois qu'elle est produite dans ce que l'on peut désormais appeler les précurseurs des hauts-fourneaux.

Plus tard encore, en débarrassant cette fonte de sa trop grande teneur en carbone (décarburation) et de ses impuretés dans les affineries (affinage) on obtiendra une matière de nouveau malléable, donc forgeable, *le FER*. [2]

I.2 Les fontes

I.2.1 Définition

Les fontes sont toutes des alliages destinés à la fonderie. Elles se distinguent des autres alliages par leur excellente coulabilité (ce terme regroupe l'inertie thermique et la fluidité de l'alliage en fusion, il est mesuré de façon normalisée par le test dit de la spirale).

La fonte, est un alliage de fer et de carbone dont la teneur est supérieure à 2%. Le carbone, qui est en sursaturation dans les fontes, peut précipiter sous forme de graphite ou de cémentite Fe_3C . Elles se distinguent par rapport aux autres alliages de par leur excellente coulabilité.

Plusieurs classifications des fontes existent, mais la plus utilisée, basée sur le faciès de rupture d'un témoin, définit deux catégories : les fontes blanches, à cassure blanche, constituées de fer et de cémentite et les fontes grises, à cassure grise, constituées de fer et de graphite [3].

I.2.2 Déférents types de fontes

I.2.2.1 Fonte blanche

La fonte blanche est une solution de perlite et de cémentite. Le carbone s'y trouve sous forme de carbure de fer (Fe_3C). Possédant une bonne coulabilité, et un aspect blanc brillant, la fonte blanche est principalement utilisée pour les pièces d'aspect et la fonderie d'art. [4]

- a) Principales qualités des fontes blanches :
- une excellente résistance à l'usure et l'abrasion
 - un bel aspect
 - une excellente coulabilité
- b) Principal défaut :
- usinage difficile

I.2.2.2 Fonte grise

La fonte grise est la famille des fontes où le carbone se trouve sous forme de graphite. La structure graphitique du carbone est obtenue par un refroidissement très lent de la fonte ou par l'ajout de composants graphitants comme le silicium.

- a) Utilisations :

La fonte grise trouve essentiellement son emploi dans la construction, spécialement pour la fabrication des pièces travaillant à la compression (gabots, poteaux); ainsi que pour les produits sanitaires (tubes, radiateurs de chauffage).

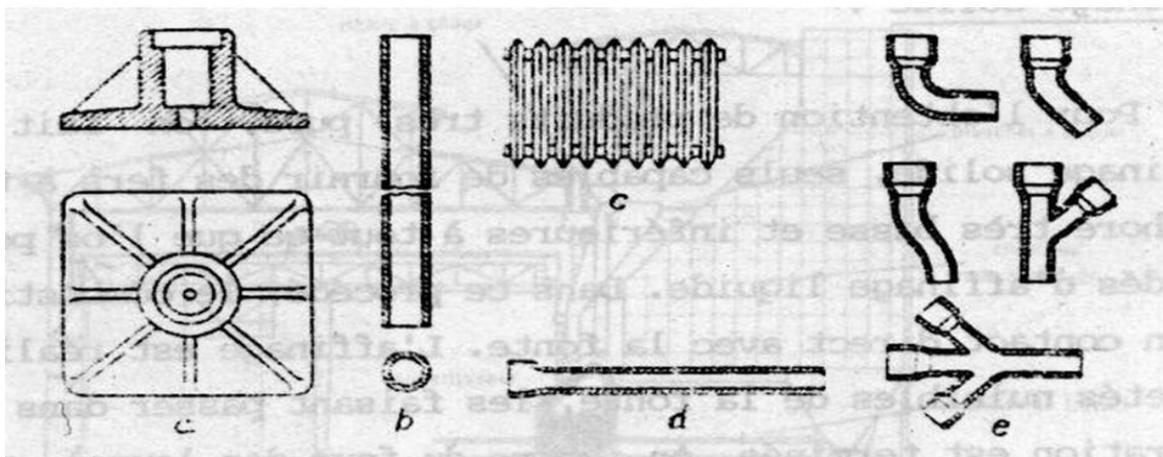


Fig 02 : pièces de construction fabriquées par la fonte grise.

- a- semelle d'appui des poteaux,
- b- poteaux,
- c- radiateurs de chauffage,
- d- tuyaux,
- e- pièces de raccord pour les tubes

b) Quelques valeurs de résistances mécaniques de la fonte grise :

Tab 01 : Quelques valeurs de résistances mécaniques de la fonte grise. [5]

Nature de la fonte	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
Fonte grise	120 / 280	280 / 480
Fonte grise modifiée	280 / 480	380 / 600

I.2.2.3 Fonte GL (Graphite Lamellaire)

C'est la plus courante des fontes grises. Le graphite s'y trouve sous forme de lamelles.

a) Principales qualités des fontes GL :

- leur facilité d'usinage
- une bonne résistance aux vibrations
- une excellente coulabilité

b) Principal défaut :

- fragilité

c) Principales utilisations :

- Bâties de machines-outils, bonne résistance aux vibrations
- Tuyaux et canalisations (il est possible de couler des tubes de grande taille via le coulage par centrifugation)

I.2.2.4 Fonte GS (Graphite Sphéroïdal)

Fonte dans laquelle le graphite se trouve sous forme de nodules (sphéroïdes). Cette microstructure particulière est obtenue par l'ajout de magnésium dans la fonte peu de temps avant le moulage (si la fonte est maintenue en fusion, elle perd les spécificités

des fontes GS au bout d'une dizaine de minutes). Le magnésium s'évapore mais provoque une cristallisation rapide du graphite sous forme de nodules. Cette microstructure lui donne des caractéristiques mécaniques proches de l'acier.

a) Principales qualités des fontes GS :

- résistance
- ductilité
- bonne coulabilité

b) Utilisations

En général, pour toute pièce mécanique (par exemple par moulage).

- Bâti de machines grâce à une bonne résistance aux vibrations.
- Fabrication de conduites et de tuyaux. Depuis quelques années, elle est proscrite pour les conduites de gaz de ville car devient trop cassante avec les années et le froid.
- Elle est aussi utilisée par l'industrie automobile pour la fabrication, par moulage puis usinage partiel des blocs moteur, des disques de freins, des tambours de freins ou encore des volants moteurs.
- Elle est couramment utilisée pour la fabrication de contrepoids.

I.2.3 Autres utilisations du terme fonte

Le terme fonte est parfois utilisé pour désigner d'autres alliages, tous ces usages sont incorrects :

- ❖ le terme fonte d'aluminium (de cuivre, de zinc...) est parfois utilisé pour désigner une pièce (alliage) fabriquée par moulage .
- ❖ le terme fonte d'acier est parfois utilisé, notamment pour les articles de jardinage ou les barbecues, et désigne en réalité de la fonte grise ; un alliage ferreux ne pouvant être à la fois une fonte et un acier, la référence à l'acier est faite pour éviter la confusion avec les fontes d'aluminium, mais en réalité cette référence est commercialement plus valorisante que la dénomination fonte grise ;
- ❖ le terme fonte d'innox ou fonte inoxydable est parfois utilisé, notamment en robinetterie et pour les ustensiles de cuisines. Ce terme est volontairement

trompeur, car il n'existe pas de fonte normalisée inoxydable (l'oxydation posant peu de problème à la fonte). Cette appellation, qui désigne au mieux un alliage d'aluminium chromé et ne donne en réalité aucune information quant aux matériaux employés, est souvent employée pour créer la confusion avec les aciers inoxydables. [6]

I.3 Les Hauts Fourneaux

I.3.1 Généralités Sur Les HF

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 transforme du minerai de fer en fonte liquide, en brûlant du coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur. Bien que la fonte produite soit un matériau à part entière, cet alliage est généralement destiné à être affiné dans des aciéries.



Fig 03 : Photo panoramique d'une coulée au Haut fourneau 2 de Dąbrowa Górnicza (Pologne).

La disposition de l'appareil, au centre d'une halle circulaire, est typique des hauts fourneaux soviétiques.

Le haut fourneau produit de la fonte en fusion, par opposition au bas fourneau, qui produit une loupe de fer solide. Il en est pourtant une évolution directe, mais il ne s'est généralisé que lorsqu'on a su valoriser la fonte produite. Ainsi, la Chine développe dès le I^{er} siècle l'usage du haut fourneau en même temps que la fonderie. L'occident ne l'adopte qu'après le XII^e siècle, avec la mise au point des méthodes d'affinage de la fonte en acier naturel. C'est là qu'il évolue vers sa forme actuelle, la généralisation du coke et du préchauffage de l'air de combustion contribuant à la première révolution industrielle.

Devenu un outil géant, sans que son principe fondamental ne change, le haut fourneau est maintenant un ensemble d'installations associées à un four. Malgré l'ancienneté du principe, l'ensemble reste un outil extrêmement complexe et difficile à maîtriser. Son rendement thermique et chimique exceptionnel lui a permis de survivre, jusqu'au début du XXI^e siècle, aux bouleversements techniques qui ont jalonné l'histoire de la production de l'acier.

Qu'il soit « cathédrale de feu » ou « estomac », le haut fourneau est aussi un symbole qui résume souvent un complexe sidérurgique. Il n'en est pourtant qu'un maillon : situé au cœur du processus de fabrication de la fonte et l'acier, il doit être associé à une cokerie, une usine d'agglomération et une aciérie. [7]

Le haut fourneau est considéré comme l'un des réacteurs industriels les plus complexes. Sa principale fonction est la production de la fonte, (alliage de fer saturé en carbone). 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 (Burteaux, 1994) pour les fourneaux les plus productifs. On compte à peu près 1500 hauts fourneaux dans le monde en 2013. La figure 5 montre une vue réelle d'un haut fourneau et un schéma des différentes parties qui le composent.

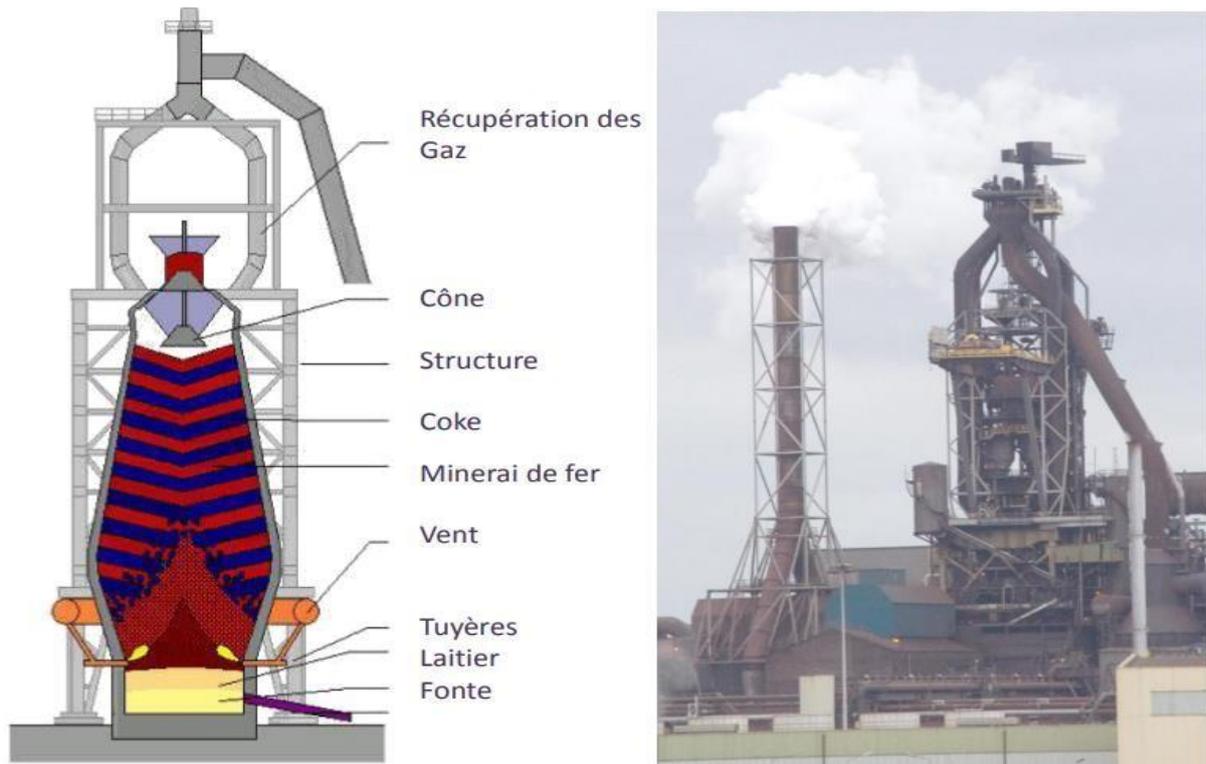


Fig 04 : Schéma d'ensemble (gauche) et une photographie (droite) d'un haut fourneau (Corus).

I.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 (oxydes minéraux fondus) sont extraits alternativement par le bas du four.

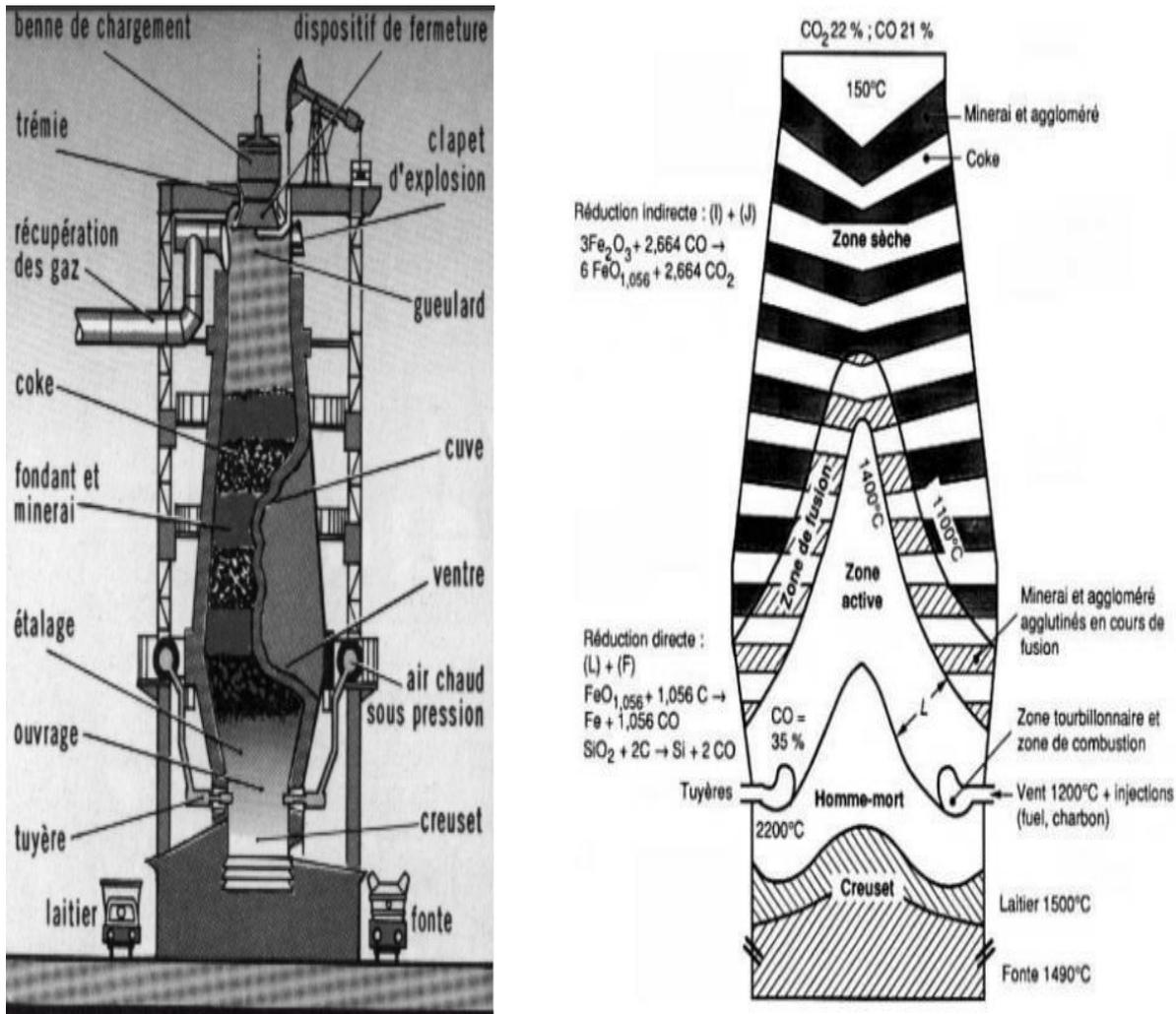


Fig 05 : Schéma descriptif du haut fourneau conventionnel.

On identifie cinq zones principales dans le haut fourneau.

- **Le gueulard** : partie haute du four, par où sont chargés les solides et évacués les gaz.
- **La cuve** : Partie qui a la forme d'un cône évasé 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 (en faisant converger les gaz, lors de leur ascension, sur un volume rétrécissant) dès son introduction dans le fourneau.
- **Le ventre** : Partie intermédiaire entre la cuve et les étalages. L'état des matières (solides ou liquides) et les phénomènes physicochimiques diffèrent grandement à ce niveau selon la position radiale.

- **Les étalages** : Région où les oxydes de fer non encore complètement réduits entrent en fusion (représentée par la zone de fusion dans le schéma). Contrairement à la cuve, cette zone a la forme d'un tronc de cône inversé. Cette forme favorise la régularisation de la descente de la charge et son acheminement vers la zone des tuyères et aussi la distribution du gaz vers la partie supérieure en améliorant l'efficacité de réduction.
- **Le creuset** : Zone où s'accumulent les liquides (fonte et laitier) avant d'être extraits (trou de coulée).

La charge minérale et le coke sont introduits via un système de distribution qui permet une alternance des couches. Cette répartition est nécessaire pour assurer une bonne marche du haut fourneau. D'une part, elle assure une bonne perméabilité permettant aux gaz de circuler même en présence de liquides. D'autre part, elle assure grâce au coke le maintien des conditions réductrices dans le lit. Lorsque le monoxyde de carbone réagit avec les oxydes de fer d'une couche, le CO_2 produit réagit à son tour avec le carbone du coke situé dans la couche supérieure dans le domaine de températures supérieures à 1000°C , pour régénérer du monoxyde de carbone, par la réaction de Boudouard, qui réduit ensuite la charge de la couche supérieure, comme représenté schématiquement sur la figure 8.[8]

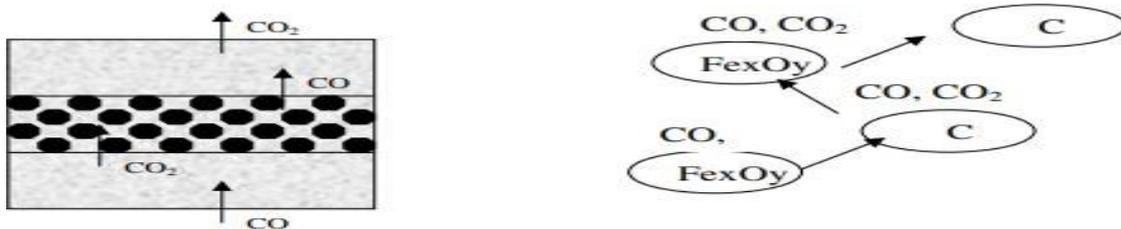


Fig 06 : Création et circulation de CO et CO_2 entre les couches de coke et de minéral.

CHAPITRE II :
PROCEDE DE
FABRICATION DES
FONTES

INTRODUCTION

L'élaboration d'une fonte commence par le choix de la composition chimique de base. Cette composition impose les matières premières qui constituent les charges des moyens de fusion, les traitements de la fonte à l'état liquide, la détermination des pertes ou gain au feu. En règle générale, le cahier des charges de la pièce moulée à fournir est caractérisé par les propriétés mécaniques et physiques du matériau utilisé pour la fabriquer. Ces caractéristiques dépendent conjointement de la composition chimique finale et de la microstructure de la fonte. Cette microstructure est largement influencée par les vitesses de refroidissement pendant la solidification et à l'état solide, et par les traitements à l'état liquide du matériau. Il revient au fondeur de choisir la composition chimique de base initiale et les moyens de fusion à utiliser pour répondre au cahier des charges. Le choix des moyens de fusion utilisés est également fonction du flux d'alliage liquide à fournir au chantier de moulage et de sa flexibilité.

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 :

- ✓ Minerai de fer (la minerai de fer prévenant de la mine est traité dans l'unité agglomération).
- ✓ Coke (il s'agit d'une cokerie pour transformer la houille en coke exploitable).
- ✓ Fondant (principalement c'est l'alumine).

Donc avant d'expliquer le procédé, il faut expliquer comment obtenir ces principaux éléments.

II.1 LES ÉLÉMENTS PRINCIPAUX

II.1.1 Minerai de fer

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.

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

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

Les principaux minerais de fer sont des sulfures, des carbonates et des oxydes. Ici on parle particulièrement des oxydes car ils sont le plus utilisés dans la sidérurgie :

- La magnétite, spinelle ferrimagnétique Fe_3O_4 , est le minéral de fer le plus riche en métal. Elle est souvent associée à l'hématite dans le même gîte, mais des gîtes de magnétite pure sont aussi connus. Densité 5,15, couleur noire, éclat métallique, souvent accompagnée d'impuretés comme la silice, la chaux, l'alumine et le phosphore.
- L'hématite Fe_2O_3 , est le composant le plus important des minéraux de fer traités dans l'industrie sidérurgique. Elle comporte plusieurs types :
 - l'oligiste cristallise en rhomboèdres
 - la spéularite consiste en agrégats de cristaux d'hématite à face lisse comme un miroir
 - l'hématite rouge ordinaire se présente en masses fibreuses, terreuses ou compactes
 - l'hématite rouge oolitique est formée de petites sphères agglomérées
 - la martite est une hématite en pseudomorphose de la magnétite

La teneur en fer élémentaire des principaux minéraux de fer varie dans des limites typiques :

- magnétite : Fe = 50 – 67 %
- hématite : Fe = 30 – 65 %

Tab 02 : Contenu en fer dans les différents minéraux (en %).

Minéral	Formule chimique	Contenu théorique en fer dans le minéral (en %)
Hématite	Fe ₂ O ₃	69,96
Magnétite	Fe ₃ O ₄	72,4

Les oxydes qui forment la gangue vont évidemment diminuer la teneur en fer des minerais employés.

Sachant que le minerai de fer n'est pas utilisé à l'état naturel (roche) il doit donc passer par l'unité d'agglomération. [9]

II.1.1.1 La préparation mécanique du minerai :

Le minerai tout venant de granulométrie 0-300mm arrivant par rames de 22 à 26 wagons est déversé dans la fosse de déchargement.

L'ensemble de la préparation et de la manutention du minerai se compose de trois parties.

- La mise en stock du minerai 0-300mm pour une pré homogénéisation.
- Le broyage et le criblage du minerai.
- La mise en stock du minerai 0-10mm.

Le broyage primaire obtenu par deux broyages rotatifs et le broyage secondaire par trois broyeurs à marteaux dans l'ensemble, quatre opérations définissent le circuit de traitement du minerai.

A. Provenance :

Le minerai 0-300mm peut provenir :

- Soit après déchargement des wagons dans les silos en empruntant successivement un certain nombre les bandes transporteuses.
- Soit du stock 0 -300mm par l'intermédiaire du jeteur pour la reprise du minerai et des bandes transporteuses.

Dans les deux cas le débit minéral est de 1200t /h avant déversement dans les silos trempons.

B. Broyage primaire :

Le minerai extrait passe directement dans deux cribles à 50mm. L'inférieur à 50mm est envoyé dans les silos et le supérieur est broyé à 50mm par les broyeurs avant de rejoindre les silos.

C. Criblage :

La granulométrie du minerai se trouvant dans les silos est en principe inférieure à 50mm. Le minerai extrait de ces silos est criblé à 10mm dans les cribles.

- Les passants sont évacués vers le parc d'homogénéisation par la bande.
- Le refus est acheminé vers les silos.

D. Broyage secondaire :

Le minerai 10 - 50mm extrait des silos (refus) est broyé à 10mm par trois broyeurs à marteaux dont deux travaillent simultanément et le 3ème en réserve. Le produit broyé après passage dans les silos est criblé à 10mm.

- Les passants sont évacués au parc d'homogénéisation.
- Le refus est recyclé dans les broyeurs en repassant dans les broyeurs en repassant dans les silos.

E. Charge du broyeur secondaire :

Quelle que soit la granulométrie du minerai au déchargement de la rame et si le criblage à 50mm est efficace, nous ne devons avoir dans les premiers silos que du minerai de granulométrie inférieure à 50mm.

F. Cas du criblage à 10mm :

La charge du broyeur secondaire est constituée dans ce cas :

- Du refus aux cribles de granulométrie 10 à 50mm.
- Du refus aux cribles de granulométrie supérieur à 10mm, ce refus étant la charge circulante des broyeurs.

La quantité de la charge des broyeurs est bien entendu intimement liée à l'efficacité des cribles et des broyeurs.

II.1.1.2 L'agglomération

a) Matière agglomérée

L'aggloméré est une matière composée d'oxydes de fer et de gangue grillés et frittés dans une usine d'agglomération. Ce produit est obtenu par combustion de charbon préalablement mélangé avec du minerai de fer et des oxydes. Il s'agit d'un conditionnement du minerai de fer qui optimise son utilisation au haut fourneau. [10]



Fig 07 : Morceaux d'agglomérés obtenus par le procédé Dwight-Lloyd.

b) Usine d'agglomération

Une usine d'agglomération est une installation sidérurgique servant à fritter le minerai de fer pour le rendre apte à l'utilisation dans le haut fourneau. Le minerai de fer est tout d'abord mélangé avec de la castine et un combustible solide bon marché (houille, rebuts de coke). L'opération d'agglomération proprement dite consiste à brûler le combustible pour atteindre la température de frittage du minerai. Le produit obtenu, appelé « aggloméré », a une composition chimique, une porosité et une tenue mécanique compatibles avec le fonctionnement du haut fourneau.

1) Procède :

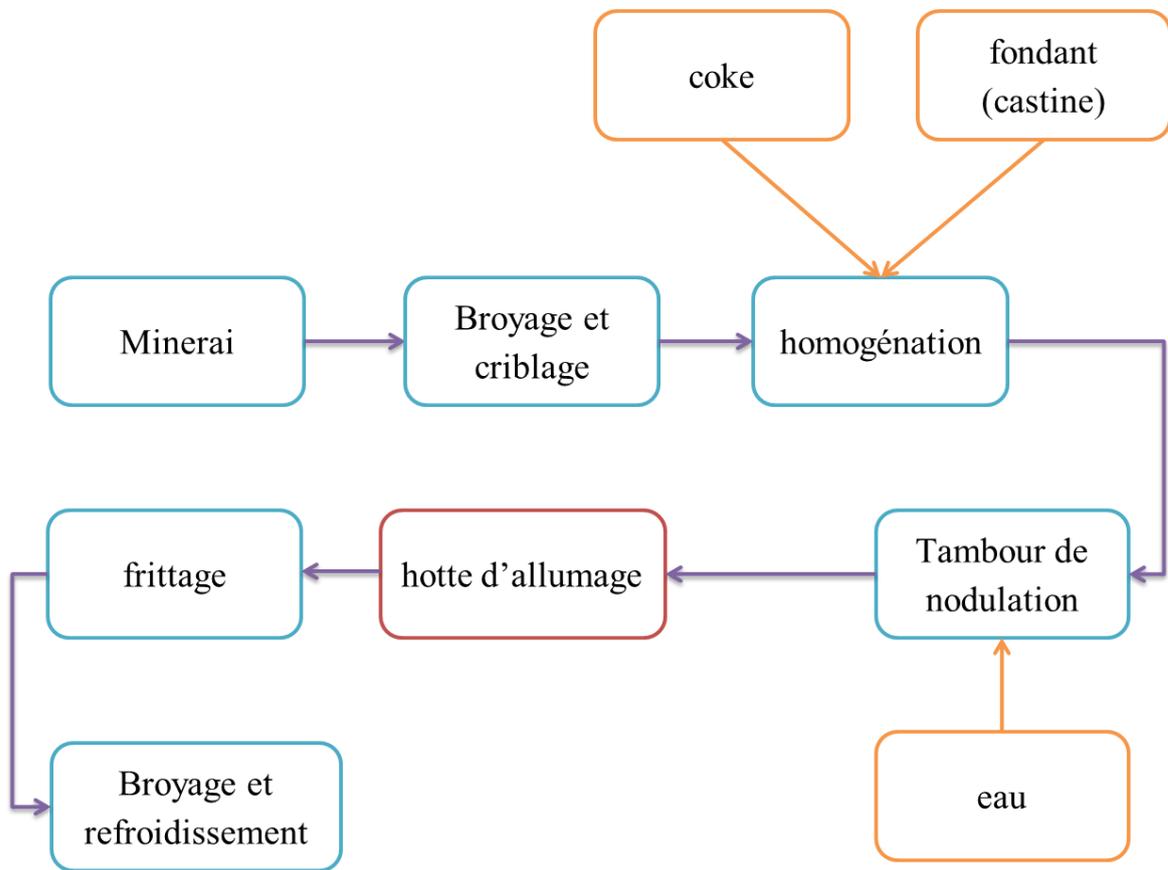


Fig 08 : Schéma de procédé.

2) Opérations préliminaires à l'agglomération

Le minerai homogénéisé est alors mélangé avec des fondants comme l'olivine et la castine, ainsi qu'un combustible solide, généralement de la houille. Ces composants sont alors soigneusement mélangés, généralement dans des tambours de mélange, puis agrégés en petites boulettes, généralement à l'aide d'un tambour de nodulation.

Toutes ces manutentions représentent un aspect essentiel de l'intégration de l'usine dans un complexe sidérurgique : « Une installation de préparation de la charge (criblage, concassage) exige beaucoup de place et des manutentions importantes. Sur un espace nouveau, l'installation peut être rationnellement conçue et les manutentions réduites. Par contre, les usines existantes n'ont pas été prévues pour ce type d'extension et, par conséquent, il faut installer les agglomérations soit à assez grande distance des hauts fourneaux, soit dans des espaces restreints et peu adéquats. » Dans les années 1950, cette contrainte a souvent alimenté les arguments en faveur de la

construction de complexes sidérurgiques neufs contre la modernisation des sites existants.

À ce stade, l'agglomération en boulettes de quelques millimètres de diamètre est très distincte du frittage qui est réalisé ultérieurement sur la chaîne d'agglomération : La cohésion est essentiellement réalisée grâce à de l'eau et de la chaux dosées dans le mélange.

Agglomération :

Le minerai est déposé sur la chaîne en deux couches superposées. L'épaisseur de la couche inférieure, qui protège les grilles et sert de filtre, varie entre 30 et 75 mm. Cette couche est généralement constituée de minerai déjà aggloméré : une granulométrie comprise entre 12 et 20 mm est généralement choisie. La couche supérieure consiste en un mélange homogène, essentiellement constitué de minerai, de combustible et de castine, dont l'épaisseur varie entre 350 et 660 mm. L'homogénéité chimique et la granulométrie de ce mélange sont garanties par les tambours d'homogénéisation et de nodulation.

Cette préparation passe alors sous la hotte d'allumage, consistant en une rangée d'une quinzaine de brûleurs qui mettent le feu au combustible présent dans la couche supérieure. Fréquemment, une deuxième rangée de brûleurs permet de maîtriser l'homogénéité et l'évolution de la température.

Le front de combustion se propage alors vers le bas, attisé par l'aspiration d'air qui se fait de haut vers le bas : le procédé est donc similaire à la combustion du tabac dans une pipe. La puissance d'aspiration est donc, tout comme la surface de la chaîne, un élément essentiel définissant la capacité de production de l'installation. Les fumées aspirées sous la partie active de la chaîne, très chargées en poussière de minerai, sont dépoussiérées. Le recyclage des poussières collectées dans toute l'installation est essentiel, car il peut concerner jusqu'à 60 % du produit déposé sur la chaîne.

La température visée au moment de la combustion doit permettre le frittage du minerai. Dans le cas de l'agglomération du minerai de fer, on vise généralement une température comprise entre 1 150 et 1 250 °C dans la zone de combustion, et entre 900 et 1 000 °C dans la zone brûlée pour éviter un refroidissement trop brutal de la couche agglomérée.

Arrivée à l'extrémité de la chaîne, la couche agglomérée se brise en tombant. Un broyeur brise les blocs en petits morceaux, puis le produit est refroidi à l'air, sur un refroidisseur généralement circulaire. Les morceaux d'agglomérés sont alors criblés : Les morceaux inférieurs à 5 mm retournent dans le processus d'agglomération (ces « fines de retour » représentent, en moyenne, un quart de la production de la chaîne), les morceaux plus gros, entre 5 et 12 mm, voire parfois 20 mm, sont envoyés au haut fourneau.

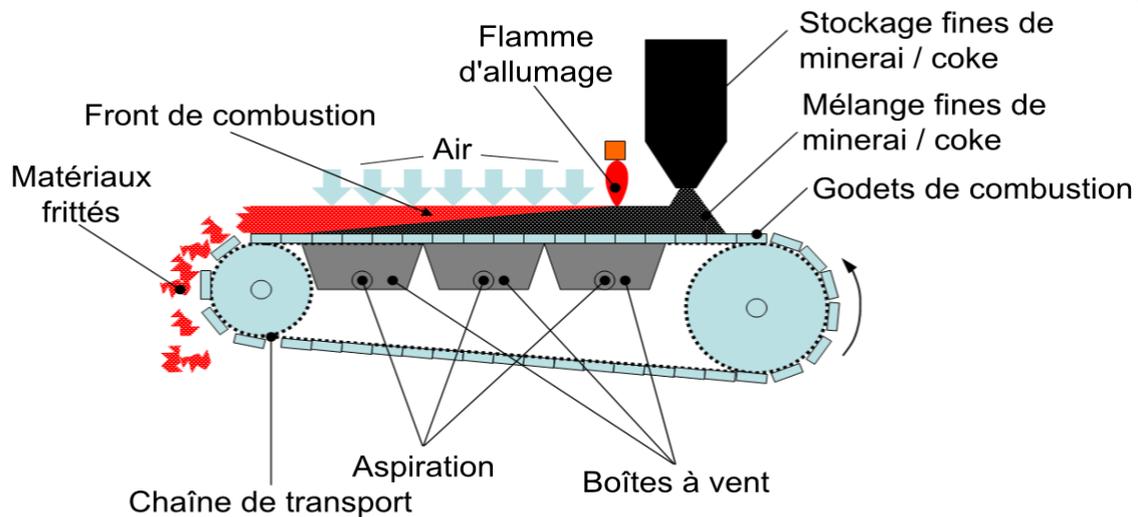


Fig 09 : Principe de fonctionnement du procédé Dwight-Lloyd, dit « chaîne d'agglomération » ou « agglomération sur grille ».

3) Intérêts et limitations

L'aggloméré est un produit optimisé pour son utilisation au haut fourneau. Pour cela, il doit remplir au mieux plusieurs conditions :

- être composé d'une gangue d'oxydes qui, combinée avec les cendres issue de la combustion du coke (essentiellement de la silice), donnera naissance à un laitier fusible, à la fois réactif vis-à-vis des impuretés (le soufre apporté par le coke en particulier), peu agressif vis-à-vis des réfractaires habillant le haut fourneau et d'une qualité adaptée à sa valorisation ;
- vérifier une granulométrie précise, généralement comprise entre 20 et 80 mm (les morceaux trop petits colmatant le four, et les trop gros prenant trop de temps pour se transformer à cœur) ;

- conserver une perméabilité aux gaz réducteurs, et cela aux plus hautes températures possibles ;
- réaliser les réactions endothermiques à basses températures qui peuvent être faites plus économiquement hors d'un haut fourneau. Il s'agit essentiellement du séchage, de la calcination de la gangue (décarbonation des calcaires et déshydratation des argiles ou des gypses) et de réactions de réduction. L'aggloméré devient alors, à poids égal, plus riche en fer que le minerai.
- suroxyder les oxydes de fer, le Fe_2O_3 étant mieux réduit par monoxyde de carbone présent dans le haut fourneau que les composés moins oxydés, surtout le Fe_3O_4 .

Un autre intérêt consiste en l'élimination d'éléments indésirables : le procédé d'agglomération sur chaîne élimine 80 à 95 % du soufre présent dans le minerai et ses additifs. C'est également un moyen de se débarrasser du zinc, élément « empoisonnant » des hauts fourneaux, car sa température de vaporisation, de 907 °C, correspond à celle d'un grillage bien mené. [11]

II 1-2 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
- 08 - 11% sandre
- 02 - 06% H_2O 0,8- 1,2% Soufre
- 02 - 03% 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 oligo-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 [12]

Le coke est un combustible obtenu par pyrolyse de la houille dans un four à l'abri de

l'air ; ces fours sont regroupés en batteries dans une usine appelée cokerie. Ce procédé a longtemps été très polluant et l'est encore dans les pays en développement. En Europe, il ne subsiste que quelques cokeries dont les émissions, sous-produits et déchets sont contrôlés.



Fig 10 : Photographie de coke.

II.1.2.1 Fabrication

Avant de commencer d'expliquer la fabrication il faut d'abord expliquer où se déroule le procédé !!!

a) La cokerie

Le coke est fabriqué dans une usine appelée cokerie ou, plus anciennement, fours à coke. Cette usine comprend plusieurs séries de fours rectangulaires disposés en batterie (en général entre 25 et 30 fours par batterie). La cokerie peut comprendre 12 batteries de 30 fours chacune. Les cokeries peuvent produire différentes variétés de coke en fonction de la qualité du charbon et de la durée de cuisson. Il existe du coke de fonderie, du coke sidérurgique et même du coke domestique, destiné à être brûlé comme des boulets de charbons agglomérés.

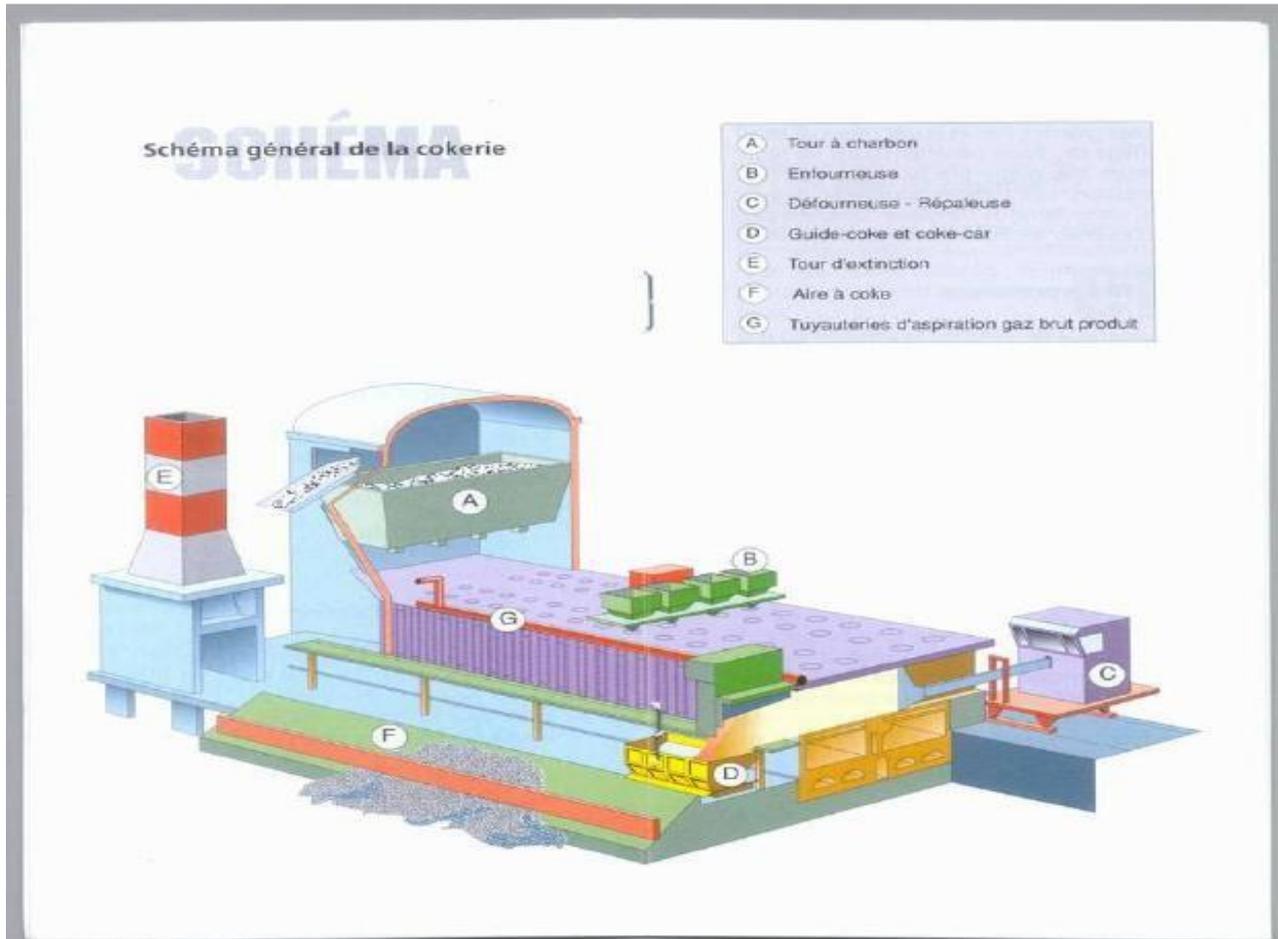


fig 11 : schéma d'une cokerie.

b) procédé de fabrication :

a) Pâte à coke

La première étape de la fabrication consiste à préparer le charbon avant son enfournement. La qualité finale du coke dépend étroitement de cette étape. Elle consiste à doser et à mélanger les différents types de charbon. Cette opération est généralement automatisée. Le mélange est ensuite broyé.

Le charbon est ensuite mélangé avec du fioul dans une proportion allant de 1 à 5 ‰ en masse. Cette opération appelée fouillage permet de diminuer le gradient de densité dans les fours de cokéfaction remplis par gravité.

b) Cuisson

La cuisson peut durer entre 16 et 40 heures en fonction de la qualité recherchée.

Durant cette « cuisson », le mélange de houilles enfourné est transformé en coke par élimination des matières volatiles, puis par transformation physique.

Les houilles sélectionnées pour les cokeries dites « charbons à coke », se transforment, à une certaine température, en une pâte plastique avant de se resolidifier à une température supérieure. Le coke ainsi obtenu est refroidi et criblé.

Pour les cokes utilisés dans la sidérurgie, la pâte est enfournée dans des fours dits à chambre verticale.

Il est constitué de deux parois (les panneresses) de briques réfractaires, fermées à chaque extrémité par une porte. La chambre est parallélépipédique généralement d'une longueur comprise entre 12 et 18 m, d'une largeur comprise entre 0,4 et 0,8 m et d'une hauteur comprise entre 4 et 8 m. Les panneresses ne sont pas parallèles, on les construit avec un léger angle d'ouverture. Cet angle a pour but de faciliter le défournement.

Le chauffage du four est assuré par des piédroits constitués d'une série de chambres (les carneaux) disposées de chaque côté. Il y a un piédroit de chaque côté du four. Le système de chauffage permet d'obtenir une température de 1 200 à 1 350 °C. La voûte et la sole ne sont pas chauffées.

Les fours sont disposés en batterie de 10 à 100. Un carneau est commun à deux fours. La batterie de fours dispose d'un accumulateur de chaleurs permettant de récupérer puis de restituer la chaleur résiduelle non utilisée à la sortie des carneaux.

Pour obtenir du coke métallurgique (utilisable dans les haut-fourneaux), pour des températures de 1 200 à 1 350 °C, le temps de chauffage varie entre 16 et 20 heures.

La première machine à intervenir dans le processus de fabrication du coke est l'enfourneuse qui, par l'intermédiaire de trémies, va enfourner une certaine quantité de houille (souvent autour de 40 tonnes) à travers des bouches (appelées tampons) situées à la cime des fours.

Pendant le chauffage, la pâte à coke passe par divers stades. La première étape jusqu'à 150 °C est le séchage. Elle se caractérise par l'évaporation de l'eau. Vers 350 °C, la pâte se ramollit et sa viscosité augmente. Elle aura une valeur maximale aux environs de 450 °C. Ces phénomènes s'accompagnent d'un fort gonflement de la pâte. Ensuite sa viscosité diminue et elle se resolidifie vers 550 °C.

Au-dessus de cette température, on passe à la phase de carbonisation du *semi-coke*. La pâte se contracte et il y a émission des matières volatiles qui sont récupérées.

c) Défournement et extinction

La défourneuse pousse avec un bélier et par l'intermédiaire d'une crémaillère de plus de 10 mètres, le coke chaud (environ 1 000 °C) vers le couloir du guide-coke. Ce guide-coke sert, par l'intermédiaire d'un couloir, à faire passer le pain de coke, pour tomber dans le wagon du coal-car (également appelé *loco*).



Fig 12 : Coke après sa sortie du four ou défournement.

Le coal-car va ensuite dans une tour d'extinction dans laquelle le coke sera refroidi par aspersion d'eau. Ce refroidissement s'accompagne d'un fort dégagement de vapeur d'eau puisque ce sont environ 80 m³ d'eau (2 m³ d'eau sont nécessaires pour éteindre 1 tonne de coke à 1 000 °C) qui sont déversées en 1 à 2 minutes, le tiers environ s'échappe en vapeur.

Un autre rôle de cette extinction à l'eau est de retirer du soufre du coke, qui est un élément particulièrement gênant en métallurgie, lorsque le coke est utilisé dans les hauts fourneaux.

Le refroidissement s'accompagne d'une fragmentation en morceaux de diverses tailles. Avant son utilisation, il est criblé afin de trier les morceaux en fonction de leur taille.

d) Récupération et traitement des matières volatiles

La fabrication de coke s'accompagne de l'émission d'un certain nombre de matières volatiles : Gaz (dihydrogène, méthane et divers composants minoritaires comme l'acétylène, l'éthylène, les oxydes de carbone), benzène et goudron de houille.

À la sortie du four ces matières sont à une température d'environ 800 °C. Le gaz est refroidi par aspersion d'eau. Les gaz et les matières sont séparés, lavés. Elles sont ensuite valorisées soit par combustion des gaz directement dans l'usine sidérurgique soit par transformation chimique.

Le goudron est traité par distillation et traitement chimique des huiles obtenues. On peut ainsi obtenir des produits comme le benzène, le toluène, le phénol, le crésol, la naphthaline, etc. Toutes ces transformations étaient à la base de la carbochimie du charbon qui a perdu de l'importance au profit de la pétrochimie à partir des années soixante.

La cokéfaction du charbon appelée parfois également distillation du charbon fut aussi utilisée pour la fabrication du gaz d'éclairage. Son utilisation prit de l'importance après la découverte en 1885 par Carl Auer von Welsbach du manchon à incandescence qui permit son utilisation comme moyen d'éclairage⁴. Son utilisation comme moyen d'éclairage disparut à la suite du développement de l'électricité. [13]

Alors on peut distinguer 3 étapes principale de production sont :



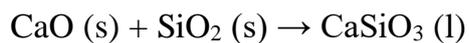
Fig 13 : Schéma générale de procédés.

II 1-3 Les fondants

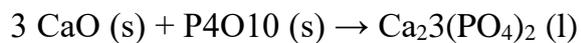
Les fondants sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte. Comme fondants on utilise le plus souvent le calcaire Ca CO_3 et la chaux CaO et très rarement la dolomite $\text{MgCO}_3 \cdot \text{Ca CO}_3$. [14]

Le calcaire ou la chaux s'utilisent dans l'industrie sidérurgique pour leur action fondante qui permet de réduire la concentration d'impuretés dans l'acier (principalement la silice et l'alumine, mais aussi le soufre, phosphore) en donnant lieu à ce qui est appelé laitier. Pour cela, de l'oxygène est soufflé à travers le fer fondu, ce qui entraîne la diminution du taux de carbone. En revanche, le silicium et le phosphore forment des oxydes qui, par réaction avec l'oxyde de calcium additionné donnent lieu à des composés stables de silicates de calcium et de phosphates de calcium qui sont éliminés sous forme de scories. [15]

Élimination de la silice



Élimination du phosphore



II.1.4 Le haut-fourneau

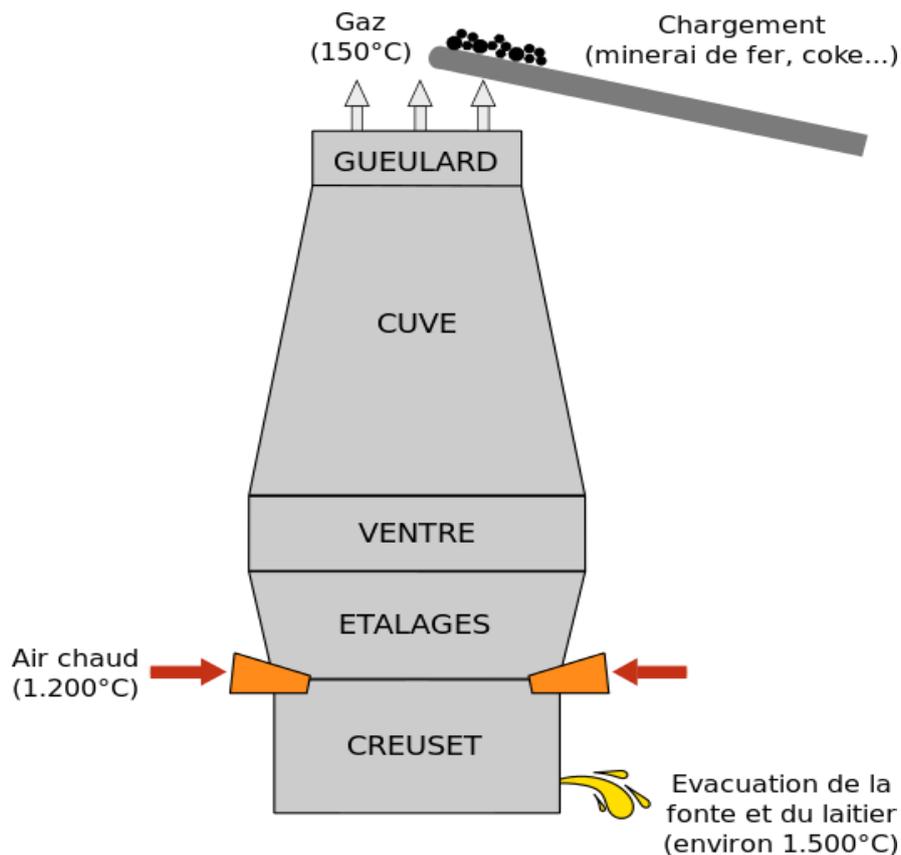


Fig 14 : Schéma descriptif de haut-fourneau

Le haut-fourneau est un four à forme circulaire destiné à l'élaboration de la fonte. Son espace de travail se compose du bas vers le haut des parties suivantes :

- 1- 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).
- 2- 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- éléments de refroidissement du blindage métallique.
- 8- fondation.
- 9- minerais de fer + fonte.
- 10- coke.
- 11- évacuation des gaz.
- 12- tuyère

➤ **Exemple de composition d'une charge destiné au haut fourneau**

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

Tab 03 : La composition d'une charge introduit et les produits obtenus.

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
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

La charge avant d'être introduite dans le haut-fourneau subit une préparation au préalable comme il est indiqué sur la figure 15.

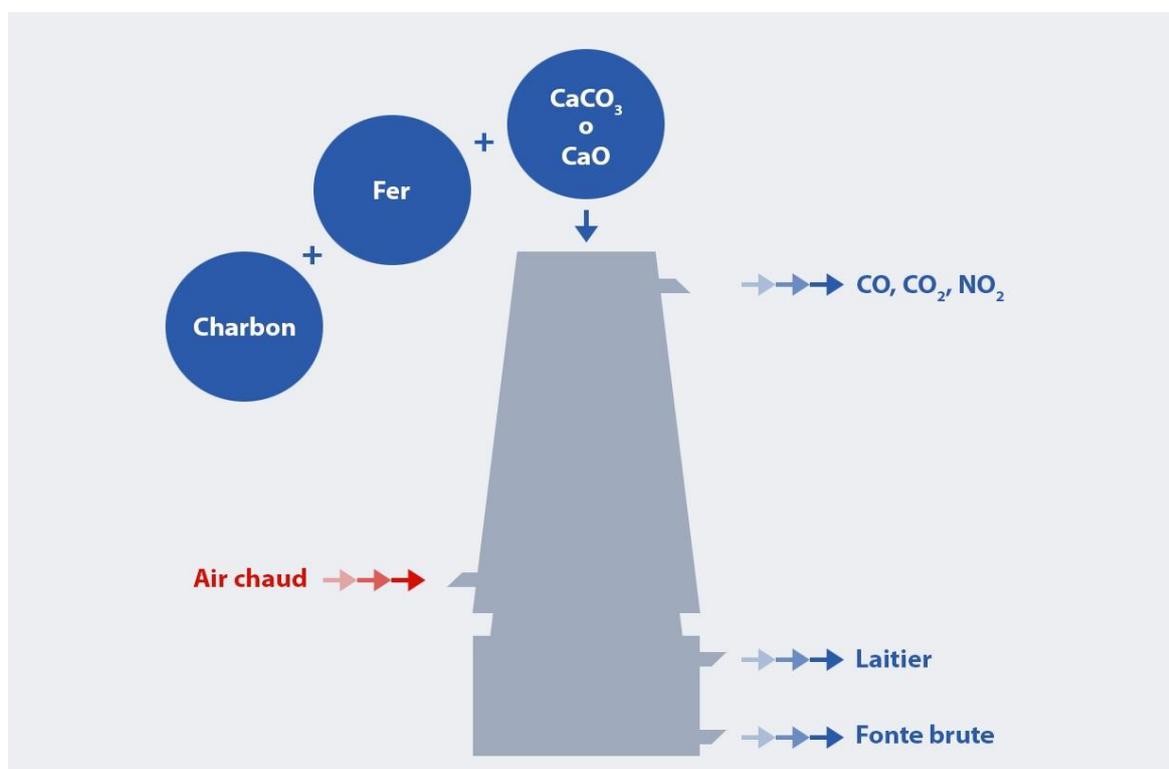


Fig 15 : Schéma de procédé.

II.2 Procédé de fabrication

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 :

a) 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.

b) 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 énergique 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 est plus grande, plus il est difficile à le réduire de ces oxydes.

Il existe deux types de réductions :

- 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

Les réactions principales de réduction se déroulant lors du processus métallurgique de haut-fourneau. 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, 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.

A 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. [16]

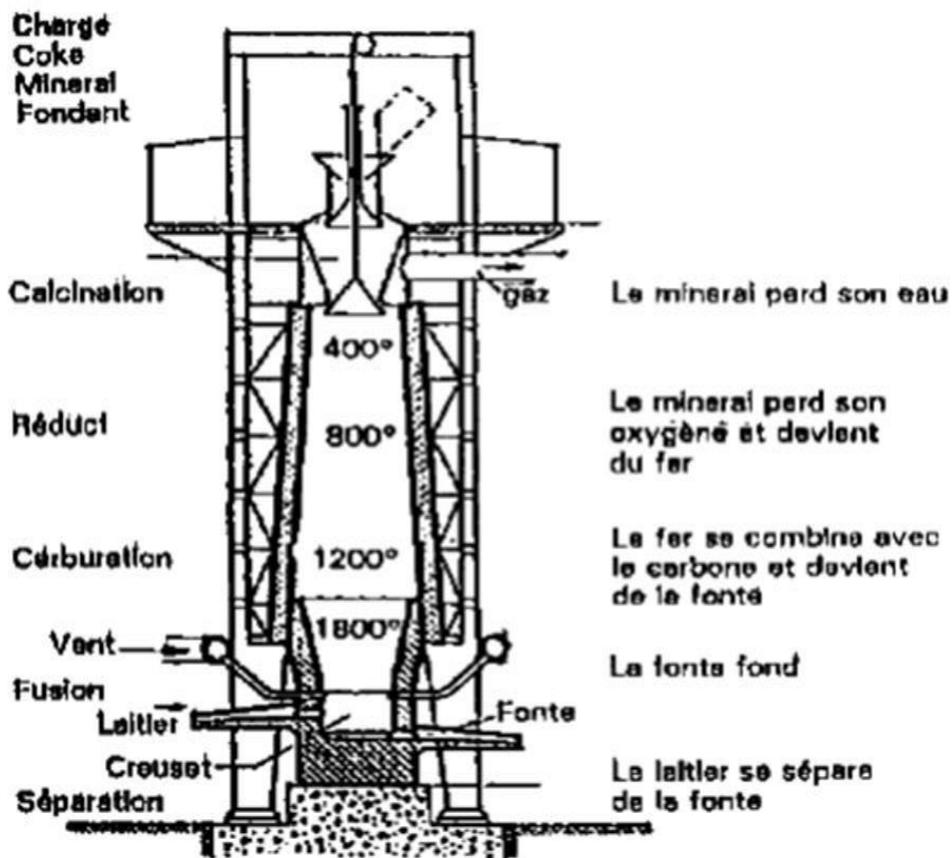


Fig 16 : Les étapes de fabrication de la fonte.

**CHAPITRE III : UN
REGARD A L'INTERIEUR
DU FOUR**

Introduction

Qu'est ce qui passe dans le four du l'entrée de l'air chaud jusqu'à la sortie par le gueulard ? Ce chapitre explique la réponse de cette question

L'approche de ce chapitre est de suivre les gaz montent à travers le haut fourneau, à partir du moment où l'air chaud entre par les tuyères jusqu'à ce que le gaz sort du gueulard. La fonction importante des gaz ascendants est le transfert de chaleur vers la charge solide descendant. Cela provoque le refroidissement des gaz pendant leur ascension, comme indiqué par les profils de température de la Fig. 17. Ce diagramme fournit une cadre pour discuter des réactions des hauts fourneaux et des emplacements des réactions.

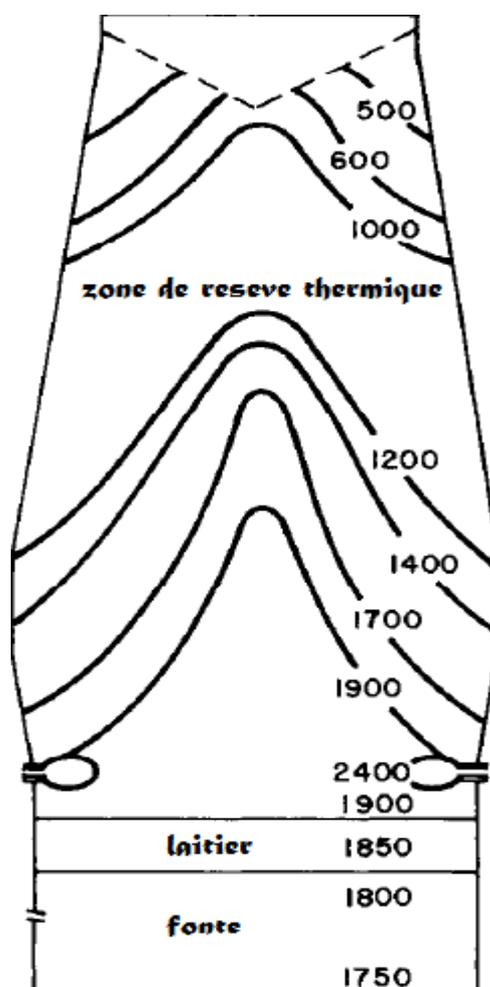


Fig. 17. Températures des gaz dans le haut fourneau telles qu'interprétées à partir des données des hauts fourneaux de Nakamura (1978).

III.1 Comportement devant les Tuyères :

L'air chaud entre dans le four par quinze à quarante tuyères autour de la circonférence du haut du creuset. Il entre à une vitesse de 200 à 300 m.s⁻¹ (Hashimoto, 1977) et une pression de 2 à 4 atmosphères, la pression étant nécessaire pour pousser les gaz réducteurs à travers le solide et de surmonter la «pression maximale» du four.

La vitesse élevée de l'aire chaude dégage un chemin «raceway» de gaz et de coke qui déferle rapidement devant chaque tuyère (Fig. 17). Les chemins s'étendent 1 à 2 m vers l'extérieur (Nakamura, 1978) et ils sont facilement pénétrés par une barre poussée à travers la tuyère. Ils sont délimités devant, sur les côtés et ci-dessous par des régions plutôt fermes de coke en morceaux qui a contourné l'oxydation lors de sa descente à travers le haut fourneau. L'études des hauts fourneaux éteints indiquent que ce coke se prolonge vers le bas dans le fer fondu et peut-être même aux briques du creuset.

Les chemins créés par la consommation de coke par l'air chaud sont également délimités par du coke en morceaux, mais dans ce cas, il est mal tassé en raison de la montée rapide de l'air chaud entre les pièces. Les morceaux de coke les plus bas de cette zone tombent périodiquement les chemins à consommer par l'air entrant, et donc l'ensemble le lit descend toujours progressivement pour être réapprovisionné en haut avec du coke par le haut.

Le principal processus physico-chimique dans cette région est le transfert de la chaleur des gaz ascendants aux morceaux de coke descendants et des gouttelettes de fer et de scories.

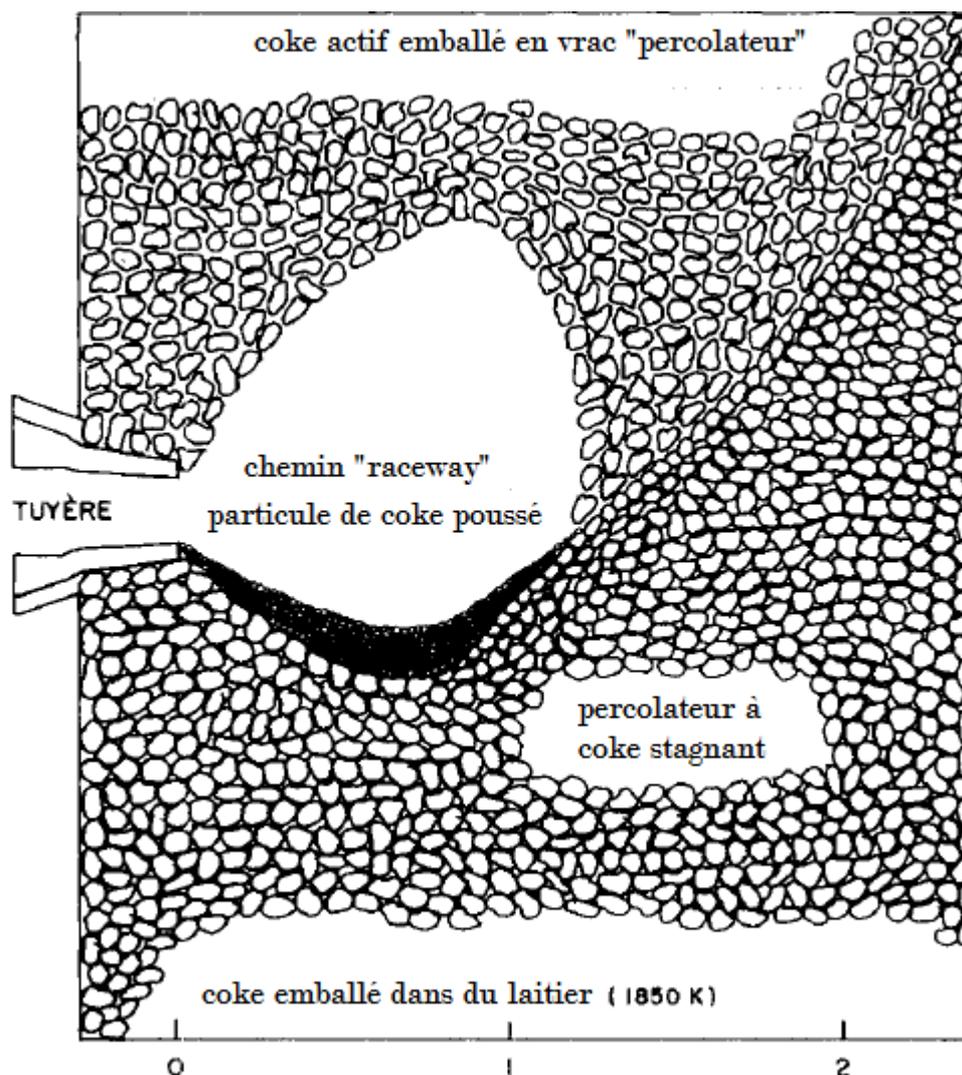


Fig. 18. Vue schématique de la région des tuyères du haut fourneau, (Nakamura, 1978).

III.2 Réactions dans le creuset, Tuyères, les chemins de l'air chaud et l'étalages :

La discussion ci-dessus indique que presque tous les matériaux solides dans le haut de creuset et l'étalages sont du coke, du fer liquide et des scories traversent le coke pour former des fontes au fond de creuset, pour être prélevé périodiquement ou en continu du four. Pendant cette percolation, la réduction est finalisée, le fer devient saturé de carbone, et $(CaO)_3$, P_2O_5 , MnO et SiO_2 sont partiellement réduits pour devenir des impuretés (Mn,P, Si) dans le métal.

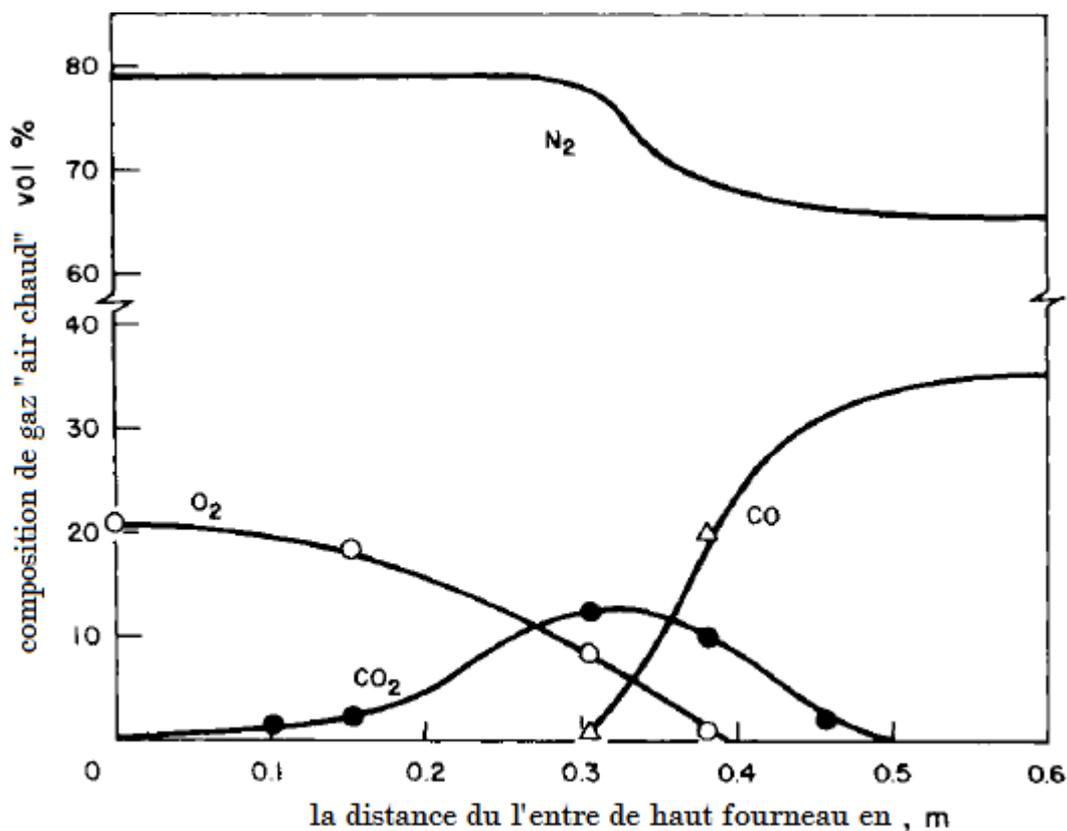


Fig. 19. Composition du gaz directement devant une tuyère expérimentale de haut fourneau (Brunger, 1970).

La combustion du coke donne CO₂ et le CO₂ réagit avec le coke pour former du CO.

Lorsque l'oxygène frappe le coke pour la première fois dans les canalisations des tuyères, il réagit immédiatement pour former du CO₂, comme le montre la figure 20. Ce CO₂ réagit alors de plus avec du coke pour former du CO par la réaction:



Ce qui, aux températures du creuset et de bas d'étalages (1800-2400 K), arrive presque à son achèvement. Les gaz de tuyère montent ensuite à travers la zone de «coke actif».

III.3 La zone de fusion

Les examens des hauts-fourneaux ont montré que la région du coke emballé en vrac au-dessus des chemins de l'air chaud est délimitée au-dessus par une « zone de fusion »

(Fig.20) constituée de couches alternées de coke et fusion de gangue et fer, la structure en couches ayant persisté par rapport à la séquence de charge d'origine.

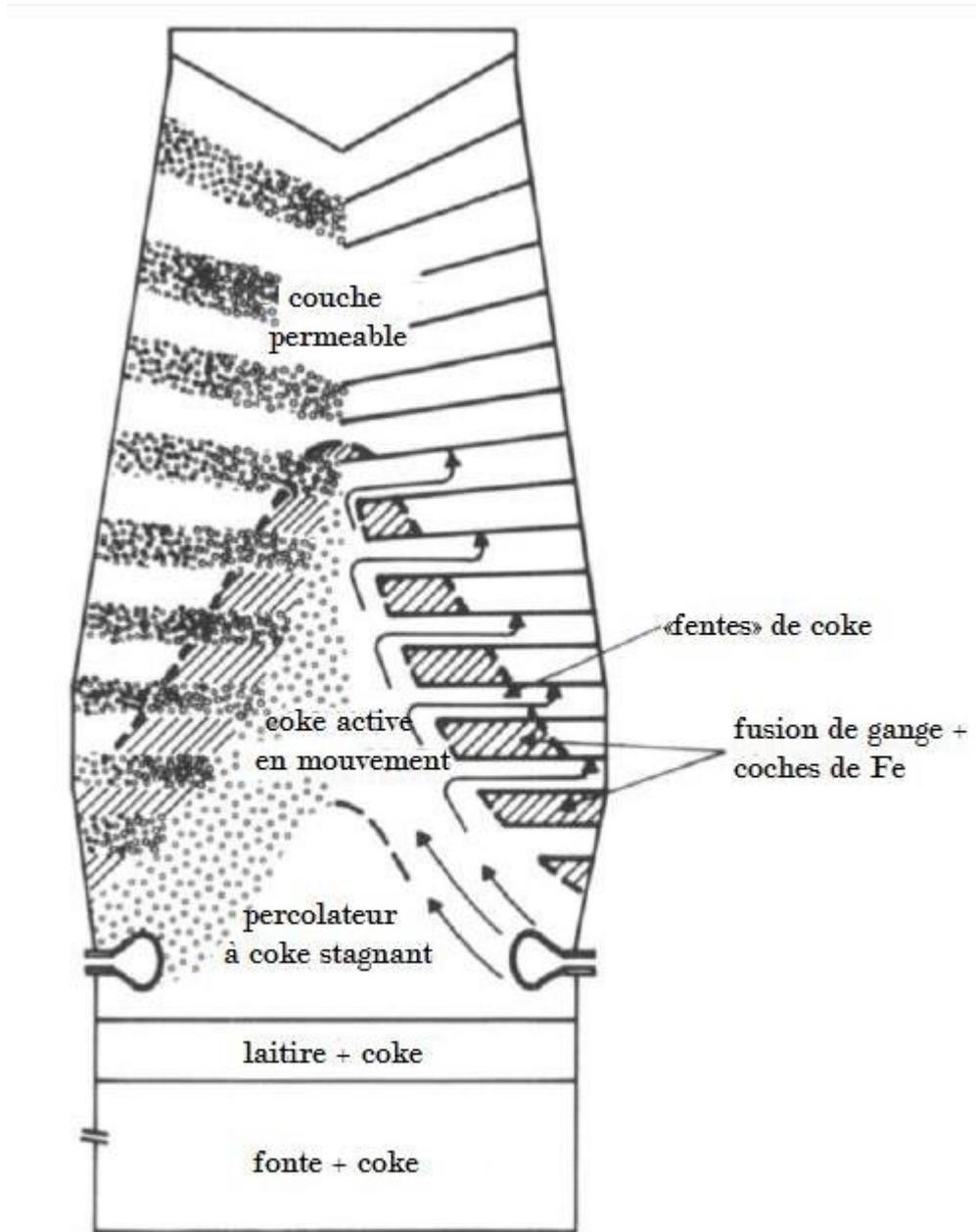


Fig. 20. Dessin descriptif de la structure interne d'un grand haut fourneau (Nakamura, 1978).

Cette région qui est en forme de U inversée est importante pour plusieurs raisons :

- la pression de gaz en dessous, tend à supporter la charge du haut fourneau.
- ses couches de coke ont tendance à répartir le gaz réducteur radialement à travers le four.

Ce dernier effet se produit parce que la gangue et le fer fondus sont pratiquement imperméables au flux d'air chaud, de sorte que les gaz ascendants doivent passer horizontalement à travers les « fentes » de coke pour passer dans le haut du haut fourneau.

Étant donné que tout le gaz d'étalage doit traverser les fentes de coke dans la zone de fusion, il est impératif que le coke dans cette région offre aussi peu de résistance que possible à l'écoulement de gaz. Cela nécessite que le coke reste sous forme de grumeaux substantiels bien en bas dans le four et c'est la raison principale pour laquelle le coke doit être capable d'éviter l'écrasement et la rupture pendant sa descente à travers le four.

Le principal processus physique dans la zone de fusion est la fusion du métal et des scories, en utilisant la chaleur dans le gaz ascendant. Le laitier à ce stade se compose principalement de gangue et d'oxydes de flux, c'est-à-dire qu'il ne contient pas encore de cendres de coke qui sont pour la plupart libérées dans les zones de tuyère. Il est presque dépourvu d'oxyde de fer (Nakamura, 1978) au moment où il est complètement fondu (c'est-à-dire au bord inférieur de la zone de fusion), mais en tout état de cause, tout oxyde de fer qu'il pourrait contenir sera entièrement réduit pendant sa descente à travers les percolateurs à coke.

III.4 Réduction au-dessus de la zone de fusion

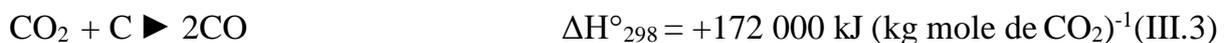
Au-dessus de la zone de fusion, la charge commence à inclure de l'oxyde de fer solide, en particulier de la wustite, $Fe_{0,947}O$, et donc à ce stade, la charge se compose de couches alternées de coke et gangue solide et oxydes de fer solide « wustite » $Fe_{0,947}O$ et fer solide.

Le gaz entrant dans cette région de charge mixte est monté directement du lit de coke sous la zone de fusion, de sorte que sa composante carbonée est pratiquement tout le CO. Deux réactions cycliques ont lieu dans cette charge mixte Région :

Réduction :



Gazéification du coke:



Comme le montre schématiquement la figure 21

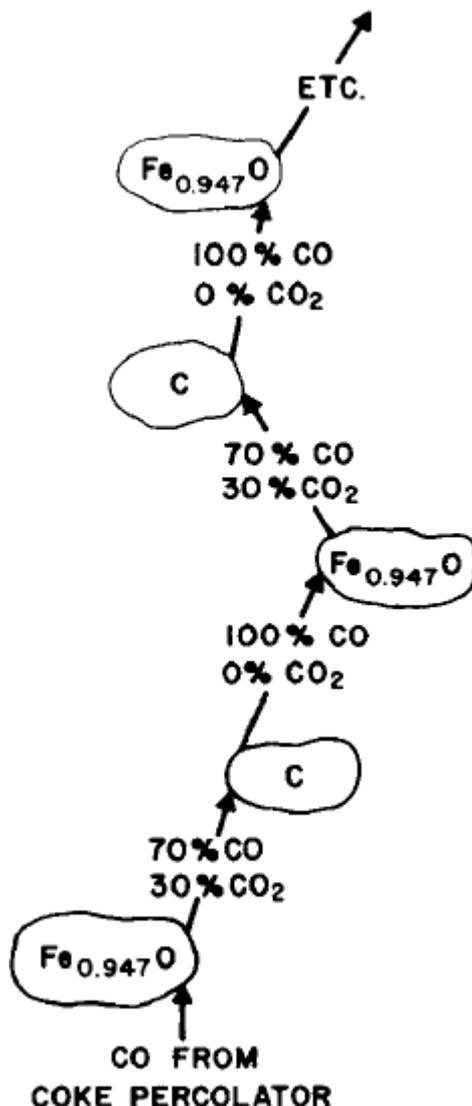


Fig. 21. Vue schématique de la réduction cyclique et de la gazéification du coke juste au-dessus de la zone de fusion.

La réaction de gazéification du coke (III.1) est hautement endothermique et elle provoque un refroidissement rapide des gaz ascendants. La réaction de réduction (III.2) est légèrement exothermique mais son dégagement de chaleur ne compense pas l'effet de refroidissement de la réaction (III.1), avec pour résultat net que la température du gaz ascendant chute nettement dans cette région.

III.5 Cinétique de la réaction de gazéification du coke

La vitesse de réaction (III.1), la gazéification du coke, ralentit nettement lorsque la température diminue. Le résultat est que la gazéification du coke s'arrête virtuellement en dessous d'environ 1200 K, ce qui signifie que le schéma de réaction cyclique illustré sur la figure 21 ne peut pas avoir lieu en dessous de cette température.

Ainsi, une fois que les gaz montants ont été refroidis en dessous de 1200 K, un peu plus de CO est régénéré. Toute réduction subséquente plus haut dans le puits dépend du CO produit sous l'isotherme 1200 K.

III.6 Réactions dans les régions au-dessus de l'isotherme 1200 K

Alors que le gaz poursuit sa montée au-dessus de l'isotherme 1200-K, le composant CO continue de réagir avec la wustite pour former du fer solide et du CO₂, se rapprochant ainsi de l'équilibre pour la réaction:



À 1200 K, le rapport d'équilibre $p_{\text{CO}} / p_{\text{CO}_2}$ pour cette réaction est de 2,3 et la partie carbonée du gaz contiendrait, à l'équilibre, 70% CO et 30% CO₂ indépendamment de la pression du four et des concentrations des autres gaz (N₂, H₂, H₂O).

La réaction (III.2) est légèrement exothermique et, par conséquent, les gaz ne se refroidissent pas pendant leur ascension à travers cette région. Il s'agit de la partie inférieure de la zone à température constante ou «réserve thermique» du four.

III.7 Réduction des oxydes supérieurs

Le gaz en hausse devient finalement trop faible en CO pour réduire considérablement plus de wustite en fer. Cependant, il est encore suffisamment fort pour réduire le Fe₃O₄ en wustite FeO par la réaction:



Pour laquelle le rapport d'équilibre $p_{\text{CO}} / p_{\text{CO}_2}$ à 1200 K est de 0,43 et les proportions d'équilibre de CO et CO₂ sont respectivement de 31% et 69%.

Pour que le haut fourneau fonctionne à l'état stable, la quantité de wustite produite par la réaction (III.3) doit, bien entendu, être la même que la quantité de wustite

réduite par la réaction (III.2); et il y a en fait plus qu'assez de CO provenant de la zone wustite / Fe pour atteindre cet objectif. Ceci est dû au fait:

(a) chaque mole de CO convertie en CO₂ par réaction avec Fe₃O₄ produit 3,8 moles de Fe_{0,947}O;

(b) la concentration de CO requise pour la réduction de Fe₃O₄ / Fe_{0,947}O est bien inférieure à celle requise pour la réduction de Fe_{0,947}O / Fe, soit 31% contre 70%.

Cet excès de CO se traduit par:

(a) création d'une région verticale dans le four où les oxydes supérieurs ont déjà été réduits en wustite (Kanfer, 1974) mais où le gaz ne peut pas réduire des quantités importantes de wustite en fer;

(b) restriction des oxydes supérieurs non réduits à une petite hauteur près du sommet du four, vers le quart supérieur de la gaine. Cette zone n'a qu'une profondeur verticale suffisante pour que son taux de production de wustite soit égal au taux de réduction de wustite plus bas dans le four, c'est-à-dire qu'elle est suffisamment peu profonde pour que le CO ne traverse la zone que partiellement réagi.

La région où le matériau contenant du fer est pratiquement toute la wustite est appelée «zone de réserve chimique». Parce qu'il y a très peu de réaction dans cette zone, c'est aussi une région de température à peu près constante. Il constitue en fait la partie supérieure de la «zone de réserve thermique».

Réduction de l'hématite:



A lieu avec Réaction (III.3) dans le quart supérieur de l'arbre. La réaction (III.4) peut se dérouler à des rapports pCO / pCO₂ très faibles (<10 ~ 4) afin que le gaz puisse réagir presque complètement au CO₂ si suffisamment de Fe₂O₃ était présent et si suffisamment de temps de réaction était disponible.

III.8 Le quart supérieur de la cuve et le gaz de sortie

Le gaz de sortie d'un haut fourneau compris entre 21-25% CO, 20-22% CO₂ (le reste H₂, H₂O, N₂) qui a un rapport pCO / pCO₂ intermédiaire entre l'équilibre ratios de réduction de la wustite en fer, réaction (III.2) et réaction de Fe₃O₄ avec la wustite,

réaction (III.3). Cela est conforme à l'affirmation selon laquelle il y a plus de CO provenant de la zone wustite / Fe du haut fourneau que ce qui peut être utilisé pour la réduction des oxydes supérieurs en wustite.

La situation dans le quart supérieur de cuve est, par conséquent, que du Fe₂O₃ est ajouté en haut tandis que des gaz réducteurs de force moyenne entrent en bas. C'est une zone d'oxydes mixtes, wustite, Fe₃O₄ et Fe₂O₃, où se produit la réduction des oxydes supérieurs en wustite. En fait, des boulettes individuelles de minerai ou des morceaux d'aggloméré peuvent contenir les trois oxydes.

La température du gaz chute rapidement lorsqu'il traverse cette zone supérieure en raison (i) du refroidissement par les solides entrants; (ii) l'évaporation de l'humidité; et (iii) la nature endothermique nette de la réduction des oxydes supérieurs en wustite, c'est-à-dire



III.9 Temps de résidence « séjour »

Les discussions ci-dessus n'ont donné aucune idée des temps de réaction disponibles pour que les solides et les gaz réagissent. Les vitesses spatiales des gaz de haut fourneau sont de l'ordre de 2 à 5 m s⁻¹ tandis que leurs vitesses réelles sont de 30 à 60 m s⁻¹. Les temps de séjour du gaz sont donc de l'ordre de 1 seconde seulement et il est donc impératif de prévoir des conditions qui conduisent à des taux de réduction élevés (par exemple un bon contact gaz / solide) pour un fonctionnement efficace du haut fourneau.

Le taux de descente des solides est beaucoup plus lent et le temps de séjour moyen d'un atome de fer (du minerai à la fonte en fusion) est de l'ordre de 5 à 8 heures (Higuchi, 1974). Ainsi, un temps considérable est prévu pour que chaque particule de minerai réagisse. Étant donné que chacune des zones de réduction de wustite / Fe et Fe₂O₃ / Fe₃O₄ / wustite occupe environ un quart du four, une boulette de minerai ou un morceau d'aggloméré dispose de 1 à 2 heures pour chacune des deux principales étapes de réduction.

III.10 L'arrangement de la charge

Les hauts fourneaux en fer sont chargés de couches alternées de coke et de minerai plus flux. Les couches ont normalement une épaisseur de 0,5 à 1 m, les fours de plus grand diamètre ayant tendance à avoir les couches les plus épaisses. Comme le montre la figure 20, la structure en couches persiste jusque dans la zone de fusion.

Une attention considérable a été accordée ces dernières années à une répartition uniforme des couches à travers le four, l'objectif principal étant de produire des conditions d'écoulement de gaz uniformes dans la cheminée. Une telle uniformité de l'écoulement évite les régions localisées où le gaz du four pourrait monter si rapidement sous la charge que:

- (a) sa capacité de réduction n'est pas pleinement utilisée,
- (b) sa chaleur n'est pas efficacement transférée à la charge.

La stratification contrôlée peut également être utilisée pour dévier les gaz chauds de la coque du four où des températures excessives pourraient réduire la durée de vie du réfractaire. [17]

**CHAPITRE IV: LE
MODELE
MATHEMATIQUE DU
HAUT FOURNEAU ET
SON APPLICATION**

Introduction

On a vu que le haut-fourneau est un réacteur complexe: pour comprendre ce qui s'y passe, il ne suffit pas d'observer les entrées. Il faut utiliser l'analyse de gaz sortant pour savoir ce qui se passe, avoir des indicateurs pour réagir assez tôt.

Nous avons évoqué l'indicateur Oméga. Il est calculé par MMHF, un modèle mathématique conçu sur la base du modèle de Michard. Nous allons ici voir comment il fonctionne et savoir quand peut-on l'utiliser.

MMHF contient des équations reliant des données connues (capteurs: T° du vent, analyse gaz) et inconnues (oméga, production). En résolvant le système, on obtiendra les valeurs des inconnues. Ce que MMHF fait chaque minute.

Les équations qui traduisent le MMHF sont basées sur la conservation de la masse **bilan matière** et la conservation de l'énergie **bilan thermique ou enthalpie** "Dans un système, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme".

IV.1 Modèle Mathématique de Haut-Fourneau MMHF Temps réel

Dans le pilotage de l'HF, MMHF est utilisé dans un sens: à partir des données d'entrée (connues), on va calculer des indicateurs en temps réel (inconnus).[18]

IV.1.1 Historique De Modèle

Développé au début des années 1960

- Suite des travaux de Michard : découpage du haut fourneau en 2 zones
- En 1964: une première version du modèle (pour les "ordinateurs" de faibles capacités ...)
- 1974 : données thermodynamiques
- 1981 : WP négatifs, apport d'énergie électrique dans la zone d'élaboration, injection minérale aux tuyères, élaboration directe de tableaux dérivés
- 1994 : revampement dans le cadre SACHEM
 - o possibilité d'enfourner de la fonte recyclée
 - o intégration du modèle CLEF
 - o version off-line sur VAX,

IV.1.3 Principe du modèle

Écrivez et résolvez un ensemble d'équations linéaires donné par :

- bilans massiques et énergétiques.
- certaines contraintes imposées par l'utilisateur.

Le système d'équations:

- le nombre d'équations possibles est supérieur aux variables inconnues.
- L'utilisateur doit choisir certaines équations lors de la définition de la valeur des paramètres (contraintes imposées par l'utilisateur).
- Certaines variables peuvent être imposées: le nombre d'équations doit être diminué d'autant.

IV.1.4 Les variables du modèle

a. Les composantes

- Variables caractéristiques du point de fonctionnement du haut fourneau repéré dans un espace R43 (inconnues du système d'équations)
 - » La connaissance de 43 variables définit complètement le point de fonctionnement du haut-fourneau
- Variables extensives : kg/tf, Nm³/tf, MJ/tf sauf particularités :
 - » W_p : atO/atFe
 - » Temps Oper : h/tf (pour linéarité des équations avec production)

b. Les contraintes

- Conditions imposées à un ensemble de composantes (équations du système)

c. Les paramètres de composition :

- Analyse, température,... etc.

d. Variables complémentaires :

- données thermodynamiques, constantes physiques,...etc.

IV.1.5 Les entrées du modèle

a. Des grandeurs issues directement de mesures

- Le conditionnement vent (débit, température, humidité...)
- L'analyse et la température du gaz de gueulard

b. Des grandeurs élaborées

- Mises au mille (coke, charbon, O₂, vent...), OmegaP
- Caractéristiques de l'enfournement minéral nécessitant un bilan matières
 - » YZeroP, FerMetal, Fer2Plus, CCaCO₃, CFeCO₃, Hydrates, Humidité, Laitier, LZéro

c. Quelques subtilités

- Analyses coke et charbon sur sec mais quantités de coke SEC et de charbon Humide
- Les teneurs en CO et CO₂ du gaz comptent pour une seule variable (RCO)
- Fer2Plus : fer sous forme de wüstite
 - » fer des minerais pré-réduits et du coke
- CCaCo₃ et CFeCO₃ : en kg carbone / tonne de fonte
- Lzéro : silice de la gangue non agglomérée
 - » silice contenue dans les minerais calibrés, les boulettes acides, les additions minérales et les minerais pré-réduits

IV.1.6 Conditions d'utilisation du modèle

a. Les composantes : Ce sont les inconnues du système d'équations

43 composantes :

- 13 explicites : peuvent être fixées par l'utilisateur
- 30 implicites : inconnues par l'utilisateur

b. Les contraintes : Ce sont les équations du système

56 équations possibles :

- 29 implicites : équations systématiques (bilans matières et thermiques)

- 27 explicites : équations complémentaires pouvant être fixées par l'utilisateur.

43 - 29 = 14 inconnues à définir

- » en fixant certaines des 13 composantes explicites.
- » et/ou en imposant certaines des 27 contraintes explicites.

IV.2 Les utilisations possibles de MMHF

IV.2.1 Analyse du fonctionnement du haut fourneau (temps réel)

A partir des mesures directes réalisées sur le haut fourneau (Conditionnement vent, analyse et température gaz gueulard), Calculer des caractéristiques du point de fonctionnement du HF (Efficacité de réduction Ω_P , production fonte, mises au mille combustibles, température de flamme, pertes thermiques et répartition ZE/ZP, W_u ...). [19]

a. Utilisation on-line

- Suivi de la marche de l'HF
- Production instantanée pour la régulation du débit de charbon
- W_u pour le réglage thermique

b. Utilisation off-line

- Dépouillement de périodes de marche
- Bilans mensuels
- Validation de la cohérence des mesures par comparaison des productions et mises au mille coke calculées et issues des enfournements.

IV.2.2 Calcul prévisionnel

Lorsqu'on veut atteindre un nouvel objectif de marche (production à atteindre, niveau d'injection, PCI du gaz gueulard), il faut savoir à quel niveau fixer les entrées (débit vent, suroxygénation). On ne peut pas utiliser MMHF temps réel.

A partir de grandeurs caractéristiques estimées ou recherchées (Ω_P , mises au mille combustibles, pertes thermiques et répartition ZE/ZP, production, température de

flamme), Calcul des données de marche du point de fonctionnement du haut-fourneau (Débit vent, O₂ vent, analyse et température gaz gueulard...).

IV.2.3 Les tableaux dérivés

On veut connaître l'effet d'une variation de paramètre, par exemple -10° de vent, pour savoir comment la compenser. Comment faire si on n'a pas MMHF prévisionnel avec soi ? On utilise le tableau dérivé.

On veut connaître l'effet d'une erreur sur un capteur (analyse gaz, débit vent). On utilise le tableau dérivé d'erreur.

IV.2.3.1 Faciliter les calculs en utilisant le tableau dérivé

Tab 4 : le tableau de dérivé 1.

Tableau dérivé MMHF P3
mars-99

ENTREES	Référence	Delta	Unité	SORTIES		RCO	MM coke sec
				Production	T° gueulard		
				3967	164	52.2	309
Débit vent	158.0	+10	kNm ³ /h	+272	-2.41	-1	-1.05
% O ₂ circulaire	23.13	+1	%	+227	-21.40	+33	-0.20
Température vent	1188	+10	°C	+19	-2.16	+6	-1.01
MM Charbon	136	+10	kg/tf	-25	+10.86	-18	-9.01
MM Fioul	7	+10	kg/tf	-25	+12.77	-28	-10
Omégap	-0.014	+0.010	at O/Fe	-21	+0.69	+2	+2.93
Humidité du vent	7.7	+5	g/Nm ³	-14	+4.61	-22	+2.50
Pertes thermiques totales	43935	-5000	MJ/h	+36	-4.18	-2	-1.95
Rendement H ₂	53.57	+5	%	+0	-3.79	+0	+0.00

Charbon PINNACLE
Coke 78% Sérémange, 22% Chinois

Prenons cet exemple de tableau dérivé "minimal". Les entrées, ou actionneurs, figurent à gauche; les sorties, ou indicateurs, figurent à droite. Nous sommes dans la situation de référence.

Comment compenser une baisse de 10° du vent ?

1. La température est celle de référence: 1188° de moyenne.
2. On perd 10° (1178°)
3. Dans la colonne production, on lit +19t; on perd 19t de production(négligeable);
4. On observe que la T° de flamme baisse de 6°, logique;
5. Dans la colonne MM coke sec, on lit -1,01kg. On devra rajouter 1kg de coke pour se maintenir.

Mais comment se sert-on du tableau si on perd 50° sur la température du vent, si on n'est pas à la température de référence, si on fait aussi varier l'humidité du vent ?

IV.2.3.2 Validité du tableau dérivé

Vous pouvez donc multiplier des variations et ajouter les effets: l'approximation est bonne. Attention toutefois à ne pas être trop loin de la marche de référence (débit vent, surox et injection semblables).

Tab 5 : le tableau de dérivé 2.

Tableau dérivé MMHF P3

ENTREES	Référence	Delta	Unité	SORTIES				
				Production	T° gueulard	T° flamme	RCO	MM coke sec
				2780	135	2195	52.8	370
				t	°C	°C	%	kg/tf
Débit vent	120.5	+10	kNm³/h	+267	-2.45	-3	0.16	-2.67
% O2 circulaire	22.17	+1	%	+175	-23.20	+35	0.08	-1.08
Température vent	1187	+10	°C	+14	-2.41	+6	0.07	-1.17
MM Fioul	79	+10	kg/tf	-20	+12.95	-27	-0.16	-10
Omégap	-0.020	+0.010	at O/Fe	-15	+0.91	+1	-0.75	+2.98
Humidité du vent	9.07	+5	g/Nm³	-11	+5.38	-23	-0.27	+2.77
Pertes thermiques totales	69488	-5000	MJ/h	+31	-2.30	-3	0.15	-2.51
Rendement H2	49.32	+5	%	+0	-4.54	+0	-0.89	+0.00

Le tableau dérivé permet d'estimer l'impact d'une action sur les indicateurs. Il est très utile pour obtenir l'ordre de grandeur des corrections de coke à effectuer pour maintenir stable le fourneau lors de problèmes (baisse de la T° et de l'humidité du vent, de l'oméga).

IV.2.3.3 Tableau d'erreur

MMHF produit également un autre tableau dérivé qui estime l'effet d'une dérive d'un capteur (analyse gaz) sur les indicateurs habituels. En voici un extrait, pour vous rendre compte de l'impact d'une erreur sur l'analyse de gaz: [20]

Tab 6 : Exemple de tableau d'erreur

		Production 5402 tf/j	MMcoke 314 kg/tf	OmégaP $-13,8 \cdot 10^{-3} \text{atO/atFe}$	Wu 1457 MJ/tf
Débit vent (220)	220 +10kNm ³	+240	-0,03	0	0
%CO-G	20,59 +0,5%	+159	+0,5	+14,8	-121
%CO2-G	22,92 +0,5%	+231	-2,9	+1,1	-135
% H2-G	3,12 +0,5%	+14,8	+3	+18	-44

IV.3 Le modèle mathématique du haut-fourneau "Version Process" :

Dans ce chapitre on a visé sur le MMHF version process, et donné et expliquer comment le faire les calcule, Version type du début des années 1980, Elle réalise une synthèse de l'information disponible en se basant sur l'analyse du gaz de gueulard.

A partir des donné on tire des résultats, les donné nécessaire pour ce MMHF sont :

Données	Notation	Unité
Analyse gaz gueulard sec		
. teneur en CO	CO	%
. teneur en CO2	CO2	%
. teneur en H2	H2	%
Caractéristiques de la charge		
. teneur en carbone du coke	CK	%
. teneur en hydrogène du coke	H2K	%
. température du coke dans la cavité	TK	°C
. degré d'oxydation des charges non métalliques	Yp0	atO/atFe
. quantité de fer métallique dans la charge ferrifère	f0	kgFe/tFe
. quantité de wustite dans la charge ferrifère	f1	kgFe/tFe
Conditionnement vent		
. débit de vent naturel sec	Qv	Nm3/h
. température du vent	Tv	°C
. humidité du vent	Hv	g/Nm3
. teneur en oxygène du vent ou oxygène additionnel dans le vent	O2v O2s	% Nm3 O2/kNm3
. taux d'injection	Jv	g/Nm3
Conditionnement vent (suite)		
. analyse et caractéristiques thermiques de l'injection		
- teneur en Carbone de l'injection	CJ	%
- teneur en Hydrogène de l'injection	HJ	%
- teneur en Oxygène de l'injection	OJ	%
- teneur en Azote de l'injection	NJ	%
- chaleur de cracking de l'injection	QJ	kcal/kg
- température de l'injection	TJ	°C
Qualité de la fonte et du laitier		
. teneur en Fer de la fonte	Fef	%
. teneur en Carbone de la fonte	Cf	%
. teneur en Silicium de la fonte	Sif	%
. teneur en Manganèse de la fonte	Mnf	%
. teneur en Phosphore de la fonte	Pf	%
. mise au mille laitier	QL	kg/tf
. teneur en Fer du laitier	FeL	%
. teneur en Soufre du laitier	SL	%
Temps opératoire	t	h

Tab.7. les données nécessaires pour l'utilisation de MMHF.

Principaux résultats issus de l'analyse gaz

- Indice de productivité, PI
- Consommation d'agents réducteurs
- Mise au mille coke et injection
 - Mise au mille gaz gueulard
 - Mise au mille de carbone de régénération
- Efficacité de réduction

- écart à l'idéalité de la réduction, w_p
- consommation spécifique de gaz réducteur, μ
- Etat thermique du haut-fourneau, W_u
- Température adiabatique de flamme, T_A

IV.4 Principales étapes des calculs MMHF

- a.** Calcul des bilans matières et thermiques pour 1000 Nm³ de vent sec non suroxygéné :

Bilans matières des principaux éléments :

- Bilan Azote → débit gaz gueulard
- Bilan Hydrogène → H₂O de réduction
- Bilan Oxygène → indice de productivité, PI
- Bilan Carbone et Hydrogène
 - Rendements CO et H₂
 - Écart à l'idéalité de la réduction, w_p
 - Consommation spécifique de gaz réducteur, μ

b. Calculs additionnels :

- Consommations spécifiques (vent, oxygène, gaz gueulard, gaz tuyères, coke, injection, ...)
- Utilisation du carbone (combustion, régénération, carburation de la fonte ...)
- Bilan thermique de la cavité
- Bilan thermique de la zone d'élaboration (W_u 'énergie utile')

IV.4.1 Bilan Azote

Entrées N₂ = Sorties N₂

$$Q_v \cdot N_{2v} + J_v \cdot N_{2J} = Q_g \cdot N_{2g}$$

Q_v : débit vent

N_{2v} : teneur en azote du vent

J_v : taux d'injection (/ vent)

N_{2J} : teneur en azote de l'injection

Q_g : gaz gueulard (sec)

N_{2g} : teneur en azote du gaz

Débit spécifique de gaz, Q_g ($Nm^3 / 1000 Nm^3$ de vent).

IV.4.2 **Bilan Oxygène :**

a. Quantités d'oxygène considérées :

■ Proportionnelles au débit vent

- teneur en oxygène du vent, ou proportion d'oxygène additionnel
- oxygène lié à l'humidité du vent
- oxygène de l'injection

■ Proportionnelles à la production de fonte

- oxygène issu de la réduction des oxydes de fer
- oxygène issu de la réduction des oxydes non-ferreux (RONF)
- formation du silicium, du manganèse et du phosphore de la fonte

b. Méthode de calcul de l'indice de productivité, PI :

■ A partir de l'analyse du gaz de gueulard

- détermination de la quantité d'oxygène venant de la charge ferrifère et sortant du fourneau par $1000 Nm^3$ de vent $\rightarrow A$

■ A partir des caractéristiques de la charge ferrifère et de la qualité fonte

- qualité de la charge ferrifère : Y_{p0} , f_0 , f_1
- qualité de la fonte : Si, Mn, P
- détermination de la quantité d'oxygène issue de la production d'une tonne de fonte $\rightarrow B$

$$PI = A / B \text{ (tf/1000 Nm}^3 \text{ de vent)}$$

PI est déterminé à partir de la réduction des matières

Bilan oxygène :

$$\text{Entrées O}_2 = \text{Sorties O}_2$$

Oxygène de réduction: Calculée en Nm^3 / kNm^3 de vent

$$- 1 - \text{Quantité d'oxygène sortant dans le gaz gueulard : } Q_g \cdot \frac{(0,5 \cdot CO + CO_2)}{100} + \frac{QH_2O_{red}}{2}$$

- 2 - Oxygène du vent naturel + Oxygène additionnel :

$$Q_{O2} = 790 \cdot \frac{O_{2v}}{100 - O_{2v}} \quad \text{Ou} \quad Q_{O2} = 210 + O_{2s}$$

- 3 - Oxygène de l'humidité du vent : $\frac{H_v}{18.2} \cdot 22,414$

- 4 - Oxygène de l'injection : $J_v \cdot \frac{O_{2J}}{100.32} \cdot 22,414$

- 5 - Oxygène issu de la production d'une tonne de fonte = Réduction du fer de la fonte
+ Réduction du fer du laitier + Réduction des oxydes non-ferreux

- Réduction du fer de la fonte : $1000 \cdot \frac{Fe_f}{100} \cdot \frac{1}{55,85} \cdot Y_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 22,414$

- Réduction du fer du laitier : $Q_{laitier} \cdot \frac{Fe_L}{100} \cdot \frac{1}{55,85} \cdot (Y_0 - 1,056) \cdot \frac{1}{2} \cdot 22,414$

- Réduction des oxydes non-ferreux :

$$1000 \cdot \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{Si_f}{28} + \frac{Mn_f}{110} + \frac{P_f}{24,8} + \frac{Q_L}{1000} \cdot \frac{S_L}{64} \right) \cdot 22,414 (= 1000 \cdot OM)$$

IV.4.3. Bilan Hydrogène :

Entrées H2 - Sorties H2 dans le gaz = H2 de réduction

Détermination de l'Hydrogène de réduction :

1 – Sorties H2 dans le gaz de gueulard (Nm3/kNm3) : $Q_g \cdot \frac{H_{2g}}{100}$

2 – Entrées H2 (Nm3/kNm3) :

- Humidité du vent : $\frac{H_v}{18} \cdot 22,414$

- Injection : $J_v \cdot \frac{H_{2J}}{100.2} \cdot 22,414$

- Coke : $Q_{coke} \cdot \frac{H_{2-Coke}}{100.2} \cdot 22,414$

IV.4.4. Bilan carbone :

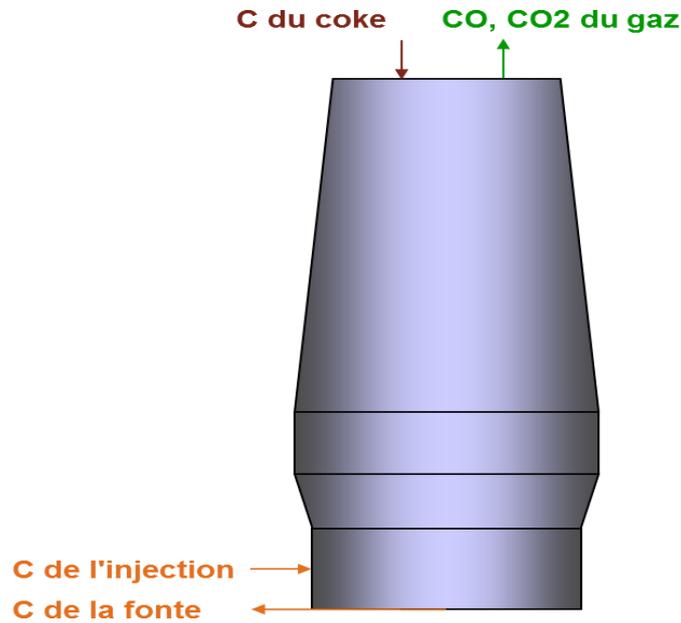


Fig.23. Entre et sortie de carbone au niveau de l'HF.

Détermination de la quantité de coke, Q coke (kg) :

$$Q_{\text{coke}} = \frac{100}{C} \cdot (C_{\text{Gueul}} - C_J + C_f)$$

Avec : " C_{Gueul}" : Quantité de carbone au gueulard = $Q_g \cdot \frac{(CO + CO_2)}{100} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot 12$

" C_J" : Carbone issu de l'injection = $J_v \cdot \frac{C_J}{100}$

" C_f" : Carbone de carburation de la fonte = $1000 \cdot P.I. \cdot \frac{C_f}{100}$

IV.4.5 Consommation spécifique de gaz réducteur, μ (at(C+H)/atFe) :

$$\mu = \frac{\frac{Q_{CO} + Q_{H_2}}{22,414}}{1000 \cdot P.I. \cdot \frac{Fe_f}{100} \cdot \frac{1}{55,85}}$$

IV. 4.6 Ecart à l'idéalité de la réduction, W ou WP :

Oméga ou Oméga P ?

Dans MMHF et ITHF, vous rencontrerez plutôt le terme Oméga P ou Oméga'

(Oméga Prime). Dans le cas où l'on enfourne des ferrailles (additions métalliques), c'est OmégaP qui est valable. Si on n'enfourne pas de ferrailles OmégaP = Oméga. [21]

$$\omega_p = \frac{1000 \cdot \omega + 1,056 \cdot f_0}{1000 - f_0 - f_1}$$

$$\omega = Y_0 - 1,056 - \mu \cdot (X_A - X_W)$$

Y0 : degré d'oxydation initial de la charge,

$$X_A : \text{rendement du gaz au gueulard} : X_A = \frac{Q_{CO} \cdot R_{CO} + Q_{H_2} \cdot R_{H_2}}{Q_{CO} + Q_{H_2}}$$

$$X_W : \text{rendement du gaz à l'équilibre Wustite/Fer} : X_W = \frac{Q_{CO} \cdot 0,3 + Q_{H_2} \cdot 0,383}{Q_{CO} + Q_{H_2}}$$

IV.4.7 L'état thermique du haut-fourneau. Wu

Wu : énergie utile (pour la fonte)

Wu = enthalpie de la fonte liquide + enthalpie du laitier liquide + chaleur de (RONF + SL) + pertes thermiques de la zone d'élaboration (ZE)

$$Wu^* = Wu - \text{Pertes thermiques ZE}$$

(A déterminer expérimentalement)

Exemple pour calculer Wu :

	en MJ/tf	en %	
BESOINS THERMIQUES :			
- Réduction de l'humidité du vent aux tuyères....	80.22	2.60	Connu
- Echauffement des injections.....	301.16	9.77	
- Réduction de l'humidité de l'injection 1.....	12.67	0.41	
- Réduction de l'humidité de l'injection 2.....	0.00	0.00	
- Echauffement de l'oxygène froid injecté.....	0.00	0.00	
- Chaleur de décomposition des carbonates.....	5.40	0.18	
- Chaleur de réduction Magnétite - Wustite.....	0.00	0.00	
- Chaleur de la réaction de régénération.....	1189.55	38.59	
- Chaleur de la réaction du gaz à l'eau.....	54.86	1.78	
- Chaleur de réduction des oxydes non ferreux....	110.75	3.59	
- Chaleur de dissolution des éléments de la fonte	105.97	3.44	
- Chaleur de transfert du soufre au laitier.....	6.32	0.21	
- Enthalpie de la fonte liquide.....	636.35	20.64	
- Enthalpie du laitier liquide.....	298.80	9.69	
- Chaleur d'oxydation du laitier.....	0.41	0.01	
- Pertes thermiques.....	280.00	9.08	
TOTAL DES BESOINS :	3082.46	100.00	
APPORTS THERMIQUES :			
- Combustion du coke aux tuyères.....	1160.29	37.64	Connu
- Combustion de l'injection 1.....	1193.03	38.70	
- Combustion de l'injection 2.....	0.00	0.00	
- Enthalpie du vent sec naturel.....	365.95	11.87	
- Enthalpie de l'oxygène de suroxygénation.....	13.06	0.42	
- Enthalpie de l'humidité du vent.....	7.16	0.23	
- Réduction indirecte des oxydes de fer.....	293.63	9.53	
- Chaleur formation silicates gangue non agglom..	49.34	1.60	
TOTAL DES APPORTS :	3082.46	100.00	

Fig.24. Exemple pour calculer Wu.

Conclusion générale

Les métaux occupent une place importante aujourd'hui comme avant du fait qu'ils se prêtent à tous les usages (outils, armes, pièces mécaniques, divers équipements etc.).

Le dernier siècle est caractérisé par l'apparition de beaucoup d'alliages, avec réduction des poids des pièces mécaniques et de leur prix de revient.

Un haut fourneau transforme du minerai de fer en fonte liquide, en brûlant du coke qui sert à la fois de combustible et d'agent réducteur. Bien que la fonte produite soit un matériau à part entière, cet alliage est généralement destiné à être affiné dans des aciéries. Devenu un outil géant, sans que son principe fondamental ne change, le haut fourneau est considéré comme l'un des réacteurs industriels extrêmement complexe et difficile à maîtriser. Son rendement thermique et chimique exceptionnel lui a permis de survivre, jusqu'au début du XXI^e siècle, aux bouleversements techniques qui ont jalonné l'histoire de la production de l'acier. Il n'en est pourtant qu'un maillon : situé au cœur du processus de fabrication de la fonte et l'acier, il doit être associé à une cokerie, une usine d'agglomération et une aciérie.

Comme le haut-fourneau est un réacteur complexe son pilotage est réalisé par un logiciel appelé **MMHF**, un modèle mathématique conçu sur la base du modèle de Michard. MMHF contient des équations reliant des données connues (capteurs: T° du vent, analyse des gaz) et inconnues (production, etc). En résolvant le système, on obtiendra les valeurs des inconnues. Ce que MMHF fait chaque minute. *En maîtrisant ce logiciel on comprendra mieux le fonctionnement du fourneau et comment réagit MMHF à un changement des entrées ou de l'analyse des gaz.*

Ce stage pratique au niveau de l'usine, malgré la courte durée, nous a permis de voir l'immensité et la complexité de l'industrie sur le terrain comparativement à la théorie acquise. Ce stage nous a permis de suivre et de comprendre un procédé complexe de production de la fonte, mais aussi de maîtriser le logiciel MMH qui contrôle le fonctionnement du haut fourneau. On a su aussi que la maîtrise de l'outil informatique et la modélisation est essentielle dans notre formation.

Référence Bibliographique

- [1]. BENZAADA S .*ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS)*.page5.http://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/elaboration%20acier%20fontes_1_.pdf
- [2]. Myriam O.(2006). *Les aciers dans la construction FER FONTE ALLIAGES ACIER construction*. L'Isle-d'Abeau. Page16. http://www.lesgrandsateliers.org/include/viewFile.php?idtf=5560&path=4e%2F5560_472_Manuel-Les-aciers-dans-la-construction.pdf
- [3]. techniques-ingenieur . [Consulté en juillet 2020]. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-fontes-tba1064/>
- [4]. Myriam O. (2006). *Les aciers dans la construction FER FONTE ALLIAGES ACIER construction*. L'Isle-d'Abeau. Page37-41. http://www.lesgrandsateliers.org/include/viewFile.php?idtf=5560&path=4e%2F5560_472_Manuel-Les-aciers-dans-la-construction.pdf
- [5]. Univ-tlemcen. [Consulté en juillet 2020]. https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/partie2/metaux_ferreux.pdf
- [6]. Wikipédia. [Consulté en juillet 2020]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_\(m%C3%A9tallurgie\)#Autres_utilisation_du_terme_fonte](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonte_(m%C3%A9tallurgie)#Autres_utilisation_du_terme_fonte)
- [7]. Wikipédia. [Consulté en juillet 2020]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Haut_fourneau
- [8]. Khalid A. (2014). *Modélisation systémique des filières sidérurgiques en vue de leur optimisation énergétique et environnementale*. Thèse de Doctorat en Science des Matériaux et Métallurgie. Université de Lorraine. France. page 24-25. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751301>
- [9]. wikipedia. [Consulté en juillet 2020]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Minerai_de_fer#:~:text=Le%20minerai%20de%20fer%20est,naturels%2C%20r%C3%A9duit%20la%20teneur%20th%C3%A9orique.

- [10]. Wikipédia. [Consulté en juillet 2020]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Agglom%C3%A9r%C3%A9_\(sid%C3%A9rurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Agglom%C3%A9r%C3%A9_(sid%C3%A9rurgie))
- [11]. Wikipédia. [Consulté en juillet 2020]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Agglom%C3%A9r%C3%A9_\(sid%C3%A9rurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Agglom%C3%A9r%C3%A9_(sid%C3%A9rurgie))
- [12]. BENSAADA S .*ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS)*.page58.http://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/elaboration%20acier%20fontes_1_.pdf
- [13]. Wikipédia. [Consulté en juillet 2020]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coke_\(charbon\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coke_(charbon))
- [14]. BENSAADA S .*ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS)*.page58.http://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/elaboration%20acier%20fontes_1_.pdf
- [15]. calcinor. [Consulté en juillet 2020]. <https://www.calcinor.com/fr/nouvelles/2017-11-09/chaux-siderurgie-composante/>
- [16]. BENSAADA S . *ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIER)*. page58-65 .http://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/elaboration%20acier%20fontes_1_.pdf
- [17]. PEACEY J G, DAVENPORT W G. (1979). *THE IRON BLAST FURNACE Theory and Practice*. Montréal. page 16-26
- [18]. Pierre TOP Service Process, ARCELOR. *le Modèle Mathématique du Haut Fourneau et son application RÉGLAGE THERMIQUE*. Page 5 et 7
- [19]. IRSID groupe arcelor. *Le modèle mathématique du haut-fourneau*. (2002). Page 3-8
- [20]. Pierre TOP Service Process, ARCELOR. *le Modèle Mathématique du Haut Fourneau et son application RÉGLAGE THERMIQUE*. Page 16-19
- [21]. Loubert JP. *Le modèle mathématique du haut-fourneau "Version Process"*. (2003).

Annexe

Les variables du modèle :

✚ Les composantes explicites :

	Composante	Unité	Définition
1	CokeComb	kg/tf	Consommation de coke sec brûlé aux tuyères
2	CokeRege	kg/tf	Consommation de coke sec de régénération
3	CokeTotSec	kg/tf	Mise au mille de coke sec total
4	CokeTotHum	kg/tf	Mise au mille de coke humide total
5	Inject1	kg/tf	Mise au mille d'injection 1 humide
6	Inject2	kg/tf	Mise au mille d'injection 2 humide
7	VentNatSec	m3N/tf	Consommation de vent naturel sec (21% O2)
8	Vapeur	kg/tf	Mise au mille de vapeur totale (naturelle + injectée)
9	O2_Chaud	m3N/tf	Mise au mille d'oxygène injecté en amont des cowpers
10	O2_Froid	m3N/tf	Mise au mille d'oxygène froid injecté aux tuyères
11	OmegaP	atO/atFe	Écart à l'idéalité de la réduction des oxydes de fer
12	PertElab	MJ/tf	Pertes thermiques de la zone d'élaboration
13	PertPrep	MJ/tf	Pertes thermiques de la zone de préparation

✚ Les composantes implicites :

	Composante	Unités	Définition
14	O2_Total	m3N/tf	Consommation d'oxygène total (Vent + O2 chaud + O2 froid + Gaz de transport des injections)
15	HSVent	MJ/tf	Chaleur sensible du vent à l'entrée de la circulaire
16	GazTInj1	m3N/tf	Mise au mille de gaz de transport de l'injection 1
17	GazTInj2	m3N/tf	Mise au mille de gaz de transport de l'injection 2
18	CO_Tuyere	m3N/tf	Production de CO aux tuyères
19	H2_Tuyere	m3N/tf	Production de H2 aux tuyères
20	N2_Tuyere	m3N/tf	Production de N2 aux tuyères
21	GazTuyere	m3N/tf	Production de gaz total aux tuyères
22	HSGazTuy	MJ/tf	Chaleur sensible du gaz produit aux tuyères
23	CO_BdC	m3N/tf	Débit spécifique de CO en bas de cuve
24	CO2_BdC	m3N/tf	Débit spécifique de CO2 en bas de cuve
25	H2_BdC	m3N/tf	Débit spécifique de H2 en bas de cuve
26	H2O_BdC	m3N/tf	Débit spécifique de H2O en bas de cuve
27	N2_BdC	m3N/tf	Débit spécifique de N2 en bas de cuve
28	GazBdC	m3N/tf	Débit spécifique de gaz total en bas de cuve
29	HSGazBdC	MJ/tf	Chaleur sensible du gaz total en bas de cuve

	Composante	Unités	Définition
30	CO_Gueul	m ³ N/tf	Débit spécifique de CO au gueulard
31	CO2_Gueul	m ³ N/tf	Débit spécifique de CO2 au gueulard
32	H2_Gueul	m ³ N/tf	Débit spécifique de H2 au gueulard
33	H2O_Gueul	m ³ N/tf	Débit spécifique de H2O au gueulard
34	N2_Gueul	m ³ N/tf	Débit spécifique de N2 au gueulard
35	GazGueulBrut	m ³ N/tf	Débit spécifique de gaz brut au gueulard
36	HSGazGIBrut	MJ/tf	Chaleur sensible du gaz de gueulard brut
37	H2O_Sechage	m ³ N/tf	Production de vapeur par séchage des charges
38	H2O_Reductio	m ³ N/tf	Production de vapeur par réduction des charges
39	GazGueulSec	m ³ N/tf	Débit spécifique de gaz de gueulard sec
40	HSGazGIChSe	MJ/tf	Chaleur sensible du gaz de gueulard hors séchage
41	TempsOper	h/tf	Temps opératoire
42	CokeVape	kg/tf	Consommation de coke pour la réduction de la vapeur d'eau injectée aux tuyères
43	CokeSouf	kg/tf	Consommation de coke pour la désulfuration de la fonte

 Les contraintes implicites :

	Contrainte implicite
1	Bilan carbone de la zone des tuyères
2	Bilan hydrogène de la zone des tuyères
3	Bilan oxygène de la zone des tuyères
4	Bilan azote de la zone des tuyères
5	Débit spécifique de gaz produit aux tuyères
6	Bilan de la réduction de la vapeur d'eau du vent
7	Bilan thermique de la zone des tuyères
8	Bilan oxygène du soufflage
9	Consommation de coke de désulfuration
10	Mise au mille de coke sec
11	Bilan carbone de la zone d'élaboration
12	Bilan hydrogène de la zone d'élaboration
13	Bilan oxygène de la zone d'élaboration
14	Bilan azote de la zone d'élaboration
15	Débit spécifique de gaz en sortie de zone d'élaboration

Contrainte implicite	
16	Degré d'oxydation du CO en sortie de zone d'élaboration (XW_CO)
17	Degré d'oxydation du H2 en sortie de zone d'élaboration (XW_H2)
18	Bilan thermique de la zone d'élaboration
19	Chaleur sensible du gaz de bas de cuve à la température de réserve
20	Bilan carbone du haut fourneau
21	Bilan hydrogène du haut fourneau
22	Bilan oxygène du haut fourneau
23	Bilan azote du haut fourneau
24	Débit spécifique de gaz de gueulard brut
25	Débit spécifique de vapeur d'eau produite par le séchage des charges
26	Débit spécifique de vapeur d'eau produite par la réduction
27	Débit spécifique de gaz de gueulard sec
28	Bilan thermique du haut fourneau
29	Bilan thermique du haut fourneau sur charges sèches

 Les contraintes explicites :

N°	Nom	Unité	Définition
14	AllureCoke	t/j	Consommation quotidienne de coke sec
15	TauxInj1	g/Nm3	Taux d'injection 1 rapportée au vent naturel sec
16	AllureInj1	t/j	Consommation quotidienne d'injection 1
17	AllureGazTInj1	m3N/h	Consommation de gaz de transport d'injection 1
18	DensTInj1	kg/m3N	Densité de transport de l'injection 1
19	TauxInj2	g/m3N	Taux d'injection 2 rapportée au vent naturel sec
20	AllureInj2	t/j	Consommation quotidienne d'injection 2
21	AllureGazTInj2	m3N/h	Consommation de gaz de transport d'injection 2
22	DensTInj2	kg/m3N	Densité de transport de l'injection 2
23	HumVent	g/m3N	Humidité du vent rapportée au vent naturel sec
24	PC_O2_Circ	%	Teneur en oxygène du vent à la circulaire
25	PC_O2_Tuyere	%	Teneur en oxygène du vent aux tuyères
26	AllureO2	m3N/h	Consommation horaire d'oxygène de suroxygénation
27	TVent	°C	Température du vent à la circulaire
28	AllureVent	k.m3N/h	Consommation horaire de vent naturel sec

N°	Nom	Unité	Définition
29	Production	t/j	Production quotidienne de fonte
30	Alpha	%	Proportion des pertes thermiques en zone élaboration
31	PertesHoraires	MJ/h	Pertes thermiques horaires du haut fourneau
32	TReserve	°C	Température de la zone de réserve thermique
33	PC_N2_Gueul	%	Teneur en azote du gaz de gueulard sec
34	PC_CO_Gueul	%	Teneur en oxyde de carbone du gaz de gueulard sec
35	PC_CO2_Gueul	%	Teneur en gaz carbonique du gaz de gueulard sec
36	PC_H2_Gueul	%	Teneur en hydrogène du gaz de gueulard sec
37	RendCO	%	Rendement CO au gueulard ($CO_2/(CO + CO_2)$)
38	RendH2	%	Rendement H2 au gueulard ($H_2O/(H_2 + H_2O)$)
39	TGueul	°C	Température du gaz de gueulard brut
40	TGazChaSec	°C	Température théorique du gaz sur charge sèche
41	AllureGazBrut	k.m3N/h	Production horaire de gaz de gueulard brut
42	TFlamme	°C	Température adiabatique de flamme

 Les paramètres de composition :

N°	Composante	Unité	Définition
43	PC_C_Coke	%	Teneur en carbone du coke sur sec
44	PC_H2_Coke	%	Teneur en hydrogène du coke sur sec
45	PC_O2_Coke	%	Teneur en oxygène du coke sur sec
46	PC_N2_Coke	%	Teneur en azote du coke sur sec
47	PC_S_Coke	%	Teneur en soufre du coke sur sec
48	PCICoke	kJ/kg	Pouvoir calorifique du coke sec
49	HGraCoke	kJ/kg	Chaleur de graphitisation du coke
50	PC_Hum_Coke	%	Humidité du coke sur humide
51	TCokeTuy	°C	Température du coke à l'entrée de la zone des tuyères
52	PC_C_Inj1	%	Teneur en carbone de l'injection 1 sur sec
53	PC_H2_Inj1	%	Teneur en hydrogène de l'injection 1 sur sec
54	PC_O2_Inj1	%	Teneur en oxygène de l'injection 1 sur sec
55	PC_N2_Inj1	%	Teneur en azote de l'injection 1 sur sec
56	PC_S_Inj1	%	Teneur en soufre de l'injection 1 sur sec
57	PCIIinj1	kJ/kg	Pouvoir calorifique de l'injection 1 sèche
58	HCraInj1	kJ/kg	Chaleur de craquage de l'injection 1 sèche
59	PC_Hum_Inj1	%	Humidité de l'injection 1 sur humide
60	TInj1	°C	Température de l'injection 1 aux tuyères

N°	Composante	Unité	Définition
61	PC_C_Inj2	%	Teneur en carbone de l'injection 2 sur sec
62	PC_H2_Inj2	%	Teneur en hydrogène de l'injection 2 sur sec
63	PC_O2_Inj2	%	Teneur en oxygène de l'injection 2 sur sec
64	PC_N2_Inj2	%	Teneur en azote de l'injection 2 sur sec
65	PC_S_Inj2	%	Teneur en soufre de l'injection 2 sur sec
66	PCInj2	kJ/kg	Pouvoir calorifique de l'injection 2 sèche
67	HCralnj2	kJ/kg	Chaleur de craquage de l'injection 2 sèche
68	PC_Hum_Inj2	%	Humidité de l'injection 2 sur humide
69	TInj2	°C	Température de l'injection 2 aux tuyères
70	PC_O2_GTInj1	%	Teneur en oxygène du gaz de transport de l'injection 1
71	TGazTInj1	°C	Température du gaz de transport de l'injection 1
72	PC_O2_GTInj2	%	Teneur en oxygène du gaz de transport de l'injection 2
73	TGazTInj2	°C	Température du gaz de transport de l'injection 2
74	PC_O2_Surox	%	Pureté de l'oxygène de suroxygénation
75	TOxygene	°C	Température d'injection de l'oxygène froid

N°	Composante	Unité	Définition
76	YZeroP	atO/atFe	Degré d'oxydation de la charge minérale
77	FerMetal	kg/tf	Enfournement de fer métallique
78	Fer2Plus	kg/tf	Enfournement de fer ferreux
79	CCaCO3	kg/tf	Enfournement de carbone sous forme de calcite
80	CFeCO3	kg/tf	Enfournement de carbone sous forme de sidérose
81	Hydrates	kg/tf	Enfournement d'eau sous forme d'hydrates de fer
82	Humidite	kg/tf	Eau enfournée par l'humidité des charges minérales
83	Eaulnjectee	m3/h	Eau injectée au gueulard
84	CalcinZP	%	Taux de décomposition du CaCO3 en zone de préparation
85	TCharge	°C	Température d'enfournement des charges

N°	Composante	Unité	Définition
86	PC_C_Fonte	%	Teneur en carbone de la fonte
87	PC_Si_Fonte	%	Teneur en silicium de la fonte
88	PC_Mn_Fonte	%	Teneur en manganèse de la fonte
89	PC_P_Fonte	%	Teneur en phosphore de la fonte
90	TFonte	°C	Température de la fonte à la coulée du haut fourneau
91	Laitier	kg/tf	Poids de laitier produit
92	LZero	kg/tf	Laitier des charges non agglomérées
93	PC_S_Laitier	%	Teneur en soufre du laitier
94	PC_Fe_Laitier	%	Teneur en fer du laitier
95	TLaitier	°C	Température du laitier à la coulée
96	PC_C_Metal	kg/tf	Teneur en carbone de l'enfournement métallique
97	PC_Si_Metal	kg/tf	Teneur en silicium de l'enfournement métallique
98	PC_Mn_Metal	%	Teneur en manganèse de l'enfournement métallique
99	PC_P_Metal	%	Teneur en phosphore de l'enfournement métallique
100	PC_G_Metal	°C	Teneur en gangue de l'enfournement métallique