

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur

Département : Métallurgie et génie des matériaux

Domaine : Science et technologies

Filière : Métallurgie

Spécialité : Génie métallurgie

Mémoire

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

Étude des procédés physico-chimiques d'élaboration des
billettes d'acier au niveau des fours à arc
et d'apparition des défauts de soufflures

Présenté par : *Haouari Khaled*

Encadrant: *Boucif Abdenacer* Docteur *Badji-Mokhtar Annaba*

Jury de Soutenance :

BOUDEBANE Said	Professeur	Badji-Mokhtar Annaba	Président
BOUCIF Abdenacer	Docteur	Badji-Mokhtar Annaba	Encadrant
SNANI Louafi	Docteur	Badji-Mokhtar Annaba	Examineur
BOUDEBANE Azzedine	Docteur	Badji-Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements:

Je tiens tout d'abord à remercier « Dieu » tout puissant.

Je tiens à remercier mes parents qui m'ont soutenu tout le long de ma vie et c'est grâce à eux que je suis arrivé à ce niveau.

Je remercie mon directeur de travail : Dr. Boucif Abdenacer

Qui a joué un rôle important dans le déroulement de cette étude.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

Sans oublier tous les enseignants ayant contribué à notre formation de l'école primaire jusqu'à la dernière année d'études.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents ; Pour leur amour ; leur tendresse ; leur soutien leur prières tout au long de mes études

Mon petit frère FOUAD ; Ma petite sœur MALAK

A Ma grande famille

A Mes amis : Skander, Aymen, Moussa, Anis, Adel, Ala, Sara...

A Mes collègues : Raouf, Mimo, Massil

A tous les membres de ma promotion.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I. Elaboration des aciers au niveau des fours électriques

I.1. Généralité sur les aciers	2
I.1.1. Introduction	2
I.1.2. Définition	2
I.1.3. Identification des aciers	3
I.1.4. Structure des aciers.....	3
I.1.5. Types d'aciers	5
I.1.6. Elaboration d'acier	6
I.1.7. Influence des éléments d'addition sur l'acier	7
I.1.8. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier.....	8
I.2. Principaux fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers et des alliages	10
I.2.1. Introduction	10
I.2.2. Four électrique	10
I.2.3. Four à résistance	11
I.2.3.1. Définition	11
I.2.3.2. Caractéristiques de four à résistance	12
I.2.3.3. Principe de fonctionnement	12
I.2.3.4. Différents types de four électrique à résistance.....	12
I.2.3.5. Four à refusion sous laitier électro conducteur	13
I.2.3.6. Avantages de four à résistance électrique	13
I.2.4. Four à arc électrique	14
I.2.4.1. Historique.....	14
I.2.4.2. Définition	14
I.2.4.3. Principe.....	16
I.2.4.4. Type des fours à arc électrique.....	16
I.2.4.5. Procédés de production électrique d'acier en utilisant le four à arc.....	18
I.2.5. Conclusion	19

Chapitre II. Technologie du four à arc électrique

II.1. Introduction.....	20
II.1.1 Historique	20
II.1.2. Evolution	20
II.1.3. Développement de la technologie du four à arc	22
II.1.4. Description du four à arc électrique	23
II.2. Arc électrique	24
II.2.1. Définition	24
II.2.2. Création d'arc électrique.....	25
II.2.3. Propriétés	25
II.3. Equipements mécaniques de four à arc	26
II.3.1. Coque du four	27
II.3.2. Porte EBT	28
II.3.3. TOIT (Furnace Roof)	29
II.3.4. Mécanisme de refroidissement du four à arc – équipement	30
II.3.5. Electrodes en graphite	32
II.3.6. Modules d'injection oxygène/carbone	33

II.3.7. Panier de ferrailles	34
II.4. Equipements électriques de four à arc	35
II.4.1. Introduction	35
II.4.2. Alimentation électrique	35
II.4.3. Transformateur	35
II.4.4. Commutateur de prises	36
II.4.5. Réactance saturable.....	37
II.4.6. Circuit secondaire	37
II.5. Revêtements réfractaires du four à arc	38
II.5.1. Introduction	38
II.5.2. Réfractaire du four à arc	38
II.5.2.1. Sous-bas du four	38
II.5.2.2. La sole	40
II.5.2.3. Paroi latérale inférieure du four.....	41
II.5.2.4. Ligne de scories (slagline)	41
II.5.2.5. Paroi latérale supérieure du four / les zones chaudes	41
II.5.2.6. TOIT.....	41
II.5.2.7. Trou de coulée	42

Chapitre III. Procédés physico-chimiques d'élaboration d'acier dans le four à arc

III.1. Introduction	43
III.2. Chargement du four.....	44
III.2.1. Matières chargés dans le four à arc électrique	44
III.2.1.1. Ferraille d'acier	44
III.2.1.2. Fonte	44
III.2.1.3. Oxyde de fer DRI	45
III.2.1.4. La chaux / Dolomite	46
III.2.1.5. Les éléments carburants	47
III.2.1.6. Les ferro-alliages.....	48
III.2.2. Chargement du lit de fusion.....	48
III.2.2.1. Description de l'opération	48
III.2.2.2. Préparation du panier de ferraille	48
III.2.2.3. Chargement de panier dans le four à arc	49
III.3. Période de fusion	50
III.3.1. Introduction	50
III.3.2. Allumage de l'arc et début de la fusion	50
III.3.3. Fusion rapide et la formation du bain de fusion	51
III.3.3.1 Formation du bain	51
III.3.3.2 Rôle des brûleurs	51
III.3.3.3 Rôle d'oxygène	51
III.3.3.4. Fusion d'oxyde de fer DRI	52
III.3.4. Achèvement de la fusion et la formation du laitier	52
III.4. La période d'oxydation des éléments	52
III.4.1. Introduction	52
III.4.2. Oxydation du carbone	53
III.4.2.1 Réaction générale.....	53
III.4.2.2 Oxydation du carbone par réaction avec FeO	53
III.4.3. Oxydation du phosphore	54
III.4.4. Oxydation silicium /manganèse	56
III.5. Période de réduction des éléments / Raffinage	57
III.5.1. Raffinage	57
III.5.1.1. Introduction	57
III.5.1.2. Four à poche	57

III.5.1.3. Procédé de four à poche	58
III.5.2. Désulfuration	58
III.5.3. Désoxydation	60
III.5.3.1. Conditions de désoxydation	60
III.5.3.2. Désoxydation des précipitations : élimination des inclusions	60
III.5.3.3. Elimination des inclusions non métalliques	61
III.6. Coulée continue d'acier de poche.....	62
III.6.1. Introduction.....	62
III.6.2. L'opération	62
III.6.3. La coulée	62
III.6.4. Structure interne de l'acier coulée	64
III.6.5. Les demi-produits issus de la coulée continue	64

Chapitre IV. Calcul du bilan de matière.....65

Chapitre V. Défauts de soufflures - Partie pratique

V.1. Hypothèse	81
V.2. Présentation de défauts de soufflures	81
Description	81
Nuances affectées	82
Caractéristiques géométriques moyennes du défaut de soufflures	82
Fréquence d'apparition	82
Conditions d'apparition	82
Mode de détection	82
Réparation possible?	82
V.3. Problématique	83
V.4.1. Equilibre d'oxygène entre métal et le laitier	83
• 1 ^{er} Méthode : Déterminer la concentration d'oxygène via un capteur à immersion.....	83
• 2 ^{eme} Méthode (méthode calcul) : La concentration d'oxygène en équilibre avec l'oxyde de fer FeO	83
• 3 ^{ème} Méthode : la concentration d'oxygène en équilibre avec le carbone ainsi que d'autres éléments désoxydants	86
• Equilibre Métal-laitier	87
V.4.2. Influence du traitement avec le calcium SiCa sur l'apparition des défauts de soufflures	89
Traitement avec Ca	89
Amélioration de la coulabilité	89
Réduction de % d'oxygène dans le bain métallique	90
Conclusion.....	91
IV.4.3. Calcul correcte des additions des ferro-alliages (mise à la nuance d'acier)	92

Conclusion Générale.....95

Références bibliographiques.....96

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

- Figure 1: Coupe pseudobinaire du diagramme fer-carbone-chrome à 17 % de chrome
Figure 2: Coupe pseudobinaire du diagramme fer-carbone-silicium à 2,4 % de silicium
Figure 3: Diagramme d'équilibre fer-carbone
Figure 4: Microstructure d'un acier hypoeutectoïde
Figure 5: Structure perlitique
Figure 6: Microstructure d'un acier hypereutectoïde
Figure 7: a) Le C dans la solution de martensite. b) Micrographie de la martensite.
Figure 8: Variation des propriétés mécaniques d'aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone
Figure 9: Teneur en éléments d'alliages
Figure 10: Schéma présente une vue générale sur la classification des fours électriques
Figure 11: Four à induction à creuset
Figure 12: Four à induction à canal
Figure 13: Représentation schématique d'un four à résistance
Figure 14: Schéma d'une chambre de résistance à chauffage indirect du type discontinu
Figure 15: Four à refusion sous laitier électro conducteur
Figure 16: Four à arc électrique échelle haut + échelle bas
Figure 17: Arc électrique simplifiée
Figure 18: (a) Four à courant alternatif AC (b) Four à courant direct continu DC

CHAPITRE II :

- Figure 19: Production mondiale d'acier brut (Four à arc EAF par rapport au total) 2005-2014
Figure 20: évolution de la technologie du Four à arc EAF 1965–2010
Figure 21: arc électrique
Figure 22: Conception actuelle standard du four à arc électrique
Figure 23: panneaux de refroidissement de prés
Figure 24: Vue isométrique du toit du four à arc électrique
Figure 25: Trémie de chargement des additifs
Figure 26: Parties refroidies du four à arc électrique.
Figure 27: électrodes en graphite
Figure 28: Résistance à la traction relative de graphite en fonction de la température
Figure 29: Oxygène-jet dans une boîte en céramique
Figure 29: Carbone-jet dans une boîte de carreaux
Figure 30: Panier de ferrailles pour le chargement du four à arc
Figure 31: schéma présente un changeur de prises
Figure 32: Réactance saturable
Figure 33: forme interne du câble
Figure 34: Câble souples à haute tension
Figure 35: Zones des Revêtements réfractaires du four à arc
Figure 36: a) revêtement de la sole b) revêtement des parois de four
Figure 37: Formes de trou vertical de coulée + revêtements

CHAPITRE III :

- Figure 38: Fonctionnement normal du four à arc
Figure 39: Exemple de ferraille utilisé dans le four à arc
Figure 40: DRI oxyde de fer chargé dans le four à arc
Figure 41: chaux + dolomite
Figure 42: a) Carbone injecté b) Carbone 10-30mm chargé
Figure 43: Séquence de chargement du lit de fusion
Figure 44: Ignition d'arc électrique et début de fusion
Figure 45: réactions d'oxydation de carbone survenant lors de la fusion
Figure 46: Formation de bulle de CO suit de sa montée vers l'atmosphère du four
Figure 47: oxydation du phosphore vers le laitier
Figure 48 a) : Influence de basicité et le rapport CaO/FeO sur coefficient de partage de phosphore L_p

Figure 48 b) Variation du rapport de distribution du phosphore avec la basicité du laitier
Figure 49: La teneur en soufre en fonction du rapport CaO/SiO_2
Figure 50: Courbe de désoxydation Mn-O
Figure 51: l'effet d'utilisation de Si seul et Si+Mn sur la désoxydation d'acier
Figure 52: Schéma d'une installation coulée continue à deux lignes

CHAPITRE IV :

Figure 53: Défauts de soufflures
Figure 54: Diagramme d'équilibre ternaire ($\% \text{CaO} + \% \text{MnO} + \% \text{MgO}$) – ($\% \text{SiO}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5$)-
Figure 55: Evolution de la composition du métal et de la teneur en fer au cours de désoxydation
Figure 56: Changement de composition d'inclusion en fonction de Ca injectée
Figure 57: Modification des inclusions non métalliques par traitement de calcium
Figure 58: Activité d'oxygène dans le bain métallique lors du traitement en Ca
Figure 59: diagramme d'équilibre calculé pour le système Fe-Al-Ca-O-S

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 1: Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers
Tableau 2: Comparaison four à creuset / four à canal

CHAPITRE II

Tableau 3 : Top 10 producteurs d'acier à partir d'un four à arc électrique en 2014
Tableau 4: Propriétés de l'électrode en graphite
Tableau 5: Composition chimique du revêtement de la sole
Tableau 6: Composition chimique du revêtement de la paroi latérale inférieure
Tableau 7: Composition chimique du revêtement de la paroi supérieure
Tableau 8: Composition chimique du revêtement de trou de coulée

CHAPITRE III

Tableau 9: Composition chimique ferraille/Oxyde de fer FeO
Tableau 10: Caractéristiques de la chaux et de la dolomite
Tableau 11: a) Caractéristiques de carbone injecté b) Caractéristiques de carbone chargé

Introduction Générale

L'histoire de la production électrique d'acier est assez courte que peu plus de 100 ans après les premiers essais pour faire fondre l'acier en utilisant l'énergie électrique. Au cours de cette période, de grands progrès ont été atteints tant dans les équipements et la technologie de four, les méthodes de fusion, les matières premières et les produits finaux,

Plus précisément, la technologie de fabrication d'acier dans les fours à arcs a connu un développement important aussi bien du point de vue technologique que du point de vue capacité de production depuis les dernières décennies.

Cette étude trouve son intérêt dans une installation industrielle liée à la fabrication des semi-produits d'acier qui se présentent en billettes d'acier.

Cette installation est présente en aciérie électrique afin de convertir les ferrailles ou d'autres charges métalliques en acier liquide ensuite en un acier coulé en billettes selon 3 stades différents de traitement d'acier :

- Four à arc électrique
- Four à poche
- Coulée continue

Dans le cadre de ce travail, on s'intéressera à tous les aspects ayant une quelque relation avec le processus de la fabrication des semi-produits, billettes d'acier.

Cela va de la présentation des équipements mécaniques/électriques/revêtements du four à arc, aux études des procédés physico-chimiques au cours de processus d'élaboration, à l'étude de défaut de soufflures qui peuvent apparaître sur la billette d'acier.

Le processus a été étudié en détail avec toutes les séquences d'opération, chauffage, oxydation, réduction, mise à la nuance, coulée continue et les défauts apparus sur le produit final.

Le plan de ce travail est le suivant :

Chapitre I : La 1ère partie de chapitre présente des généralités sur les aciers, les structures, l'influence des éléments d'addition, La 2ème partie présente une brève introduction aux principaux fours électriques utilisés dans la fabrication d'acier

Chapitre II : Ce chapitre présente la technologie du four à arc du côté équipements mécaniques et électriques jusqu'au revêtement réfractaire du four.

Chapitre III : Ce chapitre aborde une étude des procédés physico-chimiques d'élaboration d'acier, traite le processus physique à partir de chargement au fusion jusqu'à la coulée d'acier, outre les réactions qui produisent au long du processus : oxydation, réduction, désoxydation, mise à la nuance...

Chapitre IV : Calcul du bilan de matière d'opération.

Chapitre V : Ce chapitre traite d'un point de vue oxygène, la problématique dite que l'origine des déchirures sur les billettes d'acier est des défauts de soufflures.

Chapitre I. Elaboration des aciers au niveau des fours électriques

I.1. Généralité sur les aciers

I.1.1. Introduction

Les aciers sont d'une importante utilisation dans beaucoup de domaines. Toutes les évolutions scientifiques et industrielles sont dues à leur développement. Ce progrès est essentiellement due à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés physiques en particulier mécaniques des aciers ; et ceci en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents transformations mécaniques, thermiques et chimiques.

I.1.2. Définition

Un acier est un alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...).

Selon la norme NF EN 10020, on appelle acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ».

À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. (Figure : diagramme fer-carbone) C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages :

- la solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite ;
- la solidification d'un acier s'achève en conservant tout le carbone en solution solide dans la structure qui peut être δ , $\delta + \gamma$ ou γ .

On peut donc appeler acier un alliage à base de fer, éventuellement allié, et contenant du carbone en quantité telle qu'à haute température, lors de l'achèvement de la solidification (à la température du solidus donc), cet élément soit dissous (et donc pas du tout précipité sous forme de carbure ou de graphite). La teneur limite en carbone correspond alors à la limite de solubilité de cet élément dans le fer γ (cfc) et peut donc varier avec les éléments d'alliages présents par exemple : [1]

Fer-carbone-chrome (Fe-C-Cr à 17 % Cr : C % limite = 0,7) (Figure 1)

Fer-carbone-silicium (Fe-C-Si à 2,4 % Si : C % limite = 1,4). (Figure 2)

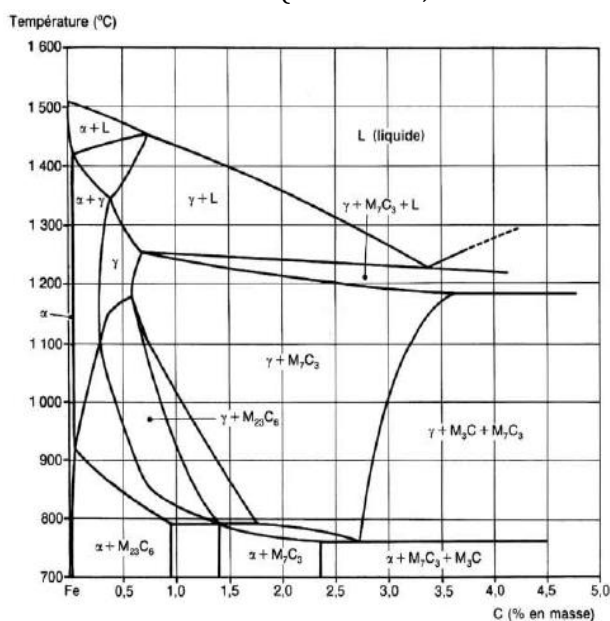


Figure 1 - Coupe pseudobinaire du diagramme fer-carbone-chrome à 17 % de chrome

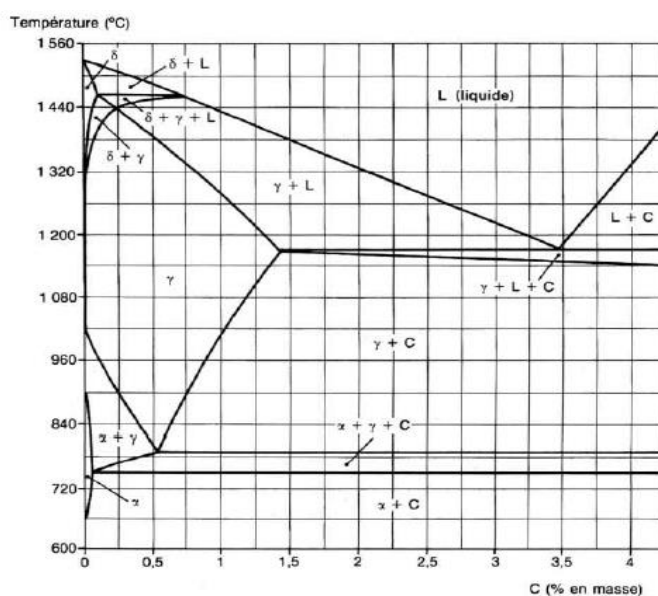


Figure 2 : Coupe pseudobinaire du diagramme fer-carbone-silicium à 2,4 % de silicium

I.1.3. Identification des aciers

Aciers au carbone :

L'acier est un alliage à base de fer et d'un rajout de carbone en proportions restreinte ne dépasse pas 2,1% (limite théorique). Au-delà de cette teneur l'alliage est nommé fonte.

La limite de 2,1% est l'extrémité du palier eutectique γ -Fe₃C du diagramme fer-carbone. A l'équilibre les aciers se solidifient sans apparition de cette phase (absence de carbures Fe₃C primaires) inversement aux fontes. Les carbures peuvent toujours être dissouts dans le domaine austénitique à l'inverse des fontes. [2]

D'autres éléments d'alliage peuvent être ajoutés en quantités diverses.

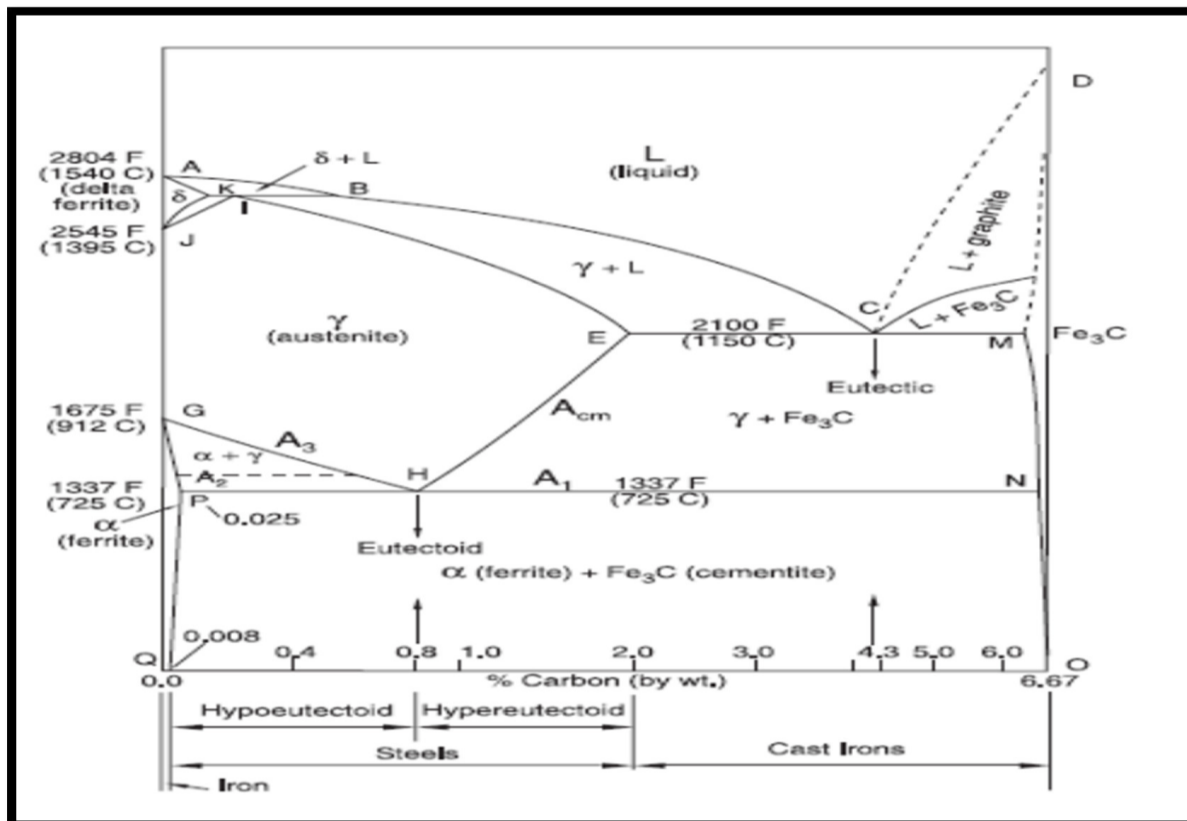


Figure 3: Diagramme d'équilibre fer-carbone [3]

I.1.4. Structure des aciers

On distingue trois types d'aciers, selon la teneur en carbone :

- **L'acier du type hypoeutectoïde :**
(%C compris entre 0,002% et 0,85%) formé de perlite (ferrite α +cémentite Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique [3].

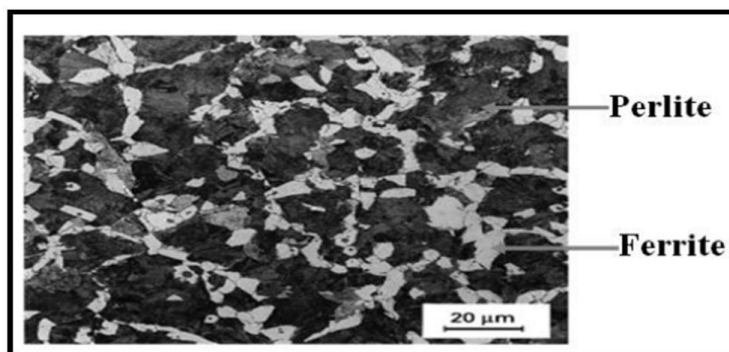


Figure 4: Microstructure d'un acier hypoeutectoïde [5]

- **L'acier du type eutectoïde :**

(%C = 0,85%) formé de 100% de perlite (ferrite α + cémentite Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles

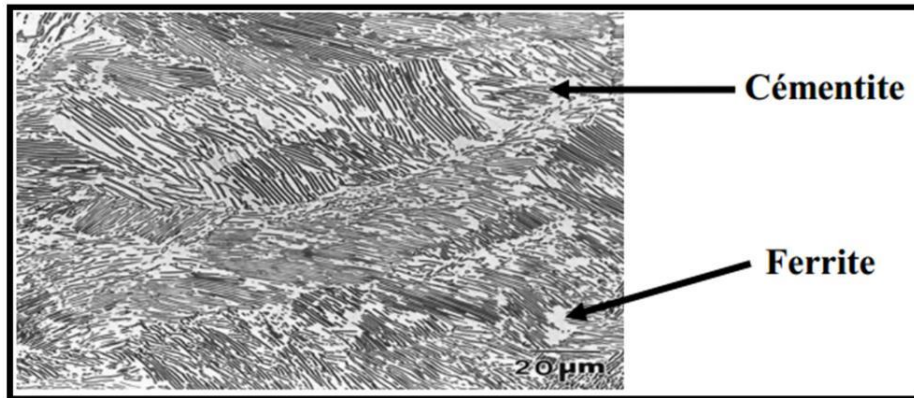


Figure 5: Structure perlitique [5]

- **L'acier du type hypereutectoïde:**

(%C ∈] 0,85%, 2,1%) formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe₃C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans de la cémentite.

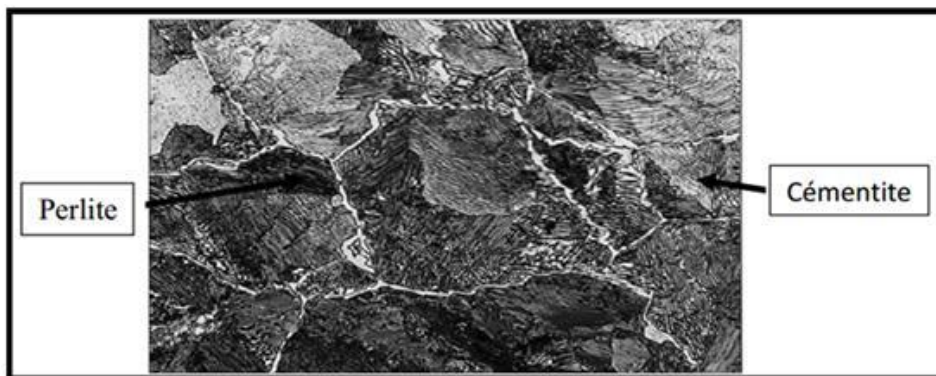


Figure 6: Microstructure d'un acier hypereutectoïde [5]

- **Martensite :**

Quand on refroidit lentement l'austénite, la ferrite fait son apparition; mais si le refroidissement est très rapide, les atomes de carbone n'ont pas assez de temps pour passer de la structure CFC à la CC et une structure CC déformée apparaît (ce n'est pas un cube, mais un prisme, appelé cristal orthorhombique) : il s'agit de Martensite. La martensite est très dure et fragile à cause de la déformation du cristal, La microstructure de la martensite est vue au microscope comme une soupe de pattes d'araignée noire.

- **Martensite de revenu :**

La martensite des acier est très dure mais très fragile, c'est un phase métastable que a tendance à décomposer es phase d'équilibre, ferrite et cémentite à la température ambiante la durée de cette décomposition étant excessivement longue par contre lorsque la température augmente ce phénomène de décomposition s'accélère , c'est le revenu.

Au cour de revenu la martensite rejette l'excédent de carbone et se transforme en ferrite et en carbures, l'austénite résiduelle se transforme également en ferrite et en carbures



Figure 7: a) Le C dans la solution de martensite.

b) Micrographie de la martensite.

I.1.5. Types d'aciers

Les aciers sont classés en quatre catégories principales selon la norme européenne EN 10027:

- Les aciers non-alliés d'usage général (construction), dits « aciers à ferrer les ânes ».
- Les aciers non-alliés spéciaux: sont utilisés pour les traitements thermiques, malléables, soudables, forgeables,...
- Les aciers faiblement alliés: ce sont des aciers pour traitements thermiques (dans la teneur de chaque élément d'addition est <5% et <1% pour le Mn). Les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, et les roulements,...etc.
- Les aciers fortement alliés
- Les aciers inoxydables.
- Les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forêts.

Propriétés et utilisation :

L'utilité essentielle des aciers réside dans les valeurs élevées des propriétés mécaniques fondamentales : résistance aux efforts : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique dureté, résistance aux chocs (résilience).

Donc les aciers restent préférés dans presque tous les domaines d'application technique:

- Équipements publics (rails, signalisation).
- Industrie chimique, pharmaceutique et nucléaire (cuves, réacteurs, tuyauteries).
- Moyens de transport (automobile, aéronautique, ferroviaire, aérospatial).
- Médical (instruments et appareils).

Les propriétés des aciers restent modifiables en ajoutant d'autres éléments surtout métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer amplement leurs propriétés par des traitements thermiques prenant en surface ou à cœur de la matière, on parle alors d'aciers traités [2]

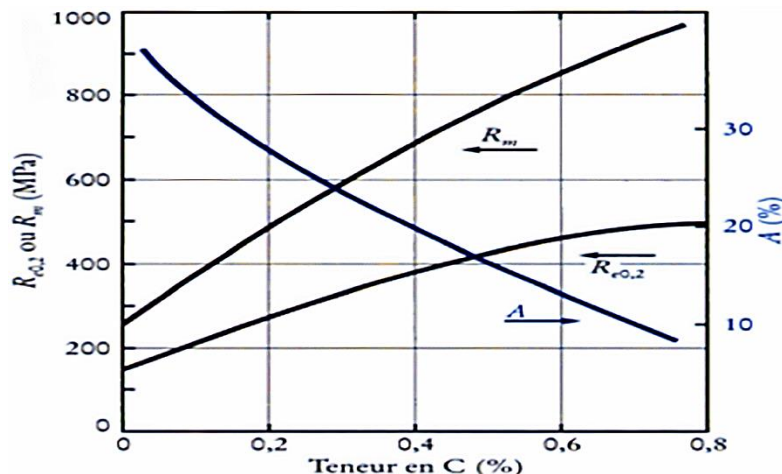


Figure 8: Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone [6]

I.1.6. Elaboration d'acier

Les matières premières nécessaires pour l'élaboration de l'acier :

- Fonte liquide ou solide (selon le procédé).
- Ferraille.
- Additions.
- Ferro-alliages (alliages de métaux).

La masse principale de la charge (90% à 95%) se compose de la fonte et de la ferraille, la composition de la fonte doit correspondre aux exigences du procédé utilisé.

Les métaux alliés sont utilisés le plus souvent sous forme de ferro-alliages, destinés à obtenir des aciers de propriétés bien définies. Les additions sont le calcaire sous forme de CaCO_3 ou CaO ou CaF_2 utilisé pour l'affinage électrolytique.

La ferraille, le calcaire, les ferro-alliages et CaF_2 sont introduits dans les fours ou convertisseurs à l'état solide, dans certains cas sont chauffés au préalable.

La fonte est introduite soit à l'état liquide (1250°C) dans le cas des procédés par soufflage d'air ou d'oxygène ce qui nécessite un préchauffage du four. La chaleur est obtenue lors de l'oxydation des éléments alliés au fer dans la charge, ce procédé ne nécessite aucun apport de chaleur extérieure pour atteindre la température de fusion de l'acier (1600°C), soit à l'état solide, dans le cas des procédés des fours à sole, ce qui exige de fournir de la chaleur en grande quantité pour la fusion de la charge solide atteindre la température de fusion de l'acier, la chaleur utilisée est la chaleur de combustion du combustible tels que mazout, gaz naturel ou énergie électrique.

Processus d'élaboration de l'acier

Le principe de l'élaboration de l'acier est l'oxydation des éléments accompagnant le fer, tels que le carbone, le silicium, le phosphore, le manganèse etc. jusqu'à la teneur désirée dans l'acier, ainsi que l'élimination des différents oxydes du métal liquide.

Ces éléments sont éliminés soit sous forme de scorie ou de gaz. Donc le métal liquide est toujours en contact avec la scorie formée et la phase du gaz.

Les réactions chimiques se passent entre ces trois systèmes auxquels on peut ajouter un quatrième système qui est le garnissage du fer. L'acier liquide-scorie-phase de gaz est une condition idéale facilitant le transfert et la transformation de la matière.

Pour cela le métal doit absorber l'oxygène de l'air ou l'oxygène pur ou l'oxygène contenu dans les oxydes de fer de minerais ou des riblons selon les procédés d'affinage.

A la fin de l'affinage la teneur en oxygène (O_2) dans le métal liquide est généralement près de 0,1%, l'utilisation d'un acier avec une telle teneur en oxygène n'est pas économique à cause des propriétés plastiques, coulabilité etc.

Donc après l'opération d'oxydation il est nécessaire de désoxyder le métal liquide, l'opération de désoxydation est effectuée avant ou après la coulée de l'acier liquide, par addition d'éléments de désoxydation.

Le tableau ci-dessous nous montre le pourcentage des éléments essentiels tels que Fe, C, et O_2 avant affinage, avant et après l'opération de désoxydation.

Opération	%Fe	% [O]	% C
Fonte + ferraille	93	0,005	3,2-4,5
Oxydation des	99	0,05	0,2
éléments avec			
l'oxygène			
Métal liquide (acier non allié)	>99	0,05-0,1	0,01-0,6
désoxydation du			
métal liquide			
Acier non allié	> 99	0,001-0,01	selon le % désiré

Composition chimique de l'acier

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% (C<2%) outre le fer et le carbone qui en sont les éléments principaux rentrant dans sa composition, un acier ordinaire contient principalement du silicium ; du manganèse, du soufre et du phosphore.

I.1.7. Influence des éléments d'addition sur l'acier

Les aciers sont des alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% outre le fer et le carbone qui en sont les éléments essentiels rentrant dans leur composition, ils se composent de plusieurs autres inclusions ou impuretés constantes ou inévitables telles que Mn, Si, P, S, O, M, H, etc... qui influent sur leurs propriétés. La présence de ces inclusions s'explique : [4]

- Soit par la difficulté de l'élimination de certaines d'entre elles lors de l'élaboration (S,P).
- Soit par leur passage dans l'acier lors de l'opération de désoxydation (Mn, Si).
- Soit encore par addition en vue d'améliorer les propriétés de l'acier (Cr, Ni, Mo, etc.).

Les fontes contiennent ces mêmes inclusions ou impuretés mais en quantité plus grande. L'influence des éléments chimiques sur les propriétés de l'acier peut être divisée en deux groupes : les éléments chimiques constants et les éléments d'alliages.

Influence des éléments chimiques constants

La fragilité et la plasticité sont les propriétés essentielles de l'acier, le même métal peut être ductile ou fragile suivant :

- La composition chimique.
- L'état de surface.
- Et la température.

Parmi les éléments chimiques, généralement contenus dans les aciers ordinaires, on peut citer :

- Le carbone
- Le silicium
- Le manganèse
- Le phosphore
- Le soufre
- l'azote,
- l'oxygène et l'hydrogène

Le tableau ci-dessous nous montre l'influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers [2]

Propriétés	Eléments d'addition											
	Carbone	Si	Mn	Ni	Cr	W	Va	Mo	Co	Ti	Pb	S
Résistance à la traction	++	+	++	+	++	+	+	++	+	+	+	
Dureté	++	+	++	+	++	+	+	++			+	
Malléabilité	-		+	++	+	+	+	+		+	-	-
Résilience	-		+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Magnétisme		-		-	+	++			++			
Résistance au feu	-	-	-	+	++	+		+		+		
Elasticité	+	++	+		+		+	+				
Forgeabilité			+	+			+	+		+		-
Soudabilité	-	-	+				+	+				-
Usinabilité	-	-	-		-			+			+	+
Qualité de coupe	+	-			+	++	++	+	++	+	-	-
Commentaires : + Augmentation ++ Augmentation importante - Diminution												

Tableau 1: Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers

I.1.8. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'acier

L'addition des éléments d'alliages peut donner lieu :

- A la formation des solutions solides dans le fer.
- A la dissolution de ces éléments dans la cémentite en remplaçant dans son réseau les atomes de fer ou à la formation des carbures particuliers.
- A la production (lorsque la teneur en éléments d'alliage est élevée) des composés intermétalliques avec le fer.

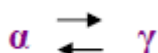
Les éléments d'alliages ont une influence sur les transformations allotropiques du fer. Tous ces éléments

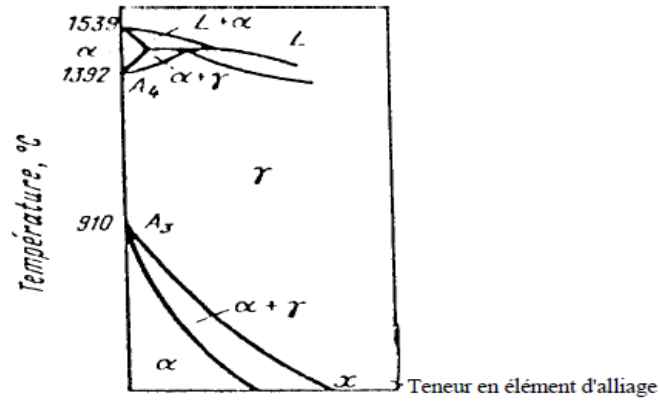
à l'exception de C, N, H et en partie du bore, forment avec le fer des solutions solides de substitution.

Leur dissolution dans le fer influe fortement sur les positions des points A₁, t (1392°C) et A₃ (910°C) qui déterminent le domaine des températures d'existence du fer α et γ . L'action exercée par les éléments d'alliages sur les variétés allotropiques du fer permet de les classer en deux groupes :

a) Eléments gamagènes (Ni, Mn)

Ces éléments abaissent le point A₃ et élèvent le point A₄ ce qui donne une extension du domaine de la phase γ et une réduction du domaine de la phase α . La figure montre que l'addition de ces éléments fait monter le point A₄ jusqu'à la ligne du solidus. Alors que dans les conditions d'une concentration élevée de l'élément d'alliage le point A₃ descend jusqu'à l'ambiante empêchant ainsi la transformation [7]





b) Eléments alphagènes

Ce sont les éléments tels que Cr, W, Mo, V, Al, Si...ces éléments abaissent le point A4 et élèvent le point A3. Il en résulte que pour une concentration déterminée des éléments d'alliages, les lignes de transformation A3 et A4 se rencontrent et le domaine de la phase γ , se trouve complètement fermé, c'est à dire il y a extension du domaine de la phase α (ferritique) et un rétrécissement du domaine γ (austénitique). Les alliages de ce type sont dits " ferritique ". Lorsque la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ ne se produit que partiellement, les alliages s'appellent semi-ferritiques. [7]

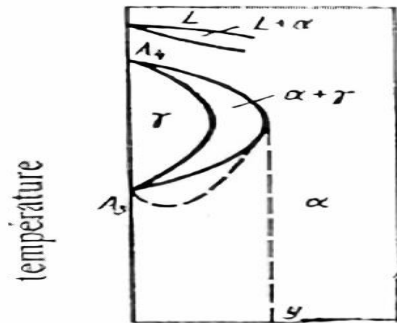


Figure 9: Teneur en éléments d'alliages

I.2. Principaux fours électriques utilisés pour l'élaboration des aciers et des alliages

I.2.1. Introduction

Le chauffage est l'une des habitudes journalières de tout individu depuis toujours. En plus d'être un besoin personnel, application domestique, elle a trouvé plusieurs applications dans les industries. Plusieurs technologies sont donc développées afin de pourvoir à cette nécessité. L'une d'elle est la technologie du four.

Ce dernier se retrouve sous plusieurs formes dont les fours électriques. Quels sont les variétés de fours électriques existants, leurs principes de fonctionnement et leurs constitutions

I.2.2. Four électrique

L'électrometallurgie occupe un rôle de leader dans le domaine de l'élaboration des aciers de qualité et des aciers hautement alliés. Ce mode de fusion, grâce à certaines spécificités est destiné à obtenir un métal de très haute qualité à basse teneur en soufre, phosphore, oxygène et en d'autres éléments nuisibles ou indésirables (métaux à basse température de fusion). Il permet aussi d'élaborer des aciers à haute teneur en éléments d'alliages tels que le chrome, nickel, manganèse, silicium, molybdène, tungstène, vanadium, titane, zirconium et d'autres éléments permettant à l'acier d'avoir des propriétés spécifiques.

Définition

Un four est toute enceinte ou appareil qui permet de faire subir des transformations chimiques et physiques à un corps grâce à de la chaleur. Il utilise pour cela des sources d'énergies calorifiques diverses. Cependant lorsque la chaleur est tirée de l'électricité on le qualifie de four électrique.

Pour cela l'avantage de four électrique réside dans l'utilisation de l'énergie électrique pour le chauffage et la fusion du métal comparant lui avec les autres modes d'élaboration d'acier (convertisseur, four Martin).

Dans les fours électriques, le dégagement de chaleur se déroule soit directement à l'intérieur du métal même, soit immédiatement à sa surface.

Ceci permet de chauffer le métal à une grande vitesse jusqu'à de hautes températures et dans des cas particuliers jusqu'à la température d'ébullition et aussi de concentrer dans un petit volume, une grande puissance et quantité d'énergie.

L'autre avantage est que la consommation d'énergie et la variation de l'énergie peuvent être contrôlées et automatisées.

Un autre avantages qui possède un four électrique c'est que la fusion peut se dérouler dans n'importe quel type d'atmosphère : oxydante, réductrice, neutre et dans un large intervalle de pression : sous vide, sous pression atmosphérique normale ou à haute pression.

Classification des fours électriques :

Les fours électriques sont sensiblement différents par leur mode de transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique, le transfert de l'énergie de la source de chaleur au métal chauffé. En fonction de cela, les fours électriques sont divisés principalement en deux groupes :

- Les fours à arcs électriques
- Les fours à résistance

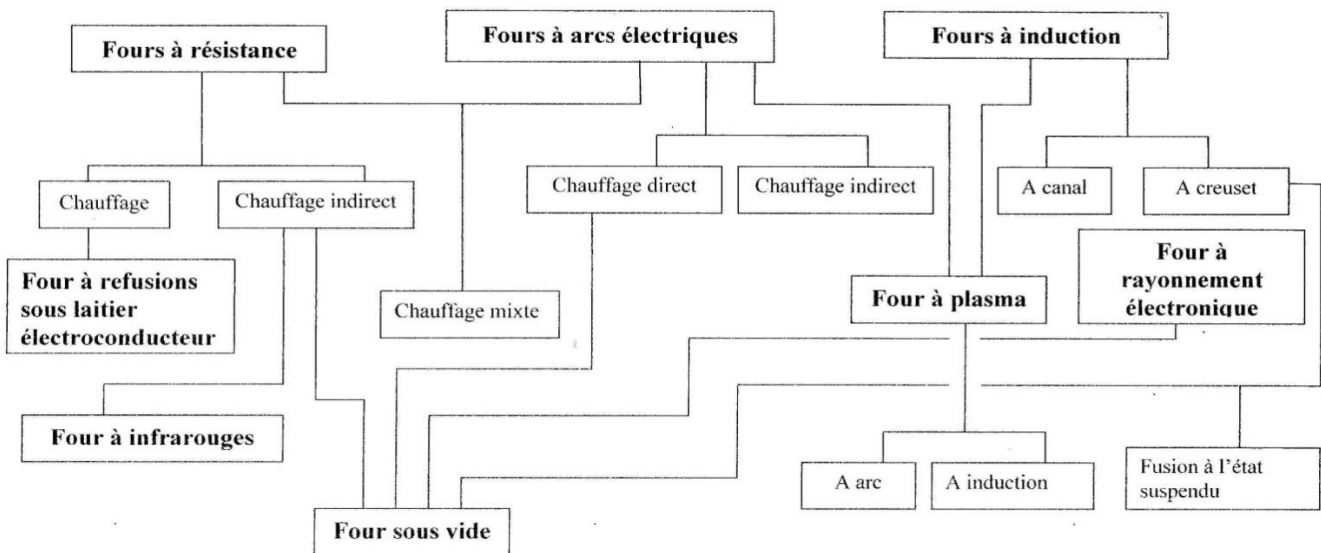


Figure 10: Schéma présente une vue générale sur la classification des fours électriques

I.2.3. Four à résistance

I.2.3.1. Définition

Un four électrique dans lequel la chaleur est développée par le passage du courant à travers une résistance interne appropriée qui peut être la charge elle-même, une résistance intégrée dans la charge ou une résistance entourant la charge.

Le four à résistance est basé sur le fait que lors du passage du courant électrique à travers un conducteur, il se dégage une certaine quantité de chaleur. Selon la loi de Joule-Lenz, la quantité de chaleur qui se dégage dans le conducteur est proportionnelle au carré de l'intensité, la résistance électrique et le temps de passage du courant : $Q = I^2 R t$, joule. Ainsi, en sélectionnant une certaine intensité et résistance électrique, on peut obtenir une puissance suffisante pour fusionner le métal.

En qualité de conducteur, on peut utiliser un conducteur spécial ou le métal à fusionner. Les fours dans lesquels l'élément de résistance est le métal sont appelés fours à résistances à chauffage direct. Seulement, la résistance électrique étant en général faible (les métaux sont de bons conducteurs électriques), la chaleur dégagée reste insuffisante afin d'atteindre de hautes températures. C'est pour cela, que pour fusionner un métal on utilise les fours à chauffage indirect, dans les lesquels la chaleur se dégage dans un conducteur spécial et à partir duquel se transmet la chaleur.

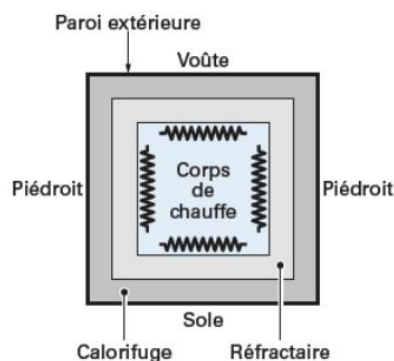


Figure 13: Représentation schématique d'un four à résistance [12]

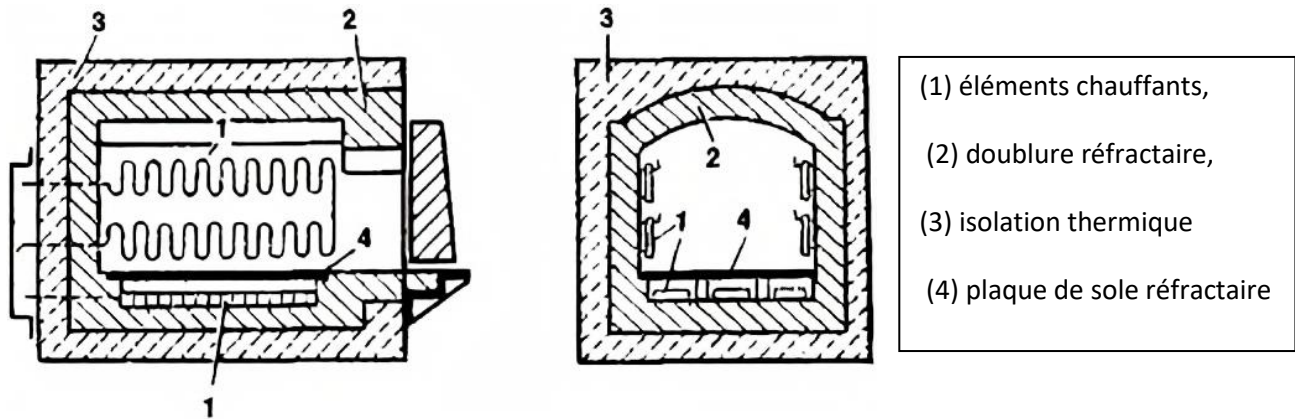


Figure 14: Schéma d'une chambre de résistance à chauffage indirect du type discontinu [13]

I.2.3.2. Caractéristiques de four à résistance

Un four à résistance est essentiellement constitué (Figure :)

- d'une enceinte (laboratoire ou chambre de chauffe) réalisée à partir de matériaux à caractère isolant ou réfractaires dont le rôle est de réduire les pertes thermiques par transmission vers l'extérieur ;
- de résistances électriques disposées en voûte, en sole ou sur les parois latérales (pariétales) de l'enceinte. Leur alimentation est assurée soit directement par le réseau, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs ; un système de modulation de la puissance y est associé, piloté par un système de régulation de température ;
- de la charge à traiter, caractérisée par sa forme, sa nature et sa température initiale.

I.2.3.3. Principe de fonctionnement

La puissance électrique $P(W)$ dissipée dans l'élément chauffant de résistance $R(\Omega)$ est transformée en chaleur par effet joule ; elle s'exprime par la loi de Joule :

$$P = UI = RI^2 = U^2/R$$

(Avec $U(V)$ et $I(A)$ respectivement les valeurs efficaces de la tension aux bornes de la résistance et du courant électrique qui la traverse. Dans la pratique, les résistances électriques utilisées de manière classique ont une réactance faible devant R ($\cos\varphi$ voisin de 1))

Les fours à résistances procèdent par chauffage indirect, la chaleur produite par effet Joule par les résistances est transmise à la charge par rayonnement et par convection.

La chaleur est générée par des conducteurs qui offrent une résistance au passage d'un courant à travers eux

Suivant le mode de transmission de la chaleur produite par les résistances encastrées dans les parois, on a les fours à convection naturelle, les fours à chaleur tournante ou à convection forcée...

Les fours à résistance sont largement utilisés dans le traitement thermique, pour le chauffage avant mise en forme sous pression, et pour sécher ou faire fondre des matériaux.

I.2.3.4. Différents types de four électrique à résistance

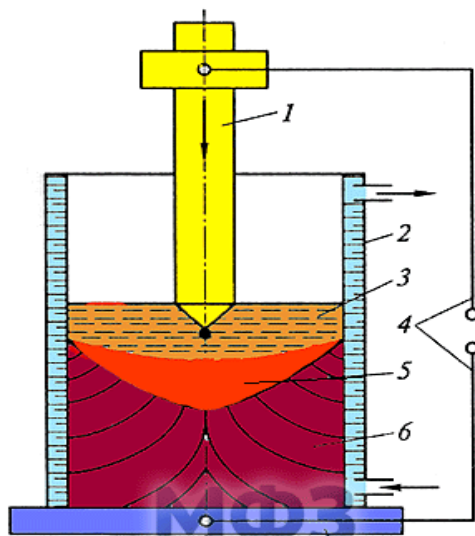
Plusieurs types de fours électriques à résistances sont connus. Prenant tous source dans le principe de base des fours électriques, ces différents types ne diffèrent que sur la base de la forme ou du mécanisme intégré dans leurs enceintes (positionnement des résistances dans l'enceinte...). Ainsi nous avons :

- Fours à sole
- Four à refusion sous laitier électro conducteur
- Fours à cloche
- Fours à plateau tournant
- Fours à chaînes et à convoyeur
- Étuves électriques
- Fours spéciaux

I.2.3.5. Four à refusion sous laitier électro conducteur

Le four de refusion sous laitier est un type d'équipement utilisé pour former une électrode fusible dans le bassin d'affinage en utilisant la chaleur générée par le courant de refusion. La goutte de métal en fusion cristallise dans le creuset d'affinage refroidie à l'eau après avoir été débarrassé des impuretés dans le bain de laitier. Ce type de four de refusion est donc principalement destiné aux opérations de chauffage, de raffinage et de cristallisation. Grâce aux propriétés purificatrices du laitier liquide, les conditions optimales de cristallisation sont réunies et le métal refondu issu de cette série d'opérations présente une grande pureté. Il est débarrassé de toute particule blanche et de tout agrégat d'impuretés. Le métal liquide issu de ce procédé se caractérise en outre par son faible taux de soufre.

Très avantageux pour la production, ce type de four de refusion sous laitier est idéal pour les pièces de taille moyenne à grande dans les opérations de forgeage. Il présente de nombreux avantages par rapport aux modèles concurrents en termes de qualité du produit final. Ce type de four est devenu un incontournable parmi les équipements de production d'acier.



- 1- Electrode consommable
- 2- Lingotière refroidie à l'eau
- 3- Laitier
- 4- circuit électrique
- 5- Métal liquide
- 6- Métal solide



Figure 15: Four à refusion sous laitier électro conducteur [14]

I.2.3.6. Avantages de four à résistance électrique

Les fours à résistance sont largement utilisés en raison de leurs nombreux avantages :

- Toute température jusqu'à 3000 ° C peut être obtenue dans la chambre du four.

- Les articles peuvent être uniformément chauffés soit en plaçant de manière appropriée les éléments chauffants le long des parois de la chambre du four, soit au moyen d'une circulation forcée de l'atmosphère du four.
- Un contrôle automatique de la puissance et, par conséquent, des conditions de température dans un tel four est facilement mis en œuvre.
- Les fours à résistance sont facilement mécanisés et automatisés, allégeant ainsi le travail du personnel et facilitant l'inclusion de tels fours dans les lignes de transfert automatique. De plus, ils sont compacts.
- Un four à résistance peut être bien scellé, auquel cas le chauffage est effectué sous vide, ou il peut contenir soit un milieu gazeux qui empêche l'oxydation, soit une atmosphère spéciale pour le durcissement chimique, par exemple, pour la cémentation ou la nitruration. [13]

I.2.4. Four à arc électrique

I.2.4.1. Historique

Bien que les premiers fours électriques aient été conçus initialement pour l'élaboration de l'aluminium et des ferroalliages, l'introduction de l'aciérie électrique dans le domaine des métaux ferreux a marqué une rupture décisive dans les modalités de la fabrication du fer et de l'acier, car ce type de four peut fonctionner à partir d'une charge composée à 100 % de vieilles ferrailles recyclées.

Le premier four destiné à fondre de l'acier a été inventé vers 1900 par le français P. Héroult mais, à cause du coût de l'énergie électrique, la production industrielle d'« acier électrique » n'a vraiment démarré qu'après la Seconde Guerre mondiale. Depuis cette époque, ce procédé n'a cessé de croître au détriment de la filière fonte et l'on estime qu'en 2005, il représentera environ la moitié du tonnage d'aciers, moulée et corroyée, produite en Europe.

Les fours à arcs ont également connu de nombreux développements en terme de capacité, de puissance spécifique et de productivité. Actuellement une quarantaine de fours à arcs est utilisée par la fonderie française. Ils ont des capacités qui vont de quelques tonnes, à une centaine de tonnes. Les plus gros fours se retrouvent notamment dans les fonderies adossées à des groupes sidérurgiques ou dans les fonderies de grosses pièces.

Leurs puissances spécifiques qui n'ont cessé d'augmenter varient entre 500 à plus de 1 000 kVa par tonne enfournée

I.2.4.2. Définition

Un four à arc est un type de four électrique utilisé en métallurgie. Il utilise l'énergie thermique de l'arc électrique établi entre une (ou plusieurs) électrode(s) de carbone et le métal pour obtenir une température suffisant à sa fusion.

Fours à arc industriels varient en taille de petites unités d'environ une tonne capacité (utilisé dans les fonderies pour la production de fonte produits) jusqu'à environ 400 unités de tonnes utilisés pour la fabrication de l'acier.), Ils sont principalement utilisés pour la production d'acier liquide (environ 35 % de la production mondiale) à partir de ferraille de récupération où les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, ce dernier fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. [15]

Ils sont utilisés aussi pour le recyclage des métaux (par exemple pour récupérer le zinc de poussières et déchets métallurgiques)

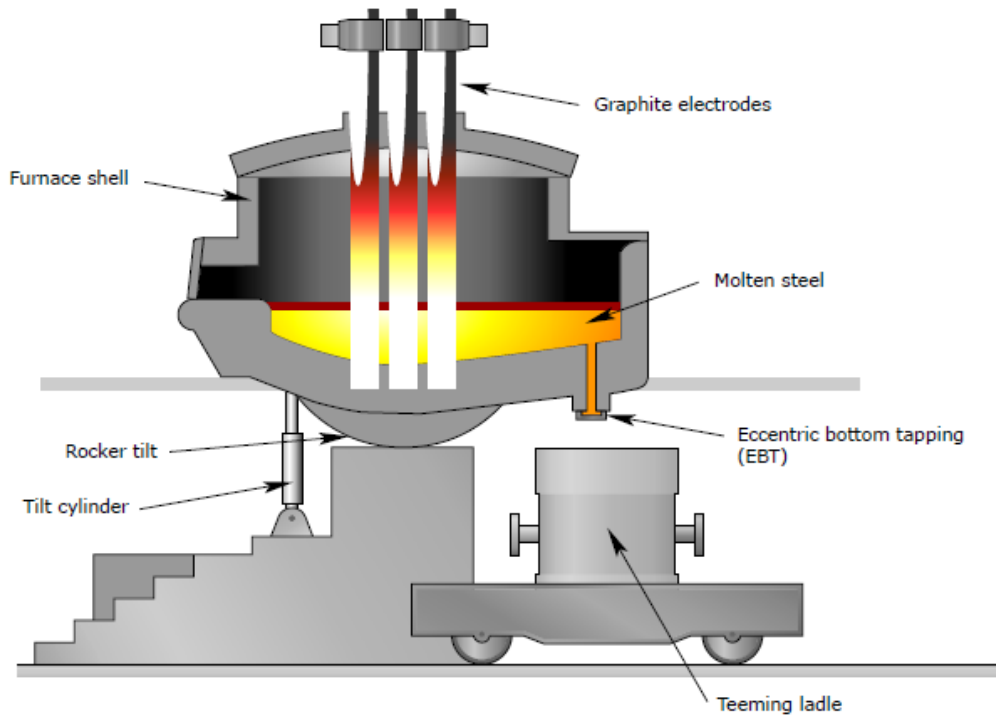


Figure 16: Four à arc électrique échelle haut + échelle bas

• **Définition d'Arc électrique**

L'arc électrique est une des formes de charges dans les gaz ; sous forme d'un court-circuit entre l'extrémité de l'électrode et la surface du bain

Pour produire un arc, il suffit de mettre en contact les extrémités de deux électrodes et d'envoyer un courant de forte intensité.

Celui-ci crée une chaleur intense au point de contact ; lorsque les électrodes se séparent, un arc se forme entre elles, le gaz séparant les électrodes est partiellement ionisé et devient conducteur. La décharge est principalement véhiculée par les électrons en migration, de l'électrode négative (cathode) vers l'électrode positive (anode), mais aussi en partie par les ions positifs (cations) qui se déplacent dans la direction opposée. L'impact des ions produit une chaleur intense.

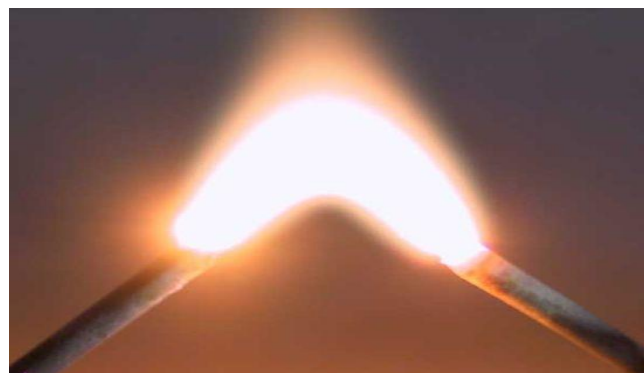


Figure 17: Arc électrique simplifiée

I.2.4.3. Principe

Le principe de ce four consiste à faire éclater un arc électrique entre une électrode en graphite qui amène le courant électrique et la charge métallique à fondre qui sert de masse. La chaleur dégagée par cet arc est directement utilisée pour la fusion.

Dans une enveloppe réfractaire (non-fermée pour en évacuer les vapeurs), une forte tension électrique est appliquée entre des électrodes (graphite-carbone) et le métal à faire fondre. Cette tension fait jaillir un arc électrique. Les câbles électriques, l'enveloppe, le toit (ou la coupole) et certains éléments sont refroidis à l'eau ou un autre fluide caloporteur.

La température engendrée par l'arc dépasse 1 800 °C et peut atteindre les 3 600 °C. Du fait de ces températures, ces types de fours sont beaucoup plus développés pour l'industrie métallurgiste.

Il est composé essentiellement d'une cuve, d'un berceau de basculement et d'une voûte.

I.2.4.4. Type des fours à arc électrique

I.2.4.4.1. Four à arc d'après leur nature d'arc

- **Four à arc libre**

Dans le four à arc libre, ou à arc indirecte, l'arc est maintenu entre les électrodes disposées horizontalement sur la charge (dans lesquels la chaleur est produite par le passage de l'arc directement entre les électrodes). Il est généralement utilisé pour la fusion de la fonte ou l'acier.

Les fours à arc libre, dont la capacité s'échelonne entre 100 KVA et 500 KVA environ, sont surtout utilisés pour l'élaboration de métaux (fonte alliage, bronze, etc,...) qui ne peuvent être obtenus dans des conditions économiquement satisfaisantes avec les autres types de fours.

- **Four à arc sur résistance**

Le four à arc sur résistance, ou à arc submergé est utilisé à la fabrication des ferroalliage, ou à la réduction de certains minerais. Dans ce genre de four les électrodes sont plongées dans la charge.

- **Four à arc sur charge**

Dans ce four l'arc est maintenu entre les électrodes et la charge. Ce type de four est presque exclusivement utilisé à la fabrication de l'acier à partir de la ferraille ou autres charges métalliques.

Jusqu'à une époque récente, les fours à arc sur charge étaient utilisés pour l'élaboration d'aciers spéciaux, mais depuis 1950, des travaux menés par sidérurgies et des électriciens ont permis des accroissements considérables des puissances.

Ces fours, dites à ultra haute puissance ou productivité « **U.H.P** » peuvent fournir des dizaines de mégawatts ; ils sont alimentés à partir du réseau haute tension et permettent la production économique d'acier ordinaire à une cadence rapide

I.2.4.4.2. Four à arc d'après leur nature d'alimentation

Four alimenté en courant alternatif AC :

Le four électrique de fusion type Héroult est triphasé. Il est constitué essentiellement d'une cuve garnie de réfractaires, basculante pour la coulée et le dégraissage, et destinée à recevoir la charge métallique qui est fondue au moyen de trois électrodes verticales en graphite.

Dans le four à arc à courant alternatif triphasé, les arcs se développent entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal.

Le métal fond par attaque directe des arcs qui creusent des puits dans la charge métallique solide. Lorsque ces puits sont fermés, les arcs travaillent sur un bain liquide dont le volume augmente en cours de la fusion.

Le four se compose des éléments principaux suivants :

- **La cuve**

La cuve en tôle d'acier renforcée par des nervures est revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire. Cette cuve est composée de deux parties ; le fond ou « solide » et la virole, sur nombreux fours, cette virole est amovible et il existe une virole de recharge, on gagne un temps précieux, le four pouvant continuer à être utilisé pendant la réfection du garnissage réfractaire. La technique de garnissage a connu une évolution importante vers les années 1975 par l'apparition des viroles composées de panneaux refroidis par circulation d'eau (water-jackets) en lieu et place de la tôle revêtue de réfractaire. Deux ouvertures sont prévues dans la cuve pour la porte de dégraissage et le bec de coulée.

- **Le berceau de basculement**

Le four à arc possède deux positions de basculement :

- En avant, pour la coulée, avec un angle suffisant pour que le four se vide bien.
- En arrière, pour le dégrassage.

Le basculement est assuré par des vérins hydrauliques, dont la course limite celui-ci.

D'autre part, la disposition du centre de gravité et du centre du basculement est telle que le four a toujours tendance à revenir dans sa position normale de travail, de manière à limiter le risque d'accident en cas de défaillance du système de commande.

- **La voûte**

La voûte ou couvercle du four, est réalisée en briques réfractaires maintenues par un anneau de voûte. Elle est percée de trois trous destinés au passage des électrodes ; un quatrième trou sert à l'aspiration des fumées qui sont filtrées qui avant d'être rejetées dans l'atmosphère. Comme pour la virole, la voûte peut aussi être fermée d'éléments à circulation d'eau. Dans ce cas, seul la partie centrale autour des électrodes reste constituée de réfractaires.

Four alimenté en courant continu DC :

Le four à courant continu est semblable au four à courant alternatif. Il s'en distingue toutefois par son alimentation électrique et par présence d'une ou de plusieurs électrodes de sole.

Autrefois, les fours à courant continu de grande puissance étaient équipés d'un système de trois électrodes alimentées chacune par un redresseur spécifique. Aujourd'hui, le système mono-électrode, alimenté par un ou plusieurs redresseurs en parallèle ou en série, équipe la grande majorité des fours à courant continu.

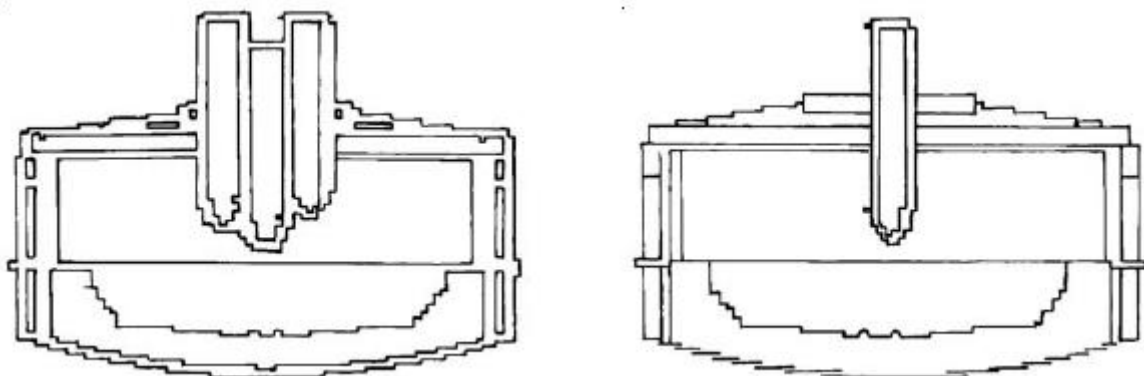


Figure 18: (a) Four à courant alternatif AC [16]

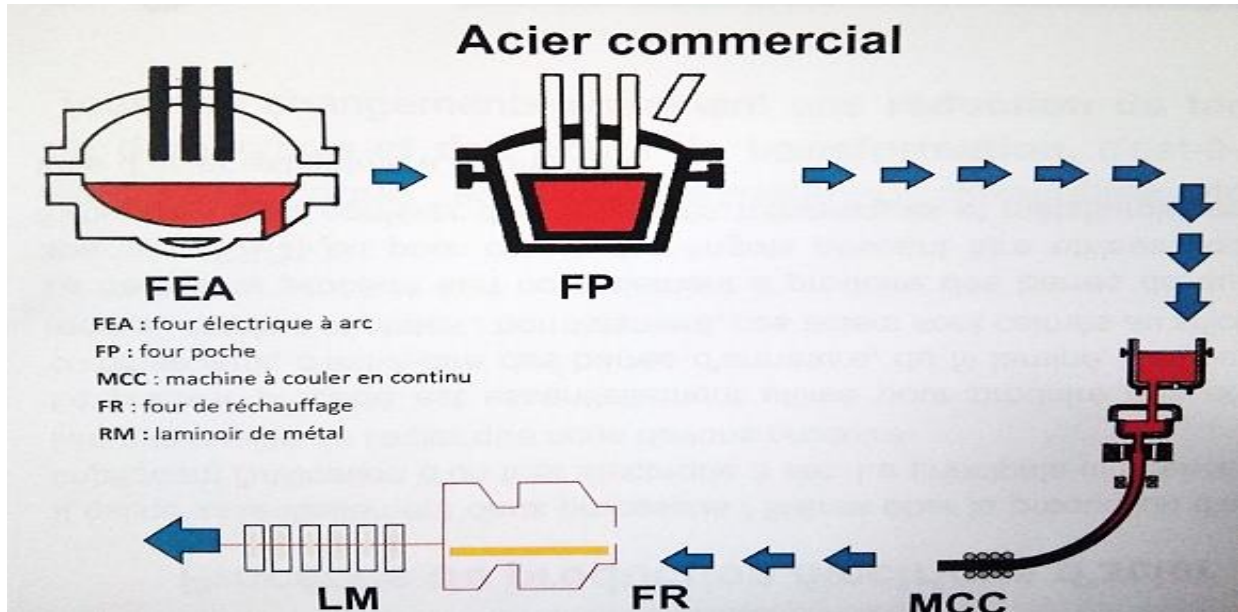
(b) Four à courant direct continu DC [16]

I.2.4.5. Procédés de production électrique d'acier en utilisant le four à arc

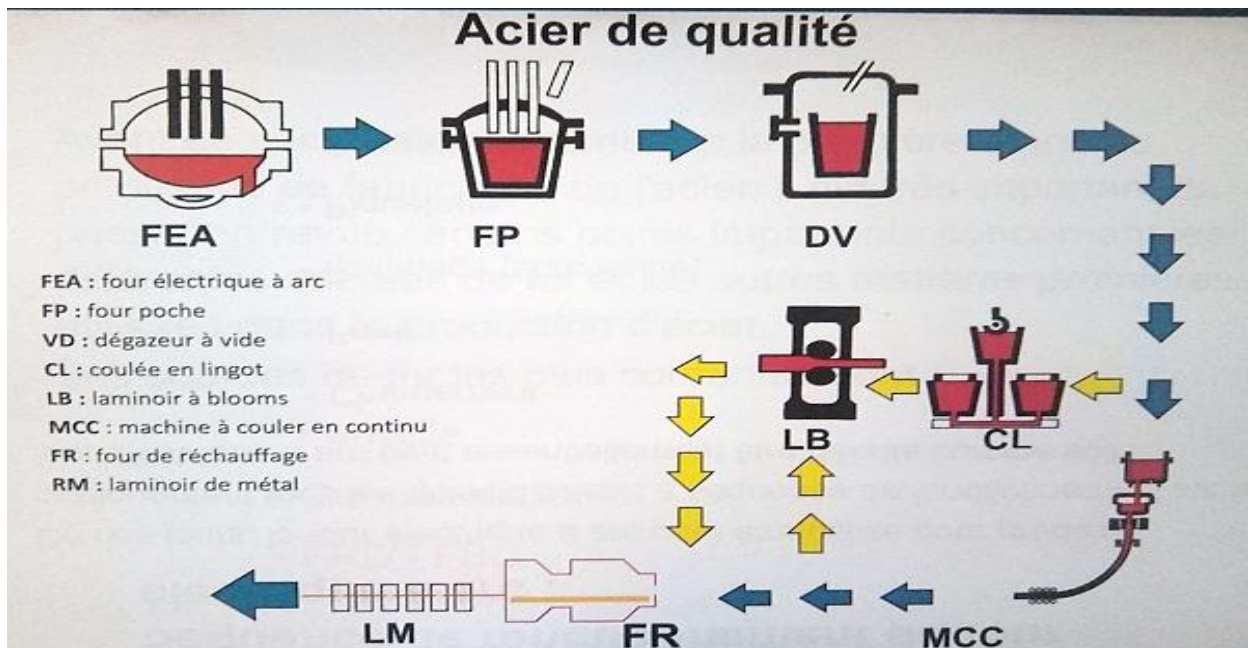
Il existe essentiellement deux processus / filières pour la production d'acier impliquant l'utilisation d'un four électrique à arc.

La principale différence est liée à la qualité de l'acier que nous devons produire.

Le premier procédé est essentiellement utilisé pour produire des aciers commerciaux, c'est-à-dire des barres d'armature, du fil laminé, des barres rondes, carrées et plates : normalement, ces aciers sont calmés au silicium



Le deuxième procédé sert normalement à produire des barres de qualité spéciale (SBQ) ou pour couler des lingots pouvant être utilisés pour le forgeage : pour conférer des propriétés mécaniques et métallurgiques, ce type d'acier est calmé à l'aluminium.



I.2.5. Conclusion

Un four électrique est un fourneau qui exécute à l'aide de l'électricité comme source d'énergie principale de chaleur. Grâce à l'électrothermie, plusieurs procédés de production de chaleur à base de l'électricité ont été découverts et appliqués au four. Les types de fours résultant ne produisant pas de gaz à effet nocif, cadrent très bien avec la tendance d'aujourd'hui qui est de produire de l'énergie sans pour autant polluer l'environnement.

Chapitre II. Technologie du four à arc électrique

II.1. Introduction

II.1.1 Historique

Le four à arc électrique appliqué dans la sidérurgie a été inventé en 1889 par Paul Héroult.

Les nouvelles technologies émergentes ont commencé au début du vingtième siècle lorsque la production d'énergie électrique relativement pas chère a commencé à cette époque. Les fours de première génération avaient une capacité comprise entre 1 et 15 t. Le four à arc avait des convertisseurs Bessemer / Thomas et des fours Siemens Martin comme des forts concurrents

Au début ; Mais sa spécialité était la production d'aciers spéciaux nécessitant une température élevée, une fusion des ferroalliages et de longs temps de raffinage.

Dans les années 1960, avec l'avènement de la coulée de billettes, le four à arc a occupé un nouveau domaine : l'unité de fusion pour les soi-disant mini-mills, alimentant les billets pour la production de Rond à béton et fil à machine.

Il est intéressant de constater que le four électrique moderne n'est pas tellement différent dans ses principes de celui inventé au début du siècle par Héroult.

Parmi les développements récents, mention doit être faite :

- du four électrique à courant continu, à une ou trois électrodes, dont plusieurs unités sont en marche industrielle en 1990
- du four électrique à plasma, où les électrodes sont remplacées par des torches à plasma, limité jusqu'à présent à des niveaux modestes de puissance, et pour des applications à des aciers fortement alliés

II.1.2. Evolution

En 1950, la production d'acier annuelle dans le monde atteignait 190 millions de tonnes, et se répartissait de la façon suivante, par procédé d'élaboration :

- Four Martin..... 80 %
- Convertisseurs Bessemer et Thomas..... 12 %
- Four électrique à arc 8 %

En 1989, la production mondiale d'acier atteignait annuellement ; 780 millions de tonnes, dont 500 millions de tonnes hormis l'URSS, les pays de l'Europe de l'Est et la Chine.

La production de ces 500 millions de tonnes se répartissait ainsi par procédé d'élaboration :

- Four Martin 2 %
- Convertisseurs Bessemer et Thomas 0 %
- Four électrique à arc..... 32 %
- Convertisseur à l'oxygène 66 %

en 1989, la part du four Martin représentait encore près de 50 % de la production d'acier dans les pays d'Europe, mais uniquement pour des raisons de maintien conjoncturel d'installations par ailleurs obsolètes.

Hormis d'Europe, l'évolution des procédés de production d'acier dont le four à arc électrique, a connu un véritable bouleversement au cours de ces dernières décennies, et particulièrement de 1965 à 1980.

Comment expliquer un bouleversement aussi rapide dans une industrie comme la sidérurgie où les investissements sont particulièrement lourds ?

La raison principale réside dans la production massive d'oxygène pur pour des raisons militaires, de sorte que, la paix revenue, ce gaz se trouvait économiquement à la portée d'applications nouvelles, tout au moins à l'échelle industrielle.

Ainsi, cette possibilité de produire l'oxygène pur à un prix abordable pour l'industrie allait révolutionner la production d'acier, en Europe tout d'abord, puis progressivement dans le reste du monde.

Avant 1950, le four électrique, était réservé à l'élaboration d'aciers spéciaux.

Les progrès réalisés pendant la guerre mondiale, en taille et puissance des unités, permirent, dès 1950, au four électrique de rivaliser avec le four Martin pour l'élaboration d'aciers au carbone à partir de ferrailles, avec la construction d'aciéries de 500 000 à 1 000 000 t/an, comportant des unités de 150 à 200 t.

Parallèlement, le four électrique de plus petite taille se développait dans les mini-aciéries (*mini-mills*) américaines, puis italiennes, et surtout après que l'apparition de la coulée continue ait permis d'abandonner la coulée en petits lingots, dispendieuse et cause de défauts.

À partir du début des années 60, une série d'améliorations allaient faire du four électrique un outil hautement performant :

- utilisation maximale de la puissance active des transformateurs (facteur de puissance $\approx 0,7$) améliorant le rendement thermique et la productivité ;
- apparition en 1970 des fours UHP (*Ultra High Power*) avec des puissances spécifiques de 500 kVa/t
- innovation par Daido Steel des parois métalliques refroidies à l'eau à la place du réfractaire, permettant d'augmenter fortement la puissance spécifique
- conjointement, emploi de lances à oxygène, de brûleurs fuel-oxygène, d'injections de poudre, d'électrodes de qualité améliorée, utilisation de trous de coulée excentrés... permettant d'augmenter les performances et de diminuer la consommation d'électricité.

Au cours des deux décennies suivantes, pour mieux supporter le court temps de coulée requis par les roulettes, le four à arc électrique s'est réinventé en tant qu'unité de fusion uniquement.

Le raffinage de l'acier a été laissé pour le four à poche récemment introduit dans la sidérurgie.

Des grands transformateurs ont été introduits; des fours ultra-puissants ont été développés, ce qui a été rendu possible par l'adoption de la pratique du laitier moussant.

De cette façon, le temps de tap-to-tap est devenu proche du temps de coulée.

En 1985, une nouvelle spécialité pour la fabrication de l'acier électrique arrive : les produits plats, grâce à la coulée de brames fines et au laminage direct.

Cette voie de traitement a atteint un rôle important dans la production mondiale d'acier, avec près de 26% de part d'ici 2014 (Figure)

Les performances élevées du four à arc électrique (passé de 4 coulées /jour avant-guerre à plus de 25 coulées/jour en 1990), pour un investissement relativement modeste, et les disponibilités en ferrailles expliquent la place prépondérante prise par cet outil dans la sidérurgie moderne. [17]

Le tableau suivant représente la distribution de la production de l'acier à partir du four à arc électrique en 2014 (Top 10 producteurs)

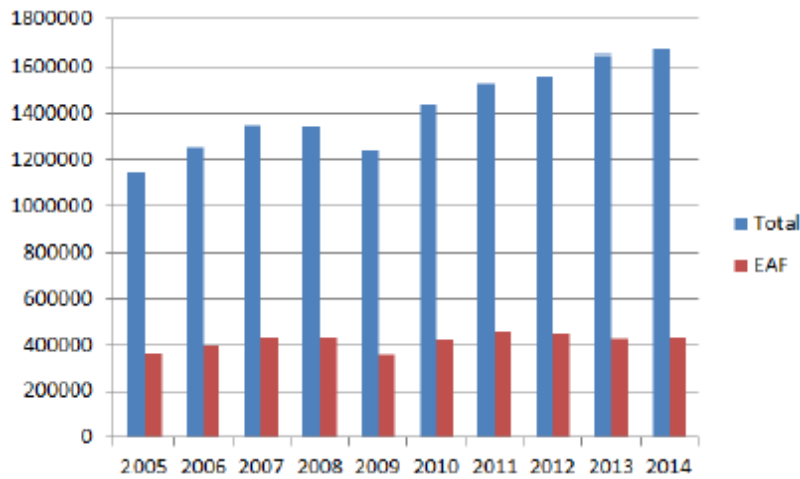


Figure 19: Production mondiale d'acier brut (Four à arc EAF par rapport au total) 2005-2014 [18]

Country	EAF production (t)
United States	55,174,000
India	50,211,000
China	49,938,000
Japan	25,679,000
South Korea	24,197,000
Turkey	23,752,000
Russia	21,852,000
Italy	17,200,000
Iran	13,607,000
Mexico	13,311,000

Tableau 03 : Top 10 producteurs d'acier à partir d'un four à arc électrique en 2014 [18]

II.1.3. Développement de la technologie du four à arc

- Les développements dans les technologies EAF depuis 1965, favorisant une consommation d'énergie électrique plus faible, un temps de tap-to-tap (la durée entre un heat et un autre) plus court et une consommation d'électrode réduite, sont illustrés à la **Figure** .
- La taille du four a été augmentée jusqu'à 350 t au maximum, ce qui, avec la diminution du temps de coulée tap-to-tap, a permis d'avoir une capacité de plus de 1 Mtpy (1 millions ton par année) avec un seul four.
- La consommation d'énergie électrique a diminué à 350 kWh/t pour des opérations à 100% ferraille.
- L'énergie chimique a augmenté à des niveaux non loin de ceux du four à base d'oxygène (BOF).
- La consommation de réfractaire a diminuer à cause du remplacement par le toit et les panneaux refroidis, la mousse de scories et l'amélioration de la qualité des réfractaires.
- Le temps de mise hors tension est maintenant <10 min pour les fours les mieux exploités
- Diminution de taux de consommation d'électrodes : par exemple la consommation moyenne d'électrodes était de 1,43 kg / t pour les ateliers de fusion du groupe ArcelorMittal

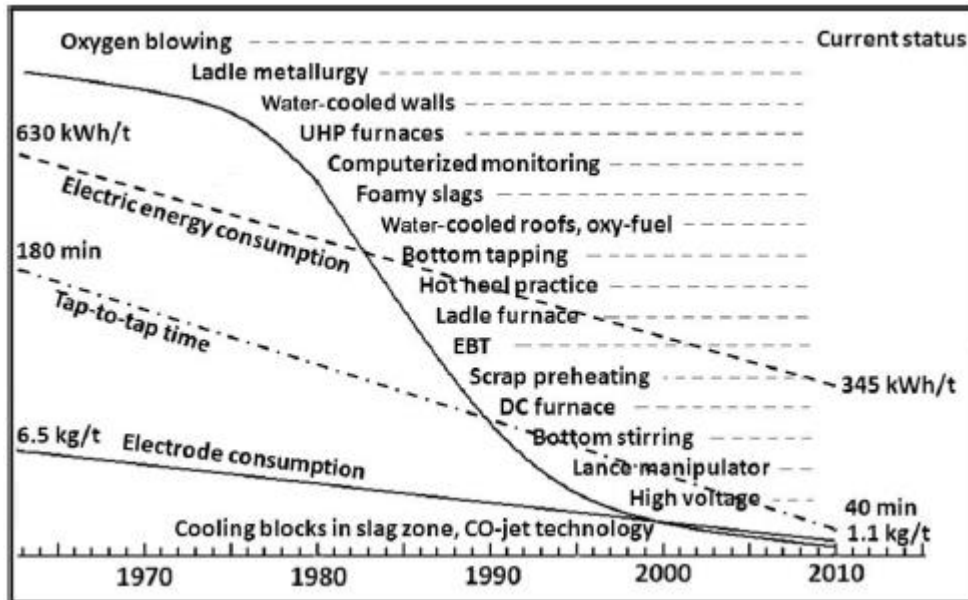


Figure 20: évolution de la technologie du Four à arc EAF 1965–2010 [17]

Electric energy consumption : consommation d'énergie électrique

Tap-to-tap time : le temps entre une coulée et une autre

Electrode consumption : consommation d'électrode

II.1.4. Description du four à arc électrique

Le four à arc électrique (F.E.A) se compose d'un cœur cylindrique ou ovale à axe vertical, fermé en bas par un couvercle concave en tôle, où la sole réfractaire est placée, et en haut par un couvercle nommé toit.

Pendant la première période de développement de cette technologie, la coque était entièrement recouverte de matériau réfractaire, ces dernières décennies, et à cause de l'installation d'une puissance électrique plus élevée et l'utilisation d'énergie alternative, les contraintes thermiques sur les réfractaires ont augmenté et les panneaux métalliques refroidis à l'eau (water-cooled panels) ont commencé à remplacer une partie du matériau réfractaire.

Les panneaux sont montés à une certaine distance au-dessus de la ligne de laitier, afin d'empêcher l'acier liquide du four de les toucher.

Dans la zone de trou de coulée, les panneaux refroidis sont montés à une position plus haute, afin de permettre la variation du niveau d'acier liquide lorsque le four est incliné, sans contact entre l'acier liquide et les panneaux.

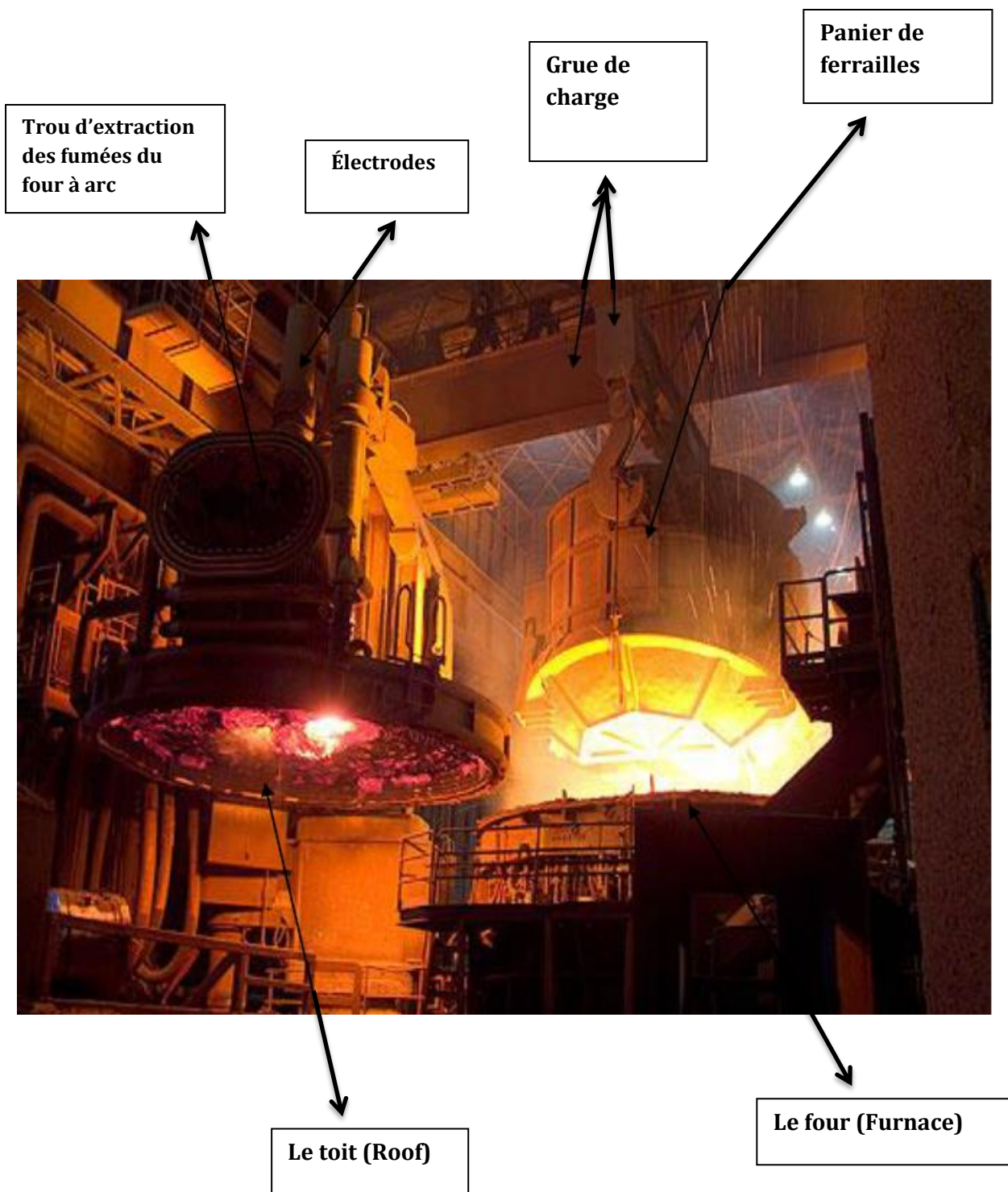
L'arc électrique est conçu pour produire de l'acier liquide avec l'utilisation intensive de l'énergie électrique. L'alimentation électrique dans le four permet la fusion de la charge métallique, composée de différents matériaux ferreux (ferraille d'acier, DRI : fer réduit directement, fer solide ou fondu, etc.).

Dans le four à arc, l'énergie électrique est transférée par électrodes afin de fondre la charge de la ferraille puis transférée au bain métallique en fusion.

Les fours à arc direct ont une alimentation en courant alternatif et ils sont triphasés, c'est-à-dire avec trois électrodes. À l'intérieur, l'arc se stabilise entre l'extrémité de l'électrode et la charge métallique, dont la fusion est principalement effectuée par les effets du rayonnement de l'arc.

Le chauffage du métal est dû à la transmission de chaleur par convection, conduction et rayonnement dans la zone chaude (les puits formés) attaquée par l'arc électrique.

Le processus de transformation de charge métallique en bain liquide est facile à contrôler grâce au control des paramètres électriques et des énergies alternatives utilisées.



II.2. Arc électrique

II.2.1. Définition

Un arc électrique est un courant électrique visible dans un milieu isolant (gaz, air, etc.), L'arc se crée par une ionisation du milieu isolant (généralement l'air), provoqué par le passage du courant entre deux électrodes

Une fois ionisé, le gaz crée un canal conducteur qui disperse la charge sur la surface de départ. L'arc continue alors, autant que la différence de potentiel reste suffisante.

L'arc est caractérisé par une tension basse et un fort courant. Un arc électrique peut être obtenu entre trois électrodes de charbons soumises à une différence de potentiel convenable.

Lorsque l'arc jaillit entre les électrodes, la différence de potentiel entre celle-ci devient faible : L'ionisation intense de l'espace inter-électrodes a rendu cet espace brutalement très conducteur alors qu'il était isolant.

II.2.2. Création d'arc électrique

L'arc électrique est créé principalement par le phénomène nommé : phénomène de largage d'électrons par un corps chaud est appelé : **émission thermoélectronique**

Ce phénomène consiste à exciter l'extrémité des électrodes sous tension, les électrodes sont mises en contact puis séparées après un maintien. Durant l'éloignement des électrodes, la résistance électrique au niveau des points de contact augmente ainsi que la température des extrémités sous l'effet joule.

Cela augmente l'énergie cinétique des particules en mouvement d'électrode chauffé, de ce fait, l'énergie des électrons arrive à vaincre la barrière de l'énergie potentielle à la surface et s'arracher de l'électrode

II.2.3. Propriétés

En tant qu'élément électrique, l'arc est compliqué; ce n'est pas une simple résistance ohmique fixe. Le courant est transporté par des électrons libres et des ions positifs dans un plasma à haute température dans lequel les températures peuvent être de l'ordre de 10 000 à 15 000 ° C dans les zones les plus chaudes, tombant à une température ambiante locale de, disons, 2000 ° C à la frontière. Le diamètre de cette colonne conductrice dépend du courant et est de l'ordre de 10 à 20 cm bien inférieur à celui de l'électrode en graphite. La tension dépend principalement de la longueur de la colonne et est de l'ordre de 10 V / cm.

Un arc de 300 V peut donc typiquement avoir une longueur de 30 cm. [19]

L'arc électrique, dont la forme caractéristique est au mouvement de l'air ascendant est dit arc voltaïque. Il est lumineux, instable et dégage de la chaleur. On peut en premier approximation assimiler un arc électrique à une résistance variable. Alors que, si « I » le courant de l'arc, la tension s'exprime, par la relation usuelle: $U_a = R_a \cdot I$

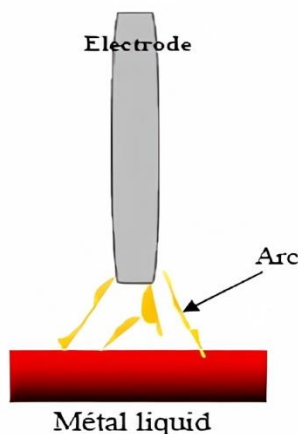


Figure 21: arc électrique

II.3. Equipements mécaniques de four à arc

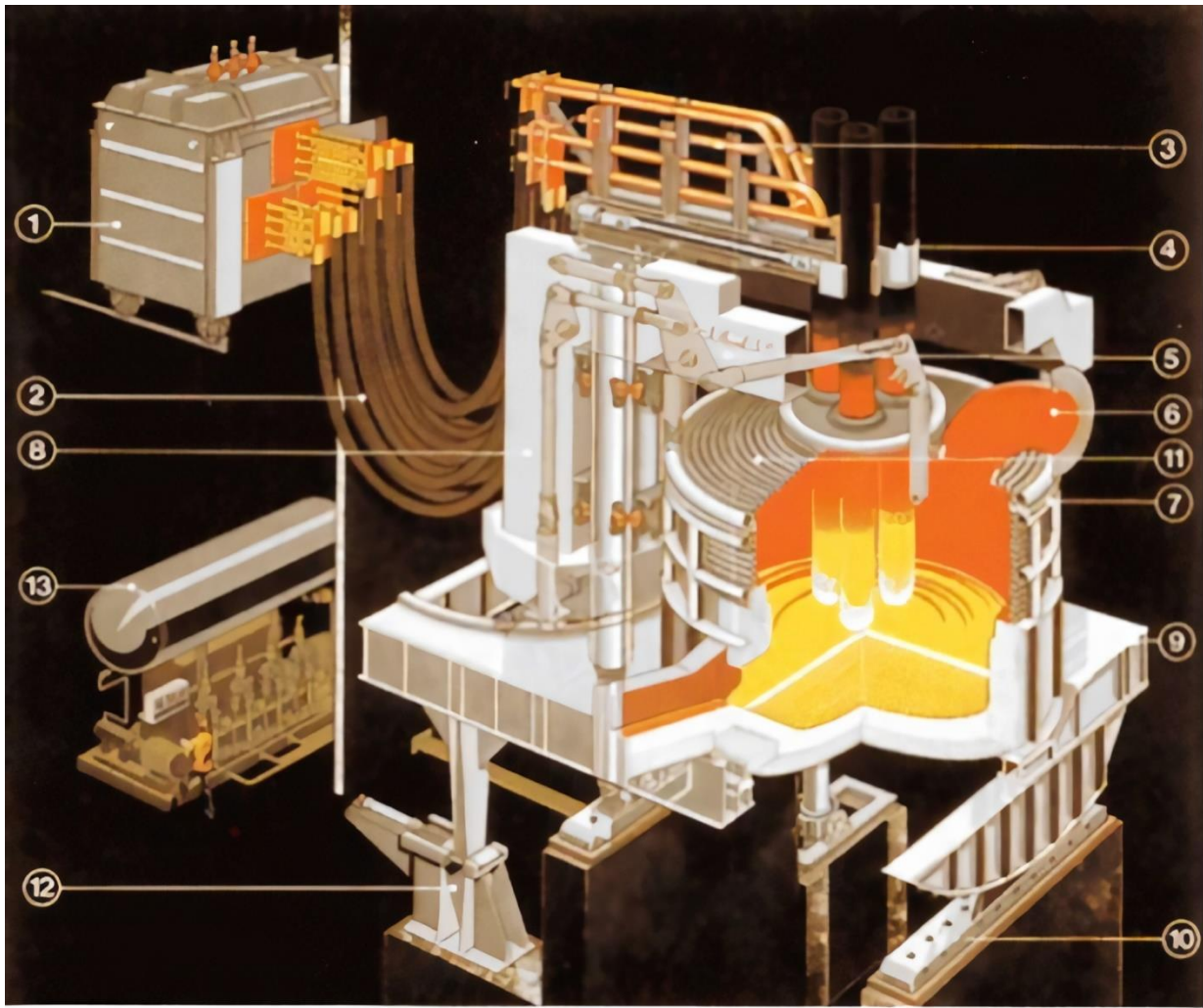


Figure 22: Conception actuelle standard du four à arc électrique [17]

- (1) Transformateur,
- (2) connexion par câble flexible,
- (3) bras d'électrode,
- (4) serrage des électrodes,
- (5) bras de levage,
- (6) conduit d'évacuation des gaz refroidi,
- (7) panneaux refroidis,
- (8) structure fixe,
- (9) structure basculante,
- (10) grille,
- (11) toit refroidi,
- (12) dispositif basculant,
- (13) groupe hydraulique

II.3.1. Coque du four

La coque du four est composée d'une partie inférieure et d'une partie supérieure.

II.3.1.1. Coque inférieure (bottom shell)

C'est la partie revêtue de réfractaires et contient le métal fondu, elle contient le trou de coulée (tap hole) et par lequel le métal fondu est versé vers la poche (ladle)

Elle est conçue pour une coulée excentrique (EBT) avec une transition en vers la section EBT.

Type de coulée : EBT : **excentrique bottom taping**

Ses avantages est de réduire la quantité de laitier dans la poche, et donc de réduire les problèmes qui suivent, elle contient la porte-scories dans laquelle le laitier est dégagé hors du four à travers cette porte.

La coque inférieure repose sur la plateforme basculante au moyen de six supports ; six tourillons permettent de soulever cette partie du four, y compris le réfractaire, sur ou hors de la plateforme.

Un soin particulier a été apporté pour fournir un accès facile au panneau de recouvrement EBT et à tous les points d'entretien courant.

II.3.1.2. Coque supérieure (upper shell)

C'est un ensemble des panneaux refroidis à l'eau (Panels), ça fonction est de contenir la ferraille chargée avant le processus de fusion, et l'expansion du taille du four

Elle contient les jets d'oxygène, de carbone, les brûleurs qui aident dans le processus de fusion

Le cadre de coque supérieure est une structure en forme de tuyau, de type cage, contenant les panneaux refroidis par eau.

Les panneaux refroidis par eau sur les parois latérales sont conçus avec un tuyau en acier vertical, avec une plaque arrière et une plaque de conception espacées. Tous les retours sont en acier forgé. Les quatre rangées inférieures de tuyaux du panneau seront en tube de cuivre, ainsi que dans le panneau de section EBT.

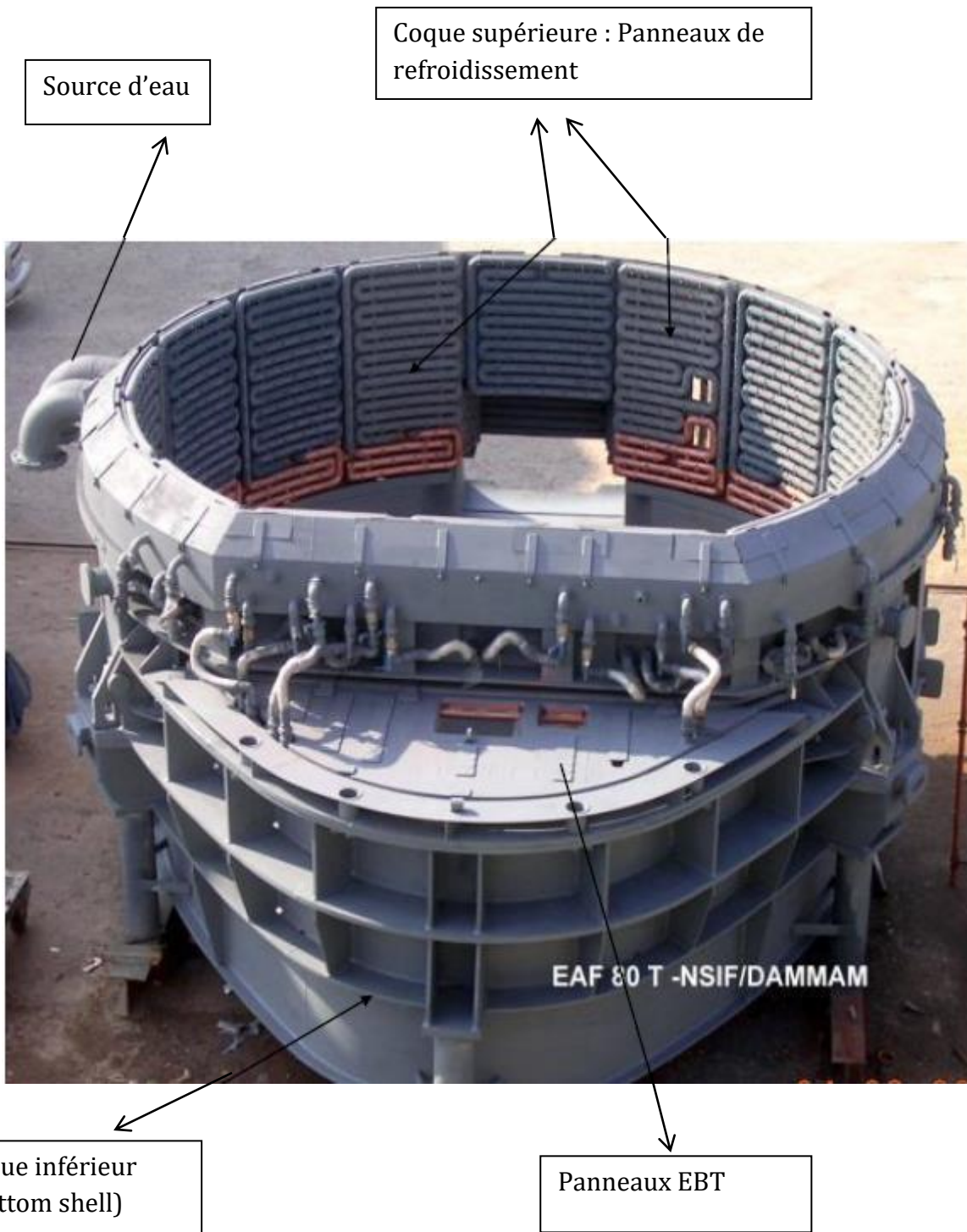
Chaque panneau sera alimenté à partir de la coque par des tuyaux flexibles en acier inoxydable. Chaque entrée et sortie de panneau aura une vanne d'arrêt à bille. La sortie de chaque panneau disposera d'un puits pour le dispositif de mesure de la température. [20]

Principales caractéristiques :

Diamètre extérieur de la coque supérieure	Environ 7 100 mm
Diamètre de coque inférieure	7 000 mm
Type de Coulée	EBT



Figure 23: panneaux de refroidissement de prés



II.3.2. Porte EBT

Mécanisme du porte EBT:

Ce mécanisme permet l'ouverture et la fermeture du trou d'écoulement, est situé sous la sole de la coque et contribue à assurer un écoulement sans scories lors de la coulée de l'acier liquide.

Pour faire fonctionner le système, un bras refroidi à l'eau fait tourner la porte aussi loin que possible afin de réduire l'effet de la chaleur émise par l'acier liquide. L'espace entre la brique d'extrémité du trou de coulée et la porte est d'environ 5 à 10 mm, ce qui garantit une fermeture efficace du trou de coulée.

Le mécanisme de rotation est installé sur le côté de la coque inférieure, protégé du rayonnement thermique à l'aide d'un boîtier en acier soudé, avec écran refroidi à l'eau.

II.3.3. TOIT (Furnace Roof)

II.3.3.1 Description

À la base, le toit du four à arc électrique est un ensemble des panneaux de refroidissement à l'eau. Il recouvre le four pour éviter les pertes de chaleur et comporte plusieurs trous :

- Trou pour charger les matières premières à l'intérieur du four
- Conduit d'aspiration des fumées (les poussières et les gazes...)
- Trous descendants d'électrode (électrodes en graphite)
- Porte-électrode
- Trous de chute : à travers lequel les minerais sont chargés à l'intérieur du four tels que la chaux, le carbone et les oxydes de fer utilisés dans la fabrication d'acier

En bref : le toit est une cage refroidie à l'eau, constituée d'un tuyau intérieur et extérieur maintenus ensemble par une tuyauterie radiale, compose la structure du toit.

Une ouverture dans la partie centrale est prévue pour loger le toit réfractaire (delta) avec des trous pour les électrodes. Des ouvertures supplémentaires sont aménagées dans le toit, une pour le conduit d'aspiration des fumées, une pour les additifs et une pour le chargement des briquettes chaudes/froides.

Cette conception répond aux exigences de rigidité élevée tout en facilitant la maintenance des panneaux de toit, car en cas de défaillance limitée à un circuit de toit, un seul panneau doit être remplacé.

II.3.3.2. Mécanisme de Levage du toit

Le toit du four est relié à l'ensemble de levage au moyen d'une fourche de levage refroidie par eau, boulonnée au toit et constituée de tôles d'acier soudées responsable de la montée et la descente du toit.

Caractéristiques principales :

Diamètre extérieur de la toiture	7100 mm
Type de pont élévateur	Pont levant

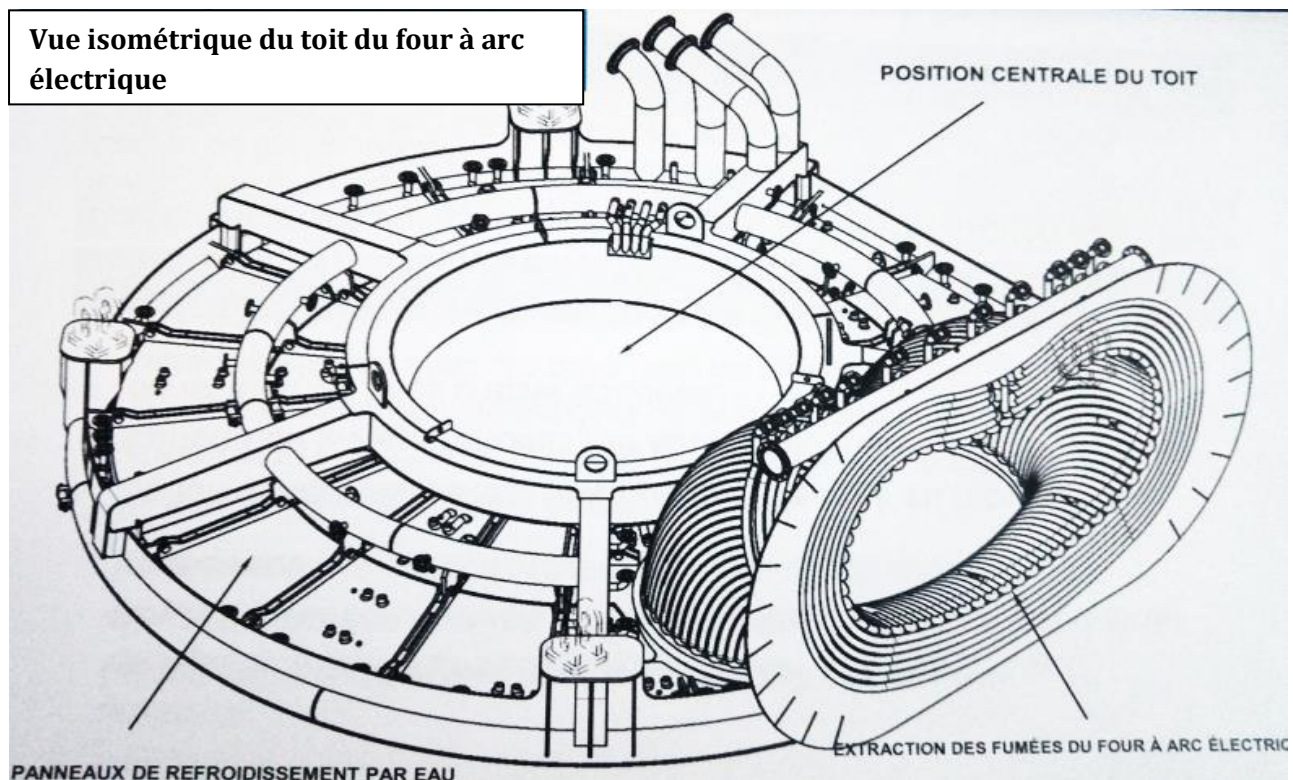


Figure 24: Vue isométrique du toit du four à arc électrique [20]

II.3.3.3. Trémie de chargement des additifs

Utilisée pour charger les additifs et les éponges de fer/briquettes dans le four à arc électrique, elle se compose de deux sections : la partie inférieure est fixée au toit du four à arc électrique et est refroidie à l'eau, la partie supérieure est en tôle d'acier soudée. Les deux sections sont reliées par une bride boulonnée, les plaques internes de la trémie de chargement sont en matériau résistant à l'usure.

Vue isométrique :

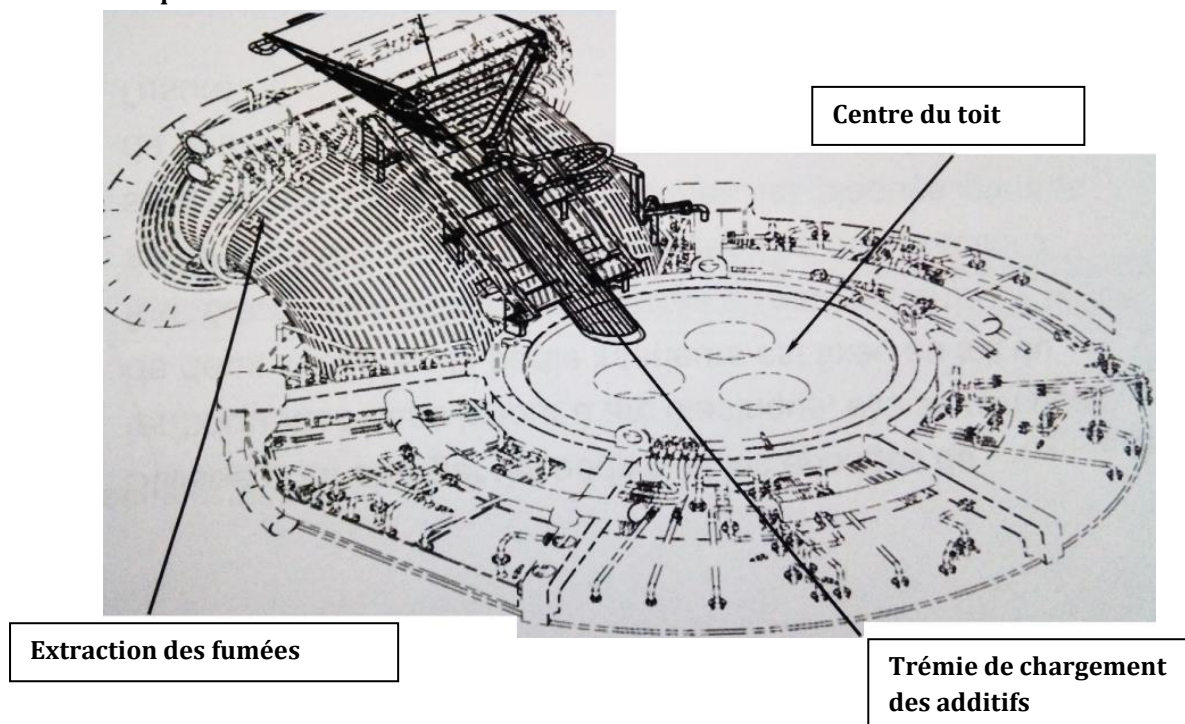


Figure 25: Trémie de chargement des additifs [20]

II.3.4. Mécanisme de refroidissement du four à arc – équipement

II.3.4.1 Description

Le four à arc actuel comprend trois parties refroidies à l'eau:

- le toit,
- les panneaux
- la conduite d'évacuation des gazes

La figure suivante présente les parties refroidies du four à arc

Bien qu'une partie de la chaleur soit perdue en raison de l'extraction de chaleur par l'eau de refroidissement, cette conception permet de réduire la consommation de réfractaires (car ils remplacent les revêtements réfractaires) et aussi réduire la consommation d'énergie élevée.

Au moment où les panneaux ont été introduits pour la première fois, certaines doutes ont surgi sur les risques de sécurité, mais après avoir réalisé l'avantage de coût, presque tous les FEA les ont adoptés. Ils peuvent être en acier ou en cuivre (durée de vie plus longue) et avec des conceptions différentes (conventionnelles, flip and turn, etc.) [21]

Récemment, une plus grande attention a été accordée à la sécurité d'utilisation de refroidissement par eau. Premièrement, pour détecter, limiter et éviter la possibilité de fuite d'eau et deuxièmement, réduire le besoin de réparation dans le four, l'analyse des gaz d'échappement, lorsque l'hydrogène est inclus, est un outil utile pour détecter les fuites. Pour limiter les fuites et les travaux de maintenance, la coque supérieure du four est refroidie par pulvérisation ce qui signifie moins de risque car l'eau non pressurisée a tendance de moins pénétrer en cas de fuite.

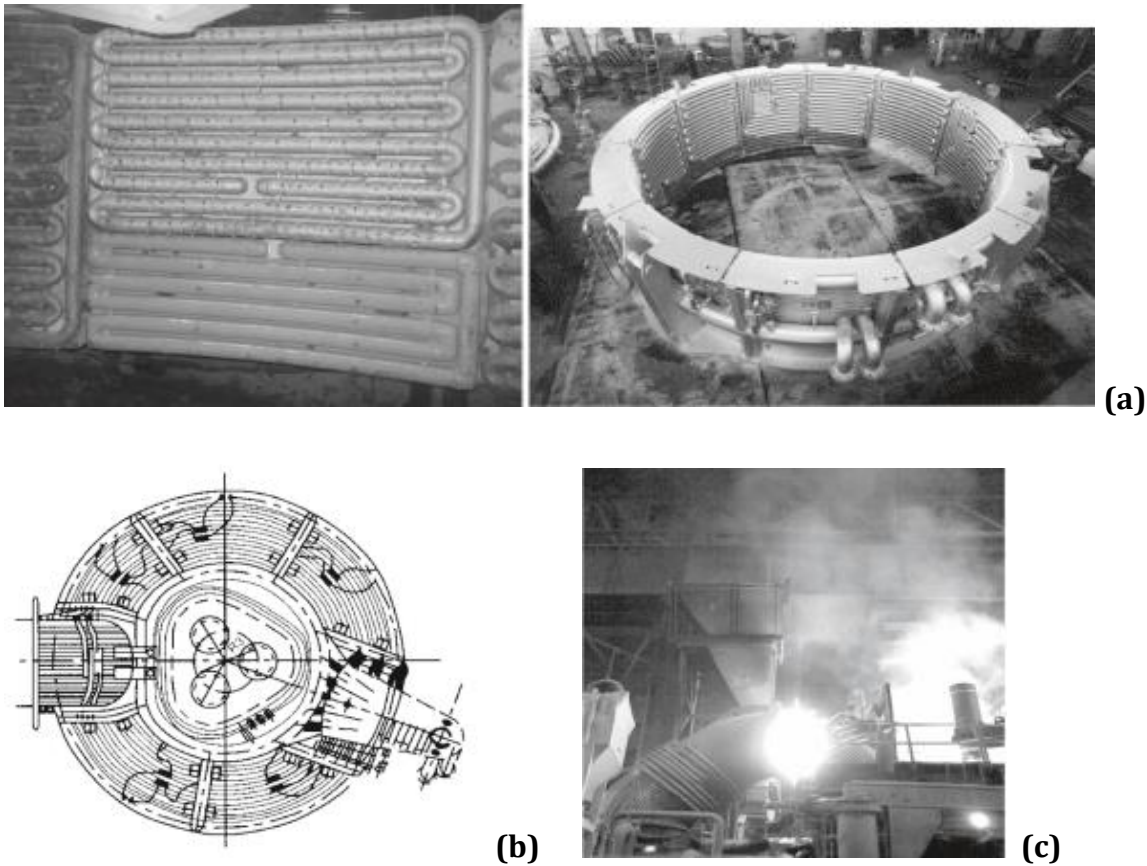


Figure 26: Parties refroidies du four à arc électrique.

a) Panneaux constituant la partie supérieure du four, (b) toit, (c) conduite d'évacuation des gaz. [17]

II.3.4.2. Unité hydraulique – Cylindres

Location : elle est située dans une pièce isolée spéciale à proximité du four

Fonction : elle est conçue pour fournir de l'énergie hydraulique sous pression aux différents vérins hydrauliques, pour effectuer les opérations suivantes :

- Positionnement des électrodes
- Inclinaison et verrouillage de la plateforme du four
- Levage du toit
- Les opérations au niveau de porte de décrassage laitier
- Ouverture de pince d'électrode
- Les opérations de la vanne EBT

L'unité hydraulique est conçue pour raccourcir les opérations du four afin de réduire les temps d'arrêt du processus.

Pour un fonctionnement sûr et rapide :

- Des vannes de hautes performances sont utilisées pour les opérations de positionnement des électrodes, d'inclinaison du four, de rotation du toit et des électrodes.
- Des pompes à débit variable contrôlées sont utilisées en combinaison avec des accumulateurs de fluide, le système d'accumulateur est désigné pour garantir le fonctionnement d'urgence du four
- Un échangeur de chaleur eau/fluide est installé pour assurer une température de fonctionnement correcte du fluide hydraulique.
- Les cylindres sont installés dans différentes positions du four à arc et sont alimentés par l'unité hydraulique. Ils sont utilisés soit pour le levage des électrodes, l'ouverture du toit, le basculement

du four, etc., soit pour le verrouillage de sécurité du four à arc électrique comme le verrouillage de la plateforme en position horizontale lorsque le système du four à arc électrique fonctionne.

II.3.5. Électrodes en graphite

II.3.5.1. Introduction

Les électrodes en graphite sont constituées d'une pâte de carbone ayant subi après cuisson, un traitement de graphitisation. Ils constituent la dernière partie du circuit secondaire du transformateur et ces dispositifs servent à conduire l'énergie électrique qui est convertie en chaleur pendant un arc électrique à l'intérieur du four à arc électrique.

Pendant la formation d'arc, la pointe de l'électrode atteindra 3 000° C, soit la moitié de la température de la surface du soleil.

Les électrodes sont en graphite, car seul ce le matériau peut supporter cette température incroyable.



Figure 27: électrodes en graphite

II.3.5.2. Propriétés de l'électrode en graphite :

Propriétés	/
Coefficient de dilatation thermique (CDT) :	<p>Une mesure en longueur par unité de longueur par degré d'élévation de 1C° température. Un CDT inférieur donnera une meilleure résistance aux chocs thermiques. De plus, la compatibilité CDT entre l'électrode en graphite et la broche de connexion est importante pour une performance satisfaisante du joint d'électrode.</p> <p>Le changement de CDT avec la température est à peu près le même pour tout le graphite à haute température. Le CDT linéaire moyen entre la température ambiante et toute température finale peut être obtenu à l'aide de la formule suivante :</p> <p style="text-align: center;"><i>CDT à T°C = CDT à 20°C + facteur ajouté</i></p>
Masse volumique	Une masse volumique élevée de graphite qui signifie des propriétés mécaniques élevés et améliorés D'électrode
Résistance spécifique	L'une des propriétés utiles du graphite est que la résistance électrique n'augmente pas fortement avec la température. Jusqu'à 1400 ° C, la résistance électrique est inférieure à la température ambiante.
Résistance à la flexion	La contrainte maximale que le matériau supportera avant la rupture en flexion, également appelée force de flexion ou module de rupture. Une résistance élevée à la flexion dans les électrodes entraîne généralement une diminution de la fréquence de rupture des électrodes.
Résistance à la traction	<p>Une résistance à la traction plus élevée dans les électrodes entraîne généralement une diminution de la fréquence de rupture des électrodes</p> <p>Les caractéristiques de résistance du graphite augmentent considérablement avec la température.</p>

Tableau 04: Propriétés de l'électrode en graphite

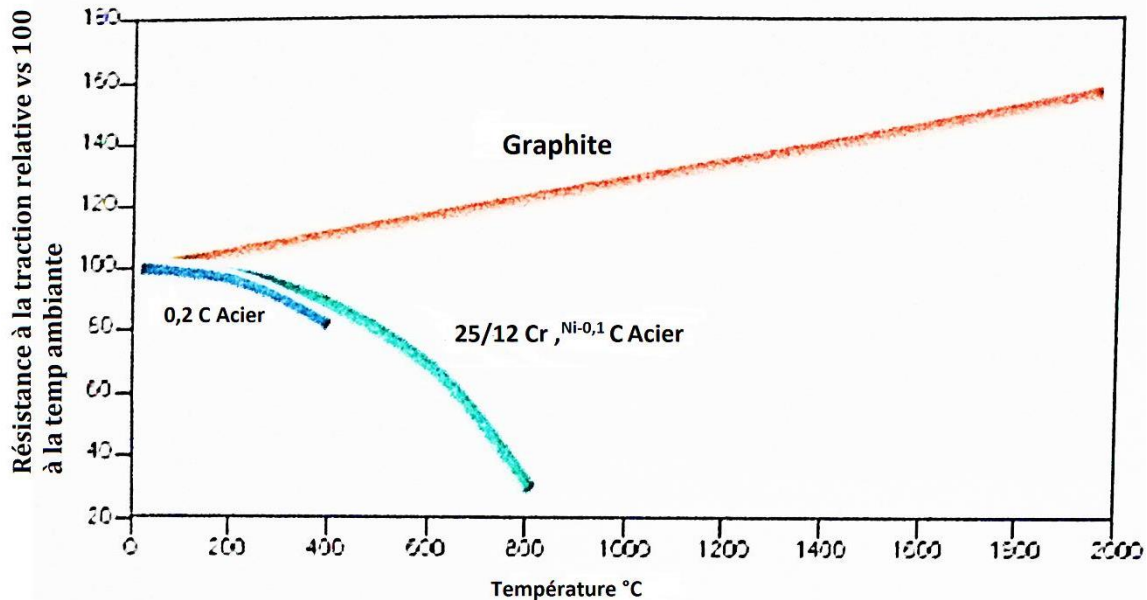


Figure 28: Résistance à la traction relative de graphite en fonction de la température [20]

II.3.5.3. Réduction de consommation d'électrodes :

La réduction sensible de consommation d'électrodes, outre l'amélioration de leur qualité, est due essentiellement à la diminution d'intensité (travail en *arc long*) et à l'arrosage des électrodes. Celui-ci est réalisé en fixant sous la pince un tube perforé à intervalles réguliers de façon à obtenir un film continu d'eau, qui refroidit la portion d'électrode située au-dessus de la voûte, et en diminue l'oxydation. [22]

II.3.6. Modules d'injection oxygène/carbone

Des lances supersoniques oxygène/carbone font partie du processus d'élaboration de l'acier afin d'effectuer les opérations suivantes :

- Décarburation du bain d'acier.
- Entrée d'énergie thermique.
- Mélange du bain d'acier liquide.

II.3.6.1. Lance d'oxygène

Les unités d'injection d'oxygène sont situées sur la paroi latérale du four et la zone EBT. Elles sont conçues pour l'injection d'oxygène et de carburant afin d'obtenir une contribution très efficace à la fusion. Elles fonctionnent comme une lance à oxygène hautement cohérente à double brûleur et supersonique [23] (Figure :)

Caractéristiques principales :

Débit nominal d'injection d'oxygène max. 1 600 Nm³/h

Débit de carbone, max, (chaque module) 50 kg/min

II.3.6.2. Lance de carbone

Cet injecteur refroidi à l'oxygène, au gaz naturel et au carbone fonctionne également de manière fixe sur les parois latérales du four. **Figure**

Il possède également un double mode de fonctionnement : brûleur et lance au carbone.

Le distributeur d'injection est monté sous le stockage de carbone, relié à celui-ci par une porte coulissante. Le distributeur est chargé en lots avec suffisamment de carbone pour l'injection pendant le cycle de chauffage.

Le distributeur d'injection est doté de capteurs de force et de vannes proportionnelles pour contrôler le débit d'alimentation et la quantité de carbone injectée. [23]



Figure 29: Oxygène-jet dans une boîte en céramique [20]



Figure 29: Carbone-jet dans une boîte de carreaux [20]

II.3.7. Panier de ferrailles

Les paniers à ferrailles sont utilisés pour le transfert entre le parc à ferrailles et l'aire de chargement du four à arc électrique.

Ils sont composés de tôles d'acier soudées et de sections renforcées, munies de deux colliers au bas permettant de charger la ferraille dans le four.

L'ouverture de la pince réalisée par l'opérateur de la grue de chargement à l'aide du crochet auxiliaire.

- Le panier à ferrailles ne doit jamais être chargé au-delà de la limite supérieure pour éviter toute chute de matériau. Si la densité de matériau est insuffisante pour satisfaire à ces conditions, le matériau doit être divisé et placé dans un autre panier.
- Si le panier à ferrailles est trop rempli, cela gênera également la fermeture du toit du four, ce qui retardera la production.
- La ferraille contenue dans le panier doit être sèche. La ferraille humide peut provoquer des explosions lors du chargement du four.



Figure 30: Panier de ferrailles pour le chargement du four à arc

II.4. Equipements électriques de four à arc

II.4.1. Introduction

Jusqu'au début de l'utilisation des panneaux refroidis à l'eau dans la coque supérieure du four, l'énergie électrique était la seule source d'énergie pour la fusion de la ferraille dans un four électrique. De nos jours, l'énergie électrique reste la principale source, mais il existe également une offre importante d'énergie alternative (20 - 30%), fournie par des brûleurs et lances oxygène / carbone.

II.4.2. Alimentation électrique

Un four à arc nécessite une puissance très élevée. Chaque tonne d'acier fondu nécessite de l'ordre de 400 kWh (0,4 MWh), donc pour fondre 100 tonnes : 40 MWh d'énergie électrique sont nécessaires. Pour un atelier de fusion produisant au rythme d'un million de tonnes par an, il est nécessaire de produire au rythme de 100 tonnes par heure ou plus. Pour atteindre ce niveau, 40 MWh doivent être mis dans le four en environ une demi-heure de mise sous tension pour atteindre la productivité souhaitée. Cela signifie que le niveau de puissance moyen en MW est de l'ordre de 80 MW.

Les ateliers de fusion EAF nécessitent généralement des niveaux de puissance de l'ordre de 20 à 200 MW. (Assez pour une petite ville !)

Tels niveaux de puissance ne peuvent être fournis par les autorités qu'à partir de leur réseau haute tension, où des tensions comprises entre 100 et 500 kV sont présentes.

Il s'agit d'un système et pour cette raison, le four à courant alternatif traditionnel a trois électrodes.

À l'intérieur du four, les arcs électriques imposent des tensions comprises entre 100 et 600 volts (fours à courant alternatif); au-dessus de ces niveaux, les arcs deviennent trop longs pour être gérables. Afin d'obtenir des puissances d'arc de la MW requise, il est donc nécessaire de fonctionner avec des courants de l'ordre du kiloampère généralement du 20 à 80 kA (fours à courant alternatif).

L'énergie provient des générateurs des autorités via leur réseau et arrive à l'usine sidérurgique à très haute tension et doit donc être convertie en basse tension adaptée aux arcs. Cette opération est effectuée par des transformateurs. [24]

II.4.3. Transformateur

Pour diverses raisons, l'opération consistant à transformer la puissance du kV au niveau de la ligne électrique entrante hors d'usine au niveau de tension requis par les arcs est généralement effectuée en deux étapes :

1. Un premier transformateur (parfois deux transformateurs en parallèle) abaisse la tension de la ligne haute tension à un niveau de moyenne tension qui est généralement normalisé pour chaque pays.
2. La 2^{ème} étape consiste à diviser l'énergie électrique entre les ateliers d'usine, il y aura plusieurs transformateurs connectés au niveau de 34,5 kV, et donc il y'aura une petite sous-station de 34,5 kV dans l'atelier de fusion contenant le four à arc. Cette disposition est l'une des raisons pour lesquelles la transformation d'énergie est réalisée en deux étapes.

À partir du jeu de barres de 34,5 kV, le four à arc est alimenté par un transformateur spécial de four. La tension secondaire de ce transformateur de four est conçue pour permettre le fonctionnement des arcs dans les tensions et courants souhaités.

Cependant, parce qu'il ya différentes exigences de tension/courant d'arc combinés à travers la fusion, le raffinage ... etc., il est nécessaire d'avoir un choix de tensions secondaires. Le transformateur de four est équipé d'un changeur de prises (Commutateur).

Transformateur four à arc

Le transformateur d'alimentation du four à arcs est radicalement différent d'un transformateur de distribution et beaucoup plus délicat.

En effet :

- son rapport de transformation (nombre de spires du primaire/nombre de spires du secondaire) est très élevé puisque les tensions secondaires à obtenir se chiffrent en centaines de volts, les tensions primaires étant de l'ordre de 10 à 70 kV ; le rapport est donc nettement plus élevé (couramment 10 fois plus) que celui des transformateurs classiques
- il est à prises multiples pour permettre au fondeur d'ajuster la tension secondaire en fonction des étapes de l'opération
- sa réactance doit être faible, de l'ordre de 4 à 5 % pour les puissances élevées, puisqu'il est nécessaire de maintenir dans des limites raisonnables la réactance totale de l'installation

Plusieurs types de transformateurs sont couramment utilisés en aciérie : transformateur colonne ou cuirassé.

Le réglage de la tension peut être effectué par variation du nombre de spires au primaire, à l'aide d'un autotransformateur de réglage ou d'un booster.

En règle générale, on utilise un transformateur de type intérieur à bain d'huile et circulation forcée avec réfrigérant extérieur au transformateur ; le transformateur est calculé pour satisfaire à des Spécifications plus sévères que celles imposées aux transformateurs de distribution.

Les fours des aciéries les plus performantes dont la capacité de production annuelle dépasse le million de tonnes ont des puissances spécifiques d'au moins 1 000 kVa par tonne avec une tension secondaire maximale qui peut dépasser 1 000 V entre phases. [22]

II.4.4. Commutateur de prises

Le but d'un changeur de prises est de permettre un choix de différentes combinaisons de volts et d'ampères pour différentes étapes de fusion.

Ceci est réalisé en modifiant le nombre de tours de la bobine primaire. (Le primaire prend un courant plus faible, il est donc plus simple de changer le nombre de tours sur cette bobine plutôt que sur la bobine secondaire à courant élevé).

Fondamentalement, il prend la forme d'une boîte motorisée qui change le courant primaire vers différentes parties de la bobine autour du noyau de fer. Un schéma de la connexion à la bobine primaire est donné à la Figure.

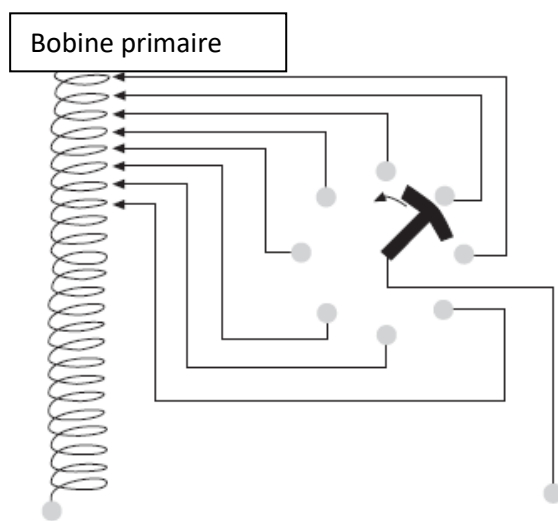


Figure 31: schéma présente un changeur de prises [24]

Les changeurs de prises ont tendance à être fixés à l'extérieur du réservoir du transformateur pour permettre un accès facile pour la maintenance des contacts.

II.4.5. Réactance saturable

Les commutateurs de prises nécessitant un entretien important et coûteux, une solution technique proposée par des constructeurs et quelques fois mise en pratique sur des fours à arcs consiste à insérer, directement en amont du transformateur de four, une réactance saturable.

Cette réactance est constituée d'un circuit primaire qui est parcouru par le courant du four et d'un circuit secondaire de commande alimenté en courant continu.

Durant tout le cycle de fusion, un seul et même plot de tension du transformateur de four peut être utilisé. La régulation du courant d'arc est alors obtenue par l'intermédiaire de cette réactance saturable en agissant sur le courant continu de commande.

Cette réactance présente aussi les avantages d'une limitation rapide du courant de court-circuit.

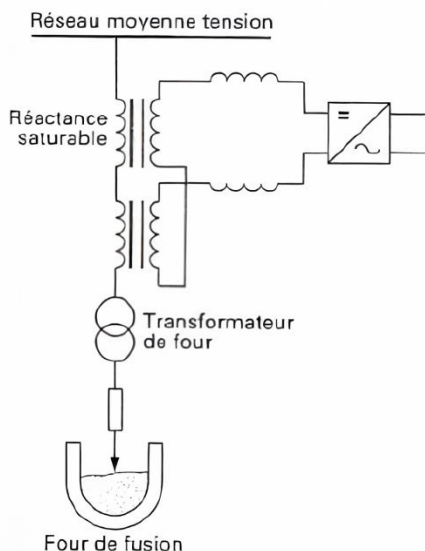


Figure 32: Réactance saturable

II.4.6. Circuit secondaire

II.4.6.1 Description :

Le circuit secondaire assure la liaison entre le secondaire du transformateur de puissance et le four. Il comprend donc obligatoirement une partie composée de câbles souples, de façon à permettre les mouvements de four, et un jeu de barres fixes.

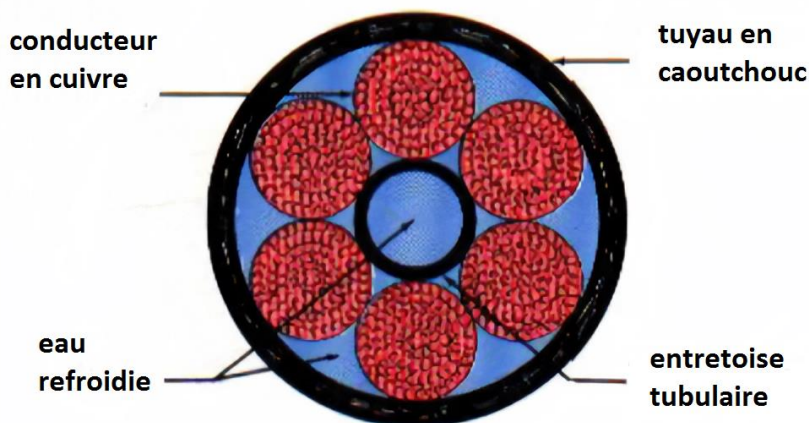


Figure 33: forme interne du câble

II.4.6.2. Câbles souples

Des câbles sont nécessaires pour permettre aux électrodes de suivre l'abaissement du niveau de ferraille pendant la fusion et pour permettre les mouvements du four tels que le basculement du toit et la coulée. En général, plusieurs câbles sont nécessaires sur chaque phase pour gérer le courant.

Les fours modernes utilisent des câbles à circulation d'eau, de façon à en réduire le nombre, et de longueur aussi faible que possible, compte tenu des mouvements du four (basculement pour la coulée et pivotement de la voûte pour le chargement), pour en minimiser la réactance.

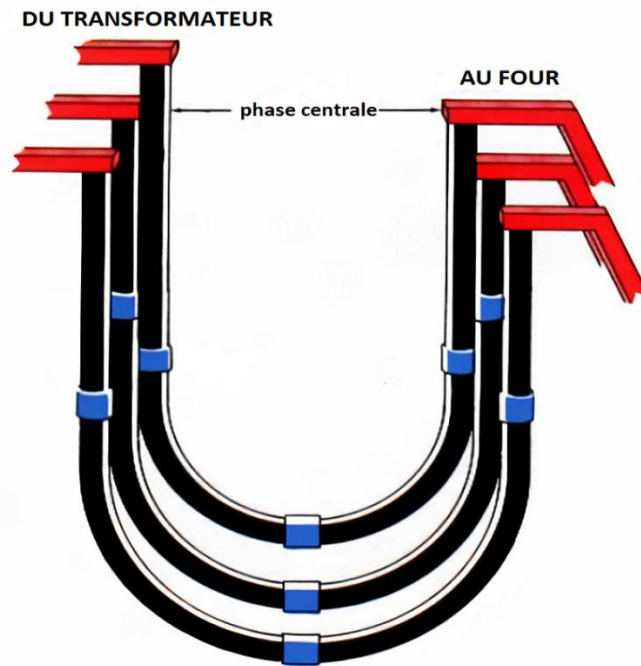


Figure 34: Câble souples à haute tension

II.4.6.3. Jeu de barres

Les terminaisons de bobine secondaire du transformateur du four sortent du réservoir sous la forme d'un jeu de barres en cuivre.

Suivant les intensités mises en jeu et le type de couplage secondaire du transformateur (triangle ou étoile, extérieur ou intérieur), le jeu de barres peut être réalisé en plats de cuivre ou en tubes à circulation d'eau, il est courant de disposer l'ensemble du circuit secondaire en triangle équilatéral.

Pour augmenter les courants élevés requis dans le four, ces jeux de barres sont ensuite connectés en une fermeture delta généralement affecté à l'extérieur du transformateur.

II.4.6.4. Bras conducteur

Les extrémités mobiles des câbles sont fixées au système bras / jeu de barres horizontal.

De plus en plus, les fabricants de fours font passer le courant à travers un bras conducteur jusqu'aux électrodes plutôt qu'à travers des jeux de barres séparés.

Ces bras conducteurs sont soit revêtus de cuivre, soit des constructions en boîtier en acier ou des fabrications en alliage d'aluminium. Dans les deux cas, l'ensemble du bras fonctionne sous tension et doit donc être isolé de ses supports.

II.5. Revêtements réfractaires du four à arc

II.5.1. Introduction

Il n'y a pas de définition générale et complète des réfractaires. Mais ils peuvent être définis comme des matériaux qui conservent des propriétés mécaniques élevées et stables et une neutralité chimique à des températures supérieures à 1400 ° C.

Ils sont connus comme le matériau qui tolère des températures élevées sans fondre ni se briser

II.5.2. Réfractaire du four à arc

Les réfractaires sont des matériaux qui résistent à des températures élevées sans changement significatif des propriétés chimiques ou physiques. Les matériaux réfractaires sont très importants pour le fonctionnement de l'EAF car ils permettent de tenir l'acier liquide dans la sole du four sans endommager sa structure.

Le four électrique nécessite une variété de revêtements réfractaires. Les réfractaires en contact direct avec l'acier sont les plus importants. Les fours électriques et les EBT actuels utilisent généralement des produits de magnésite ou de magnésite carbonés dans les zones de contact de l'acier. Des réfractaires spécialisés avec une bonne résistance aux chocs thermiques sont généralement utilisés dans le toit / delta, le trou de coulée et porte de décrassage laitier...

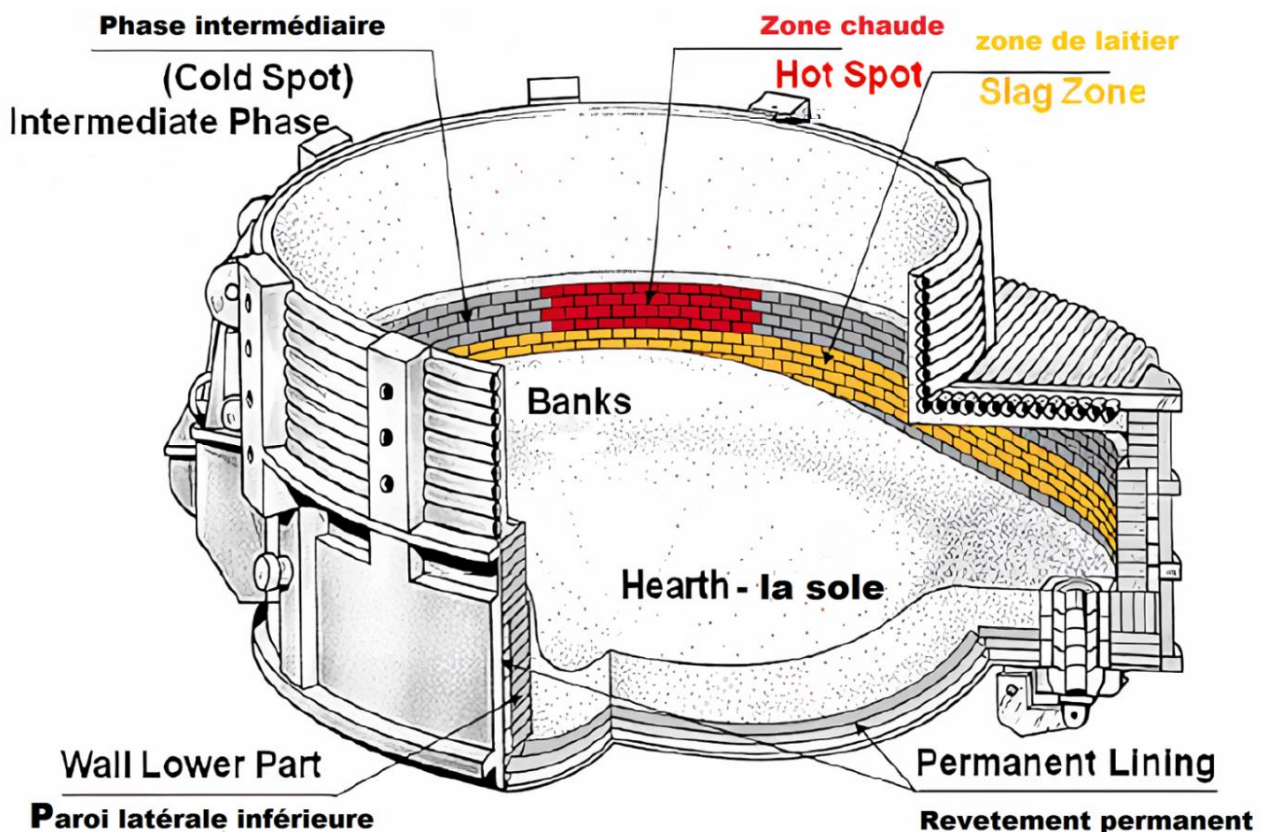


Figure 35: Zones des Revêtements réfractaires du four à arc

II.5.2.1. Sous-bas du four

La brique de magnésite ou de magnésite imprégnée de goudron est généralement utilisée dans le sous-bas du four en raison de sa bonne résistance à l'acier et au laitier en cas de pénétration. On s'attend à ce que ces réfractaires durent six mois, un an ou même plusieurs années si le matériau de la sole inférieure est bien entretenu. [26]

II.5.2.2. La sole

La plupart des opérateurs de fours électriques préfèrent une sole monolithique en magnésite qui est facile à installer et à entretenir. Les matériaux de sole monolithiques sont généralement des matériaux secs et vibrants à haute teneur en MgO qui développent leur résistance par frittage en place pendant le brûlage du fond.

Ces matériaux de sole contiennent généralement des oxydes d'impuretés, comme l'oxyde de fer, pour faciliter le frittage.

D'autres opérateurs préfèrent tous les soles en brique, où la construction initiale est entièrement en brique, et les matériaux monolithiques ne sont utilisés que pour réparer les trous dans la sole en brique après une certaine période de fonctionnement. **Figure ... a)**

Les conceptions de la partie inférieure du four à arc EAF modernes comprennent souvent des éléments d'agitation de gaz qui nécessitent des matériaux réfractaires poreux ou des tuyères à travers des réfractaires denses pour fournir le gaz d'agitation à l'acier fondu.

Ces gaz d'agitation peuvent provoquer une érosion des réfractaires de la sole et nécessitent un entretien régulier.

Description: Brique cuite à base de magnésie frittée						
Composition chimique:						
%MgO	%Cr ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SiO ₂	%C
91 -92,5	-	0.3	5.5	2.0	0.6	-
Caractéristiques physiques:						
Masse volumique [g/cm ³]	Porosité %		Résistance à l'écrasement [N/mm ²]'	Réfractarité sous charge C°		
3.04	<16		>50	>1700		

Tableau 5: Composition chimique du revêtement de la sole

Généralement les dimensions des briques réfractaires de cette zone sont : **(250 X 124 X 76 mm)**

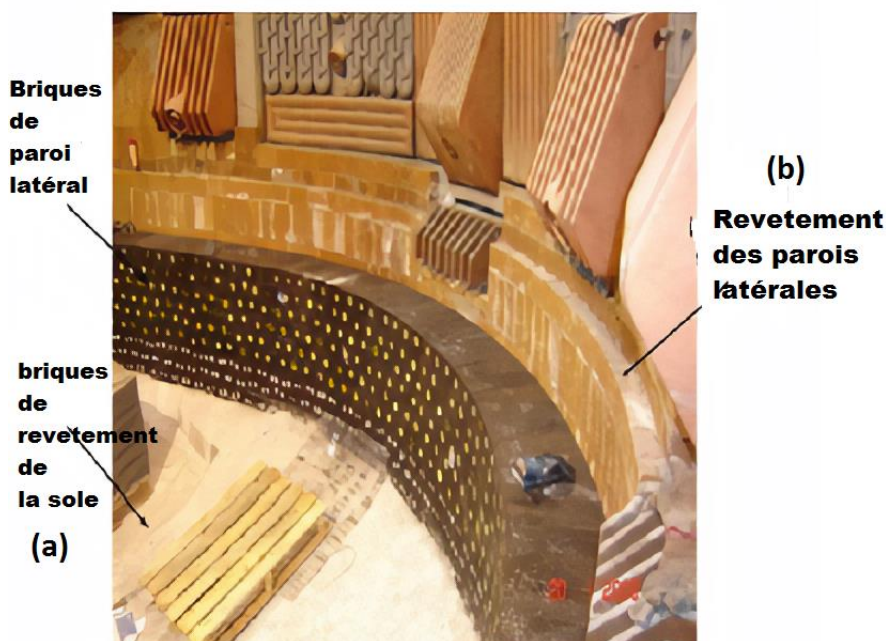


Figure 36: a) revêtement de la sole
b) revêtement des parois de four

II.5.2.3. Paroi latérale inférieure du four

La paroi latérale inférieure utilise généralement la même qualité que la brique de sole, haute teneur en MgO, ordinaire ou imprégné de goudron, soit Ces briques forment la base de la ligne de scories et de la paroi latérale supérieure, et sont protégées par les rives du matériau de la sole. **Figure ... b)**

Description :		Magnésie-carbone brique, à base de magnésie frittée synthétique liée au goudron				
Composition chimique :						
%MgO	%Cr ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SiO ₂	%C _{res}
97	-	0.2	0.3-0.5	2.1	0.5	9
Caractéristiques physiques :						
Masse volumique [g/cm ³]		Porosité %		Résistance à l'écrasement [N/mm ²]		
3.08		10		>30		

Tableau 6: Composition chimique du revêtement de la paroi latérale inférieure

II.5.2.4. Ligne de scories (slagline)

La zone de scories de la plupart des fours utilise de la brique carbone-magnésite ou de la brique de magnésite imprégnée de goudron, le choix réfractaire de la ligne de laitier doit être cordonné avec la composition chimique attendu du laitier.

Les ateliers d'acier qui dépend de carbone produisent des scories FeO – SiO₂ riches en chaux avec un rapport chaux / silice de 2/11, qui exigent des réfractaires basiques. [26]

II.5.2.5. Paroi latérale supérieure du four / les zones chaudes

Au-dessus de la ligne de scories, le revêtement réfractaire assiste à un arc à haute température, des éclaboussures de laitier, un impact de ferraille, et un impact de flamme provenant de brûleurs ou de lances.

La réfractarité, la résistance mécanique, dureté, et la résistance aux chocs thermiques sont les paramètres requis des revêtements des parois latérales de fours électriques.

Dans les fours à panneaux refroidis à l'eau, la carbone-magnésite brique est le choix le plus courant, avec une carbone-magnésite brique à graphite fondue dans les zones chaudes.

Description:		Brique de magnésie-carbone liée par poix (goudron), fabriquée à partir de magnésite frittée à faible teneur en fer +magnésite et graphite fondus				
Composition chimique:						
%MgO	%Cr ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SiO ₂	%C _{res}
97,5	-	0.1	0.3-0.5	2.0	0.6	10-14
Caractéristiques physiques:						
Masse volumique [g/cm ³]		Porosité %		Résistance à l'écrasement [N/mm ²]'		
2.97		<8,5		>20		

Tableau 7: Composition chimique du revêtement de la paroi supérieure

II.5.2.6. TOIT

Si le toit est refroidi à l'eau, un revêtement en matériaux à haute teneur en alumine (oxyde d'aluminium) ou en chrome-alumine est un bon choix.

Économie plus grande peut parfois être obtenue en mettant des briques sur les orifices d'électrode et en enfonçant un plastique à haute teneur en alumine dans la section delta. (Section delta: le rassemblement des câbles électriques)

Le toit est soumis à des chocs thermiques extrêmes lors des balancements de toit pour le chargement. Les matériaux de base auraient une meilleure résistance à l'atmosphère du four, mais ne

peuvent généralement pas résister au cyclage thermique. Pour les toits complètement revêtus, 70 à 80% d'anneaux en briques d'alumine constituant environ les deux tiers du toit sont les plus courants; avec du plastique en alumine ou du plastique chrome-alumine enfoncé dans la section delta, avec des anneaux d'électrode en brique d'alumine/chrome-alumine de haute pureté.

II.5.2.7. Trou de coulée

Pour les fours électriques ordinaires, un module de trou de coulée ou un bloc de trou de coulée avec un trou pré-percé est la construction la plus courante.

D'autres opérateurs enfonceront des briques en alumine autour d'un tuyau en acier pour former leur trou de coulée, tandis que d'autres mettent des revêtements composé d'un mélange de matières de base autour d'un tuyau en acier pour le trou de coulée initial.

Description:		Brique de magnésite liée par poix, fabriqué à partir de périclase synthétique de haute qualité + magnésite fondue		
Composition chimique:				
%MgO	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%SiO ₂
>97.0	0.2	0.3	1.8	0.5
Caractéristiques physiques:				
Masse volumique [g/cm ³]	Porosité %		Résistance à l'écrasement [N/mm ²]	
3.05	<1.0		>40	

Tableau 8: Composition chimique du revêtement de trou de coulée

Certaines conceptions de trou de coulée dureront tout le cycle de vie du four, tandis que d'autres opérateurs entretiennent régulièrement leur trou de coulée en revêtant autour d'un tuyau métallique inséré. Pour les EBT, des formes composées de la magnésite ou de carbone-magnésite forment le trou de coulée vertical, souvent enfermés dans des formes rectangulaires plus grandes pour former un puits de coulée permanent. **Figure...**

Les trous de coulée EBT nécessitent un bon remplissage en sable entre les coulées pour empêcher l'acier de geler dans le trou de coulée; ce sable est généralement à base de magnésite ou de chromite.

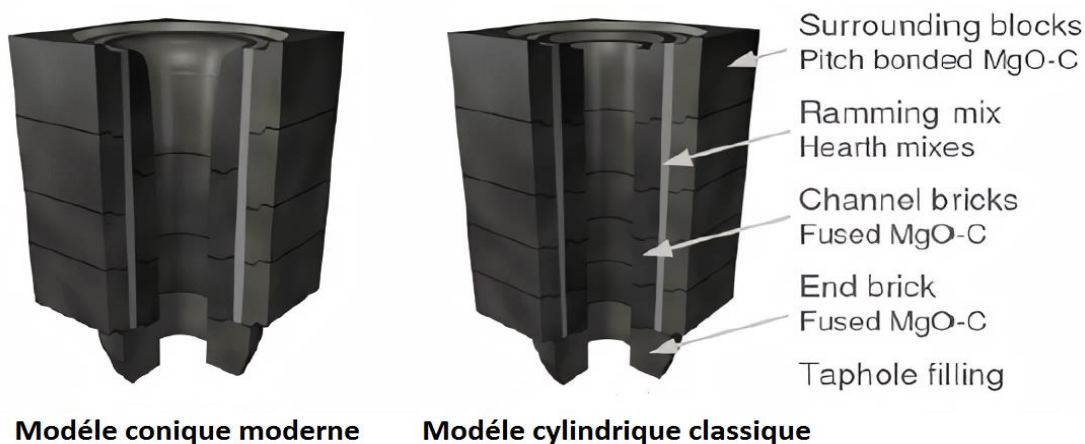


Figure 37: Formes de trou vertical de coulée + revêtements

Chapitre III. Procédés physico-chimiques d'élaboration d'acier dans le four à arc

III.1. Introduction

Traditionnellement, les fours électriques à arc servaient à produire des alliages, de l'acier inoxydable, des aciers spéciaux et pour outils. Récemment, leur taille et leur capacité ont été améliorées pour produire de gros volumes d'acier ordinaire allié et non allié.

De nos jours, le four électrique à arc peut être utilisé pour produire pratiquement tous les types d'acier. La séquence de fonctionnement sur le four électrique à arc peut essentiellement être décrite comme suit :

- Chargement de lit de fusion
- Fusion
- Raffinage

Et avant de commencer à parler de la première étape du processus de fabrication de l'acier, il est très important de mentionner certains points importants concernant les différentes sources de fer et les autres matières premières utilisées dans la production d'acier.

Les sources de fer les plus courantes sont :

- Ferraille
- Gueuse de fonte
- Oxyde de fer FeO

Les matières premières influencent :

- Rendement énergétique maximal dans le four à arc
- Conception des fours électriques à arc
- Le mode de fonctionnement du four à arc

Le choix des matières premières est influencé par :

- Coût du matériel et disponibilité
- Qualité de l'acier à produire

Des sources alternatives de fer sont utilisées afin de réduire les niveaux de fragments résiduels (Cu, Sn, Ni, Cr et Mo) dans l'acier afin d'améliorer la qualité du produit.

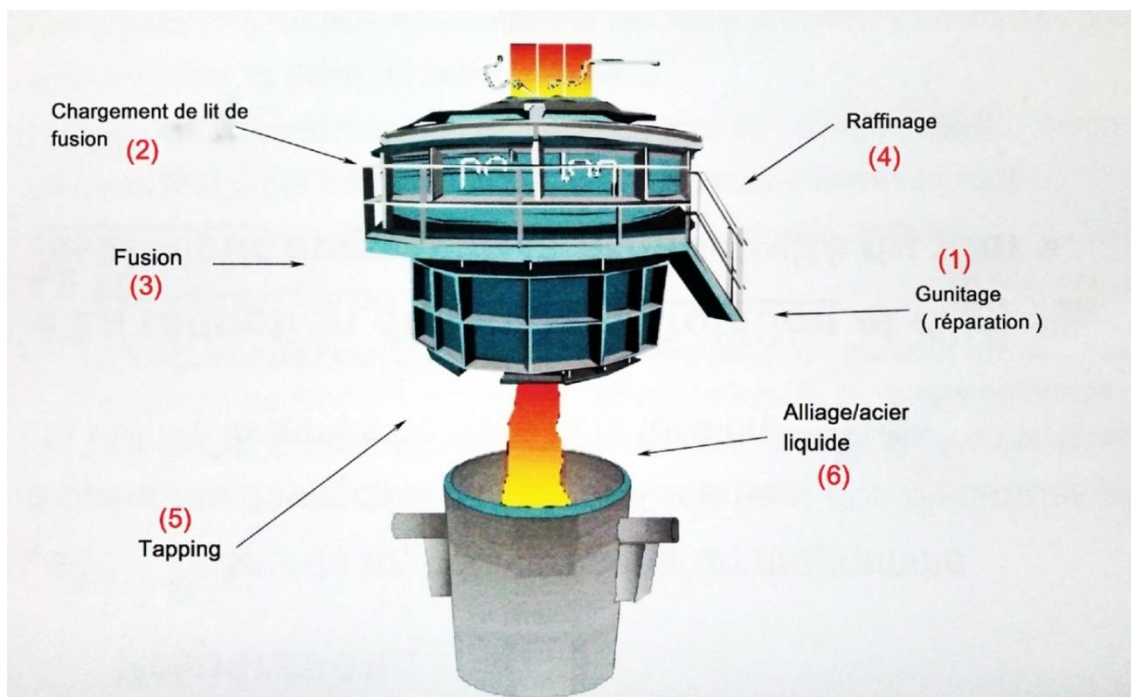


Figure 38: Fonctionnement normal du four à arc

III.2. Chargement du four

III.2.1. Matières chargés dans le four à arc électrique

Les fours à arc électrique sont chargés de ferraille d'acier ou d'autres matériaux contenant du fer (Oxyde de fer FeO, fonte, etc.).

Dans le cas de la production d'acier fortement allié ou inoxydable, la charge métallique peut également contenir des ferroalliages.

III.2.1.1. Ferraille d'acier

La principale matière première pour la fabrication de l'acier EAF est la ferraille d'acier.

Le contrôle du poids, de la taille et de la composition chimique de la ferraille est important pour obtenir un taux de production constant dans l'atelier et la qualité de l'acier spécifiée par le client.

Les facteurs à considérer sont les suivants :

- Qualité de l'acier à produire
- Rendement prévu
- Optimisation du coût du produit

Classification :

La ferraille peut être classée selon les caractéristiques suivantes :

- Composition chimique : peut être divisé en ferraille allié et non allié ; cette division est faite afin de récupérer les éléments d'alliage ayant une certaine valeur tels que le Cr, le Ni, le Mo, etc.
- Taille : la taille maximale des morceaux individuels de ferraille ne doit pas dépasser les 0,5 x 0,5 x 1,5 m
- Densité : densité moyenne ~ 0,7 tonne/m³ et séparation : léger, moyen et lourd
- Forme : Dirigée vers le processus technologique comme elle se présente (rognures, déchets d'emboutissage) ou sous forme traitée (paquets compressés, balles)
- Degré de contamination : d'une « ferraille bleue » très propre (retours provenant de l'industrie automobile) à une ferraille « très contaminée » (par exemple des rebuts en acier séparés du laitier)
- Origine : entre secteur de l'aciérie et de la ferraille externe achetée (usines de traitement de la ferraille importée ou locale).



Figure 39: Exemple de ferraille utilisé dans le four à arc

III.2.1.2. Fonte

La fonte est utilisée dans le four à arc en des proportions beaucoup plus faibles que la ferraille, elle présente les caractéristiques suivantes :

- Haute densité (faible volume pour compléter la charge)
- Teneur élevée en carbone (4-5 %) et en silicium, nécessite l'injection de gros volumes d'oxygène pendant la fusion pour réduire la teneur en carbone
- Des quantités importantes d'énergie chimique sont libérées lorsque le contenu de carbone est oxydé
- Teneur élevée en phosphore
- Faibles niveaux de soufre (comparés à ceux de la ferraille).

Et l'avantage de l'utilisation de la fonte se présente dans :

- La fonte peut remplacer avec succès le carbone chargé comme combustible énergétique alternatif, donc la réduction de la quantité de carbone à utiliser
- Économies spécifiques d'énergie électrique grâce à la chaleur dégagée par l'oxydation du carbone et du silicium
- Très faible teneur en éléments résiduels, peut être utilisée comme diluant

Composé de : 94 % de fer, 4 à 4,5 % de carbone, au maximum 1 % de silicium, 0,4 à 1 % de manganèse (cela peut également être plus), 0,10 à 0,20 % de phosphore et 0,02 à 0,05 % de soufre.

III.2.1.3. Oxyde de fer DRI

L'oxyde de fer DRI peut être utilisé dans le four à arc comme un agent principal dans la fusion 100% DRI ou comme un élément secondaire avec la ferraille sous le système 33% ferraille – 66% DRI

Il possède par son utilisation dans le four à arc les avantages suivants :

- DRI est un matériau propre, avec une faible teneur en éléments indésirables (P, S, Cu, Sn, Cr, Ni, As)
- DRI est un matériau de coût relativement faible dans les pays ayant des sources d'énergie pas chères (faible coût de l'énergie électrique et de gaz naturel)
- DRI peut être chargé en continu dans le four lors de la fusion (diminution du volume de la coque, réduit les perturbations électriques lors du chargement en continu, etc...)
- Plus on utilisera l'oxyde de fer dans la charge, plus la teneur en éléments résiduels sera faible

Les caractéristiques de DRI influencent fortement la méthode d'opération à adopter. les principales propriétés du DRI qui ont une influence sur (la consommation d'énergie, d'oxygène, de carbone et de scories) sont:

- Degré de métallisation d'oxyde de fer
- Teneur en carbone dans FeO
- Température de DRI
- Basicité de la gangue DRI (rapport CaO / SiO₂)



Figure 40: DRI oxyde de fer chargé dans le four à arc

Composition chimique des matières chargé dans le four : ferraille / DRI

DESCRIPTION	FERRAILLE	DRI
% C	0,23	2.5
% Mn	0,52	/
% Si	0,20	/
% P	0,044	< 0,040
% S	0,040	< 0,01
% Gangue totale	/	4.8
% SiO2	/	2.2
% CaO	/	0.9
Basicité de la gangue (CaO / SiO2)	/	0.35
% Fe tot.	/	91.0
% Métallisation	/	94.0
% Fines	/	2.5
Densité (kg/m3)	600	1600

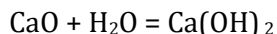
Tableau 9: Composition chimique ferraille/Oxyde de fer FeO

III.2.1.4. La chaux / Dolomite

La chaux est le flux le plus couramment utilisé dans les opérations de four à arc modernes. La plupart des opérations utilisent désormais des réfractaires basiques et par conséquent, l'aciériste doit maintenir un laitier basique dans le four afin de minimiser la consommation de réfractaires.

Pour la formation du laitier dans les fours à arc, on utilise de la chaux (à base de CaO), de la castine (CaCO₃), du spath fluor (CaF₂), des rebuts de chamotte (Al₂O₃) et du sable.

Pour la production d'aciers de très haute qualité, il est recommandé d'utiliser de la chaux fraîche contenant un minimum d'humidité. La chaux absorbe intensivement l'humidité : on dit que la chaux est hygroscopique. La chaux en contact avec l'humidité réagit selon la réaction :



Avec la chaux, on peut utiliser de la castine à condition qu'elle contienne plus de 97% de CaO.

La dissociation de CaCO₃ entraîne un dégagement de CO₂: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

qui brassent le métal et le laitier et permettent un certain dégazage de l'acier (élimination de l'hydrogène et de l'azote). Afin de diminuer la viscosité des laitiers hautement basiques. [24]

Taille : la chaux et la dolomite chargée (dans les paniers et via le 5ème trou du toit): 25 - 50 mm

La chaux, la dolomite seront chargés à partir du 5ème trou pendant l'alimentation continue DRI et pendant le raffinage.

Il est très important d'avoir la possibilité d'utiliser de la dolomite ou de la chaux, pour la saturation en MgO dans le four et la réduction de la consommation de réfractaires.

COMPOSITION CHIMIQUE	CHAUX	DOLOMITE
CaO (%)	92 min.	55 - 60
MgO (%)	1,5 max	33 - 37
SiO ₂ (%)	2,4 max	2,4 max
Al ₂ O ₃ (%)	0,0	0,5 max
P ₂ O ₅ (%)	0,15 max	0,15 max
S (%)	0,2 max	0,2 max
Fe ₂ O ₃ (%)	0,8 max	1,5 max
Mixture (%)	1,0 max	0,3 max
CO ₂ (%)	2.5	2.0

Tableau 10: Caractéristiques de la chaux et de la dolomite



Figure 41: chaux + dolomite

III.2.1.5. Les éléments carburants

On peut citer comme principales sources des éléments carburants dans le four à arc :

- Coke métallurgique 3-5 mm , 5-15mm , 10-30mm.
- Carbone injecté sous forme de poudre
- Débris d'électrodes
- charbon anthracite



Figure 42: a) Carbone injecté



b) Carbone 10-30mm chargé

analyse du charbon	%
Humidité	0,7 max
Cendre	10,0 max
volatile	2,0 max
Carbone fixée	85,0 min
sulfure	1,0 max
phosphore	1.0 max
Taille de carbone	%
0.3 ÷ 3.0 mm	100%
1.0 ÷ 3.0 mm	70% min
0.3 ÷ 1.0 mm	30% max

(a)

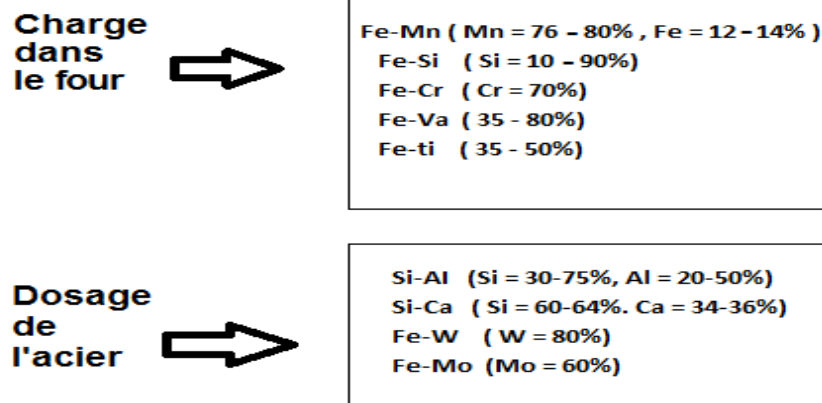
analyse du charbon	%
Humidité	0.6 max
Cendre	11 max
Volatile	1,5 max
Carbone	85 min
Sulfure	0,75 max
Phosphore	0,025 max
Taille de carbone	25-50 mm

(b)

Tableau 11: a) Caractéristiques de carbone injecté
b) Caractéristiques de carbone chargé

III.2.1.6. Les ferro-alliages

Sont employés essentiellement pour la désoxydation et dosage du bain métallique selon les nuances de l'acier à obtenir. Les principaux ferro-alliages utilisés sont :



III.2.2. Chargement du lit de fusion

III.2.2.1. Description de l'opération

Le four à arc est chargé par un panier à ferraille équipé d'une porte de blocage, en utilisant les crochets principaux et auxiliaires de la grue de chargement.

Le four et le panier à ferraille doivent être conçus de manière à compléter la charge en deux ou trois paniers, même si la part de ferraille légère (<0,7 tonne / m³) est élevée.

Le remplissage simple ne doit pas dépasser 90 % de son volume pour éviter tout problème de fermeture du toit.

Avec un chargement correct du panier, la ferraille à l'intérieur du four sera répartie en couches, avec la même séquence de chargement dans le panier. Une bonne stratification de ferraille permet d'éviter ou de réduire de nombreux problèmes de fusion, liés à :

- Rupture d'électrode due à des effondrements;
- Perturbation de l'énergie électrique (instabilité de l'arc, rayonnement excessif sur les réfractaires)
- Faible performance du four.

III.2.2.2. Préparation du panier de ferraille

1. Le fond du godet doit être rempli d'une couche de ferraille légère, de préférence sans huile ni eau. Si possible, les déchets déchiquetés peuvent être utilisés jusqu'à 10 % du volume total de la ferraille. Cette couche sert pour protéger le fond réfractaire du four contre les dommages possibles causés par de gros morceaux de ferraille.
2. La couche suivante doit contenir les pièces les plus lourdes / grosses de ferraille représentant jusqu'à 15 % du poids total des ferrailles afin d'éviter la rupture d'électrode due à la chute des débris pendant la fusion.
3. La couche suivante doit être préparée pour contenir de la ferraille de poids moyen et de densité et de taille moyennes, c'est-à-dire le volume principal du poids de charge afin de protéger les panneaux réfractaires et refroidis à l'eau contre le rayonnement de l'arc.
4. La dernière couche compose de ferraille légère, si possible de petite taille, afin de faciliter l'allumage de l'arc, et d'assurer une pénétration rapide de la charge par les électrodes en formant des puits, et de protéger les panneaux refroidis à l'eau contre les dommages de l'arc
5. Les éléments de recarburation doit être ajouté par-dessus de la couche de ferraille lourde, aussi les matières de production de laitier tel que la chaux, ou la dolomite, à proximité

des parois du panier en dehors de la zone du cercle de la pénétration d'électrode afin d'éviter toute rupture de l'électrode due au contact avec du matériau non-conducteur.

III.2.2.3. Chargement de panier dans le four à arc

Cette étape est effectuée par le placement du panier à ferraille au-dessus du four, en plein centre, à un mètre du sommet de la coque supérieure, afin d'éviter que les panneaux refroidis à l'eau ne soient endommagés lorsque les pinces sont ouvertes.

L'étape suivante est présentée dans la Figure suivante :

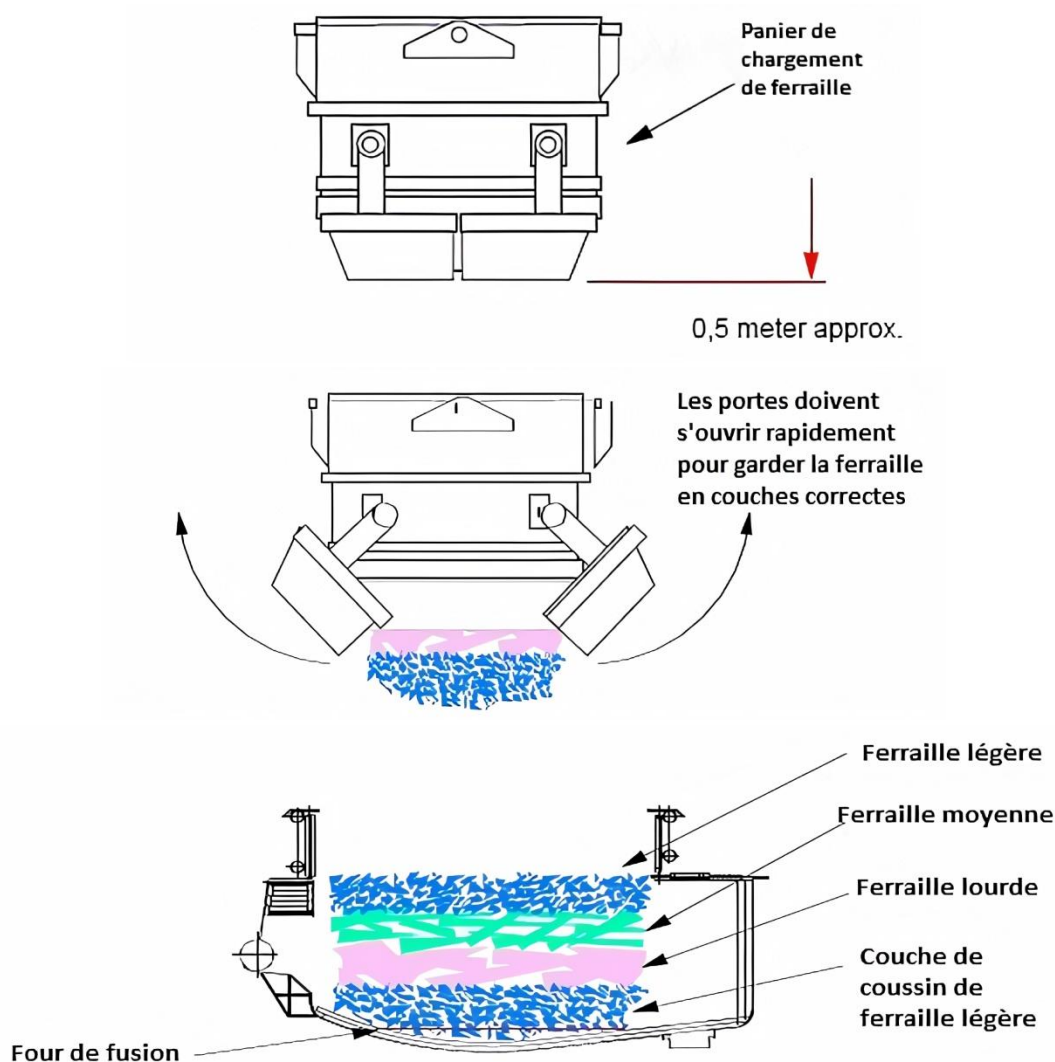


Figure 43: Séquence de chargement du lit de fusion

En ouvrant les portes rapidement, la charge sera placée de la même manière que dans le panier ; sinon les couches supérieures se retrouveront au fond du four et la ferraille lourde se retrouvera au-dessus.

Enfin, le toit est tourné et abaissé afin de fermer le four, ensuite, le disjoncteur du four est fermé, les électrodes abaissées automatiquement et le four est prêt à commencer ou à poursuivre le processus de fusion.

III.3. Période de fusion

III.3.1. Introduction

Le four étant chargé par ferraille, le transformateur est mis sous tension et les trois électrodes sont descendues sur la ferraille. Les arcs s'allument entre l'extrémité des électrodes en graphite et la charge.

Le métal fond rapidement sous l'action de la chaleur dégagée par l'arc et les électrodes descendent lentement jusqu'au moment où sous les arcs s'est formé un bain de métal fondu. A partir de cet instant les arcs travaillent à l'intérieur du puits creusé à travers la charge, leur rayonnement fait ruisseler le métal et la charge s'affaisse peu à peu sur la sole.

La quantité de bain augmente et noie à peu près complètement à un moment donné, les ferrailles non fondues. Les électrodes remontent au fur et à mesure que le volume du bain augmente. Alors commence la dernière période de la fusion, le rayonnement des arcs n'est plus limité par la charge, la surface du bain sous les électrodes est relativement grande, toute la scorie qui s'est formée au fur et à mesure de la fusion du bain empêche cependant un rayonnement trop intensif vers la voûte.

La fusion donc peut se diviser en trois périodes bien caractérisées nécessitant des conditions d'exploitation bien distinctes [25] :

- L'allumage d'arc et le début de fusion
- Fusion de la charge et la formation du bain de fusion
- Achèvement de la fusion et la formation du laitier

III.3.2. Allumage de l'arc et début de la fusion

La durée de cette période est d'environ 2 minutes. En cas de charge de ferraille, le but est d'immerger rapidement la pointe d'électrode dans la charge de ferraille et de protéger le toit du four et les panneaux situés sur les parois de four du rayonnement de l'arc. (Certain temps le four est chargé à 100% DRI oxyde de fer, le but est d'augmenter la température du bas du four afin de permettre une augmentation de taux d'enfournement du DRI (feedrate))

Les arcs creusent des puits dans la charge froide. Les électrodes descendent lentement au fond de ces puits, puis commencent à remonter.

Des arcs relativement courts sont utilisés pendant cette période (pour avoir un faible rayonnement), des courants élevés (pour une perforation rapide de la ferraille) et un faible facteur de puissance ($\cos \varphi < 0,750$ pour augmenter la stabilité de l'arc sur la ferraille froide).

Une ou deux étapes de voltage de démarrage suffisent pour effectuer les premières étapes.

La ferraille légère doit être utilisée comme couche de ferraille supérieure, pour une perforation plus rapide et plus facile.

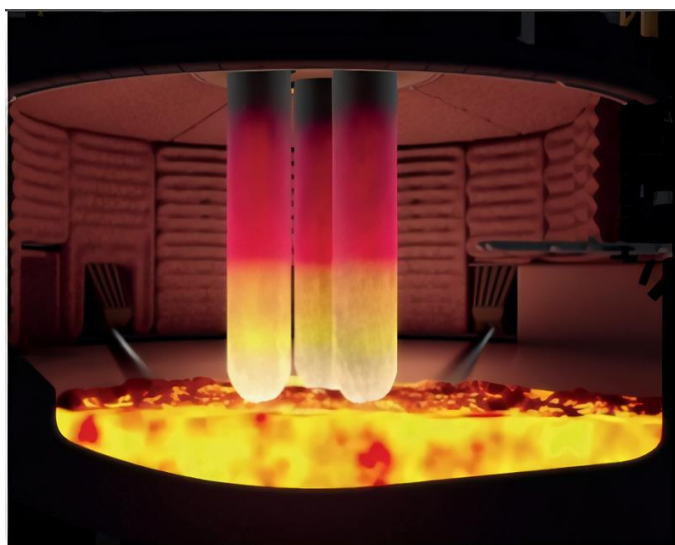


Figure 44: Ignition d'arc électrique et début de fusion

III.3.3. Fusion rapide et la formation du bain de fusion

III.3.3.1 Formation du bain

Une fois que les électrodes ont pénétré dans la couche supérieure du ferraille, la puissance électrique peut être augmentée pour obtenir un arc stable le plus long possible, l'expérience a montré que cela se produit à des facteurs de puissance compris entre 0,75 et 0,90. Une puissance maximale peut être appliquée pour que les électrodes produisent les plus grands puits possibles à l'intérieur de la charge, et la ferraille commence à fondre essentiellement par le dessous.

Les arcs fondent le métal sous la protection de la charge elle-même, les éléments de ferraille en s'échauffant se soudent les uns aux autres et forment, au-dessus du bain en formation, une voûte, jusqu'à son effondrement plus ou moins brutal.

Au fur et à mesure de la fusion de la ferraille, les espaces vides autour des électrodes s'agrandissent et sont à nouveau remplis par la ferraille qui chute. Pendant toute la phase de fusion, la tension d'arc peut être maintenue élevée, car les parois du four sont complètement protégées par la ferraille, On mentionne aussi que les panneaux refroidis à l'eau permettent de faire fonctionner le four à une puissance électrique élevée sans se soucier du rayonnement dans les zones chaudes, donc la fusion de la ferraille peut être effectuée à la tension maximale pendant presque tout le cycle et atteindre encore une durée de vie satisfaisante du revêtement réfractaire. En même temps, le fonctionnement à haute tension maintient le courant d'électrode relativement bas, cela contribue à réduire la consommation d'électrode.

III.3.3.2 Rôle des brûleurs

Afin d'accélérer la fusion des ferrailles dans les zones froides (zones où le rayonnement d'arc est moins efficace), des brûleurs à jet oxygène sont utilisés, La durée d'allumage des brûleurs, pour une charge à 100% ferraille, est normalement comprise entre 40 et 60% du temps de fusion, dépend des propriétés physiques de la ferraille chargée et l'efficacité thermique des brûleurs est d'environ 40 à 60%. Pour les fours de forte puissance, le principal avantage de l'utilisation de brûleurs n'est pas de remplacer une partie de l'énergie électrique, mais plutôt d'obtenir rapidement un bain de fusion avec un minimum de ferraille non fondue.

III.3.3.3 Rôle d'oxygène

L'oxygène est presque généralement fourni à la cuve du four comme source d'énergie supplémentaire pour la fusion de la ferraille. Le but est d'oxyder certains éléments exothermiques de la charge afin d'obtenir une fusion rapide et homogène et en même temps de couper rapidement des morceaux de ferraille lourds et longs. La chaleur générée par l'injection d'oxygène résulte de la réaction exothermique de l'oxygène avec le carbone, le silicium, l'aluminium et le manganèse.

L'effet qui est particulièrement efficace c'est l'oxydation du carbone, qui est renforcé par l'agitation induite dans le métal liquide par le gaz CO produit avec l'oxydation. L'oxygène injecté à travers des lances et des modules réagit avec les éléments suivants toujours contenus dans la ferraille: Al, Si, Mn, P, Cr, C, Fe. De tous ces éléments, seul le carbone peut être ajusté à tout niveau requis par les additifs ou par l'injection de carbone, permettant un contrôle alternatif de l'énergie.

L'énergie chimique est introduite par l'oxygène, les matières carburants et le gaz naturel, de plus en plus par des injecteurs plutôt que par des lances. Les réactions de production d'énergie sont les suivantes:



III.3.3.4. Fusion d'oxyde de fer DRI

Le chargement du DRI dans le four est régulé pour maintenir la température du bain d'acier liquide à environ 1560-1580 °C.

Lorsque l'alimentation en DRI suit la charge en ferraille, le lit de fusion doit être fondu jusqu'à environ 300 kWh / tonne afin de garantir une quantité suffisante de bain liquide lors du démarrage de l'alimentation en DRI, favorisant ainsi la fusion du DRI.

Pendant l'alimentation continue DRI, toutes les 10 minutes la température du bain doit être vérifiée et un échantillon doit être prélevé pour l'analyse chimique: la température doit rester autour de 1570 °C, le carbone à 0,08-0,15%. Des températures plus basses provoquent une consommation d'énergie plus élevée en raison d'une solidification du DRI qui nécessitera une grande quantité d'énergie pour le refondre. Des températures plus élevées signifient des pertes d'énergie élevées par rayonnement.

III.3.4. Achèvement de la fusion et la formation du laitier

À ce stade, les arcs ne sont plus protégés et peuvent rayonner librement. On a intérêt à utiliser des arcs plus courts pour diminuer leur rayonnement sur la voûte.

Une fois que suffisamment de ferraille a fondu pour accueillir la deuxième charge, le processus de chargement est répété. Une fois la charge de ferraille finale fondue, les parois latérales du four peuvent être exposées à un rayonnement élevé de l'arc. En conséquence, la tension doit être réduite. Alternativement, la création d'un laitier mousseux permettra d'enterrer l'arc et protégera la coque du four. De plus, une plus grande quantité d'énergie sera retenue dans le laitier et transférée au bain, ce qui se traduira par une plus grande efficacité énergétique.

Lorsque la charge de ferraille finale est complètement fondue, les conditions du bain de fusion sont atteintes

À ce stade, une température du bain et un échantillon d'analyse chimique seront prélevés. L'analyse de la chimie du bain permettra à l'aciériste de déterminer la quantité d'oxygène à souffler pendant le raffinage. L'aciériste peut aussi commencer à faire la liste des ferro-alliages à ajouter dans la prochaine étape. Ces quantités sont confirmées après raffinage. [24]

III.4. La période d'oxydation des éléments

III.4.1. Introduction

La période d'oxydation d'une fusion commence en fait avec la formation d'un bain de métal liquide sous les électrodes. Le degré d'oxydation du bain fondu est déterminé par:

- Caractéristiques chimiques et physiques de la charge (par exemple: les ferrailles légères s'oxyderont dans l'atmosphère du four à un degré plus élevé que les ferrailles lourdes, fonte, DRI, etc.);
- afflux d'air dans le four;
- Taux d'alimentation en oxygène (soufflage direct et / ou ajout d'agents oxydants sous forme de minerai de fer, la calamine).

La teneur en carbone dans le bain doit toujours être ajustée pour fournir une ébullition active qui agite le métal, de sorte que la température et la composition chimique sont homogénéisées, les niveaux d'azote et d'hydrogène sont minimisés et une bonne interaction entre le laitier et le métal peut se produire.

L'injection d'oxygène plus le mélange de laitier et de métal améliorent considérablement les vitesses de réaction. Au fur et à mesure de l'oxydation, la température du bain augmente et l'ébullition du

carbone devient encore plus dynamique, l'augmentation de la fluidité du bain d'acier permet d'éliminer les macro-inclusions non métalliques dans le laitier.

III.4.2. Oxydation du carbone

III.4.2.1 Réaction générale

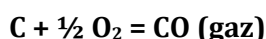
Au cours du processus de fabrication de l'acier dans le four à arc, il faut fournir de l'oxygène gazeux pour la décarburation (oxydation de carbone), Cela peut être fait en utilisant des lances à oxygène supersoniques à travers la paroi latérale du four, en maintenant la porte du laitier pratiquement fermée, réduisant ainsi la quantité d'air entrant dans le four de même que les pertes d'énergie avec les gaz dégagés.

La relation entre le taux d'alimentation en oxygène et en carbone, ainsi que l'oxygène présenté sous forme de FeO et le carbone déjà présent : détermineront le changement de composition chimique du bain pendant le cycle de fusion.

L'oxygène étant injecté principalement dans le métal, des conditions très favorables à la décarburation sont créées; Cette injection crée une zone de réaction très turbulente dans laquelle le carbone contenu dans le métal peut réagir avec l'oxygène ou le FeO.

Également, l'injection de carbone dans le laitier crée des conditions favorables à la réduction de FeO avec le carbone.

La réaction de décarburation se produit par réaction directe avec l'oxygène et / ou par réaction avec le FeO se formant par oxydation du bain d'acier :



Cette réaction a une grande influence sur l'évolution des autres processus physico-chimiques. Cette influence est expliquée par la formation d'une quantité énorme de bulle gazeuse CO. Le volume de CO dégagé dépasse de plusieurs fois celui du métal à travers lequel il se dégage. Ainsi, à 1550°C, le volume de CO formé par l'oxydation de 0,1% de carbone dépasse de 100 fois celui du métal.

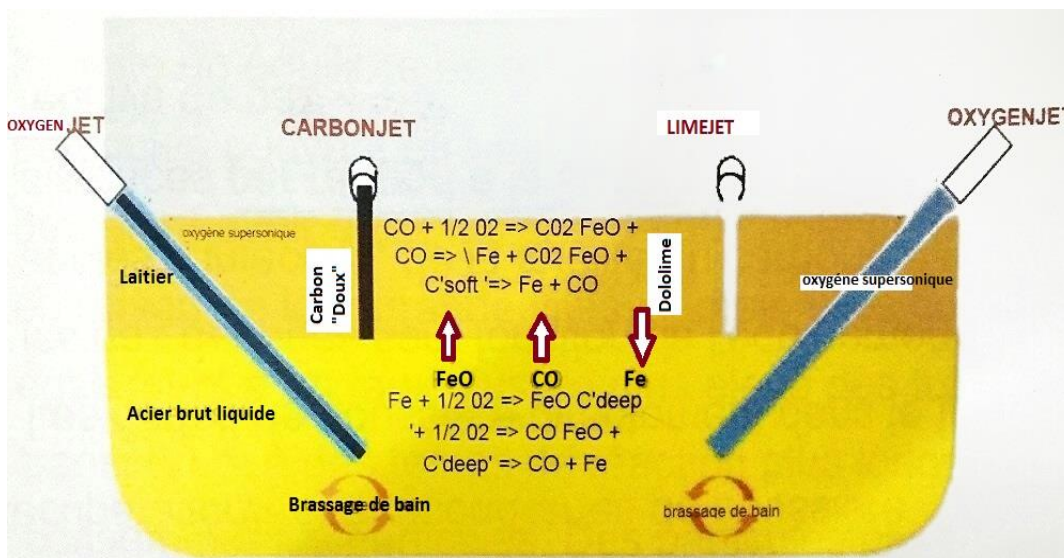


Figure 45: réactions d'oxydation de carbone survenant lors de la fusion [20]

III.4.2.2 Oxydation du carbone par réaction avec FeO

L'oxydation du carbone dans le bain métallique par l'oxyde de fer FeO par l'interaction entre le métal et le laitier passe par plusieurs étapes :

1. Diffusion de FeO à travers la couche de laitier en direction de l'interface laitier-métal,
2. Passage de l'oxygène (accompagné du fer) dans le métal à travers l'interface laitier-métal,
3. Diffusion convective de l'oxygène vers l'endroit de l'évolution de la réaction chimique,
4. Réaction chimique entre l'oxygène et le carbone
5. Formation des bulles de CO (nouvelle phase gazeuse)
 - La germination des bulles de CO se déroule dans les pores
 - La bulle continue à grossir et s'enrichit avec CO
 - La bulle prend la forme sphérique pendant qu'elle se détache du pore
 - La bulle de CO est tirée vers la surface suite à la force d'Archimède
6. Les bulles de CO formées dans le métal montent à travers le laitier vers l'atmosphère du four.

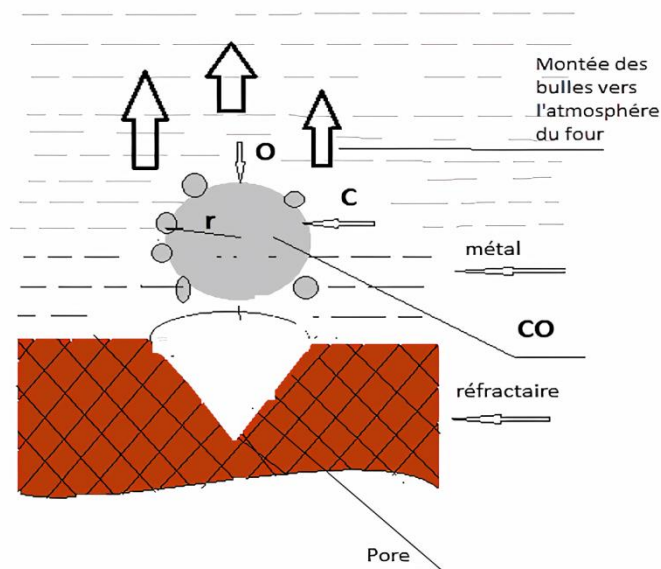


Figure 46: Formation de bulle de CO suite de sa montée vers l'atmosphère du four

Le dégagement de CO sous forme de bulles à travers le métal et le laitier provoque un brassage intensif de ces deux phases. En flottant vers la surface, ils absorbent les gaz dissous dans le métal (H_2 , N_2) et les emportent vers l'atmosphère du four. De plus, leur mouvement vers la surface provoque la montée et l'élimination des inclusions non métalliques.

Généralement, le bain d'acier est oxydé à une basse teneur en carbone pour répondre aux spécifications de nuance d'acier et permettre une bonne déphosphoration.

Pour la plupart des nuances d'acier au carbone pour la production de bobines/rond à béton, ce niveau de carbone peut être fixé dans l'intervalle 0,02-0,15%

III.4.3. Oxydation du phosphore

La teneur de phosphore doit être limitée de 0,025 à 0,040%. [De 0,02 à 0,05% pour les aciers ordinaires, de 0,015 à 0,008% pour la majorité des aciers de qualité et <0,0004% pour les aciers travaillant dans des conditions de très basses températures].

L'élimination du phosphore par oxydation dans le bain métallique est une obligation ! Car :

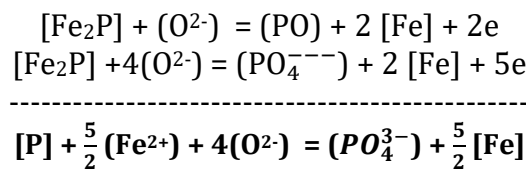
- Il provoque un grossissement du grain en s'existant en solution dans la ferrite, ce qui augmente la fragilité de l'acier à froid. En se ségrant facilement, contribue à l'hétérogénéité de l'acier.
- il augmente la limite élastique et la charge de la rupture tout en diminuant considérablement la plasticité et la ductilité.

A la base, l'élimination du phosphore, l'une des réactions chimiques les plus importantes survenue lors de la fusion, est déterminée par la basicité et la température du laitier ; sa teneur en fer, du fait que le penta-oxyde de phosphore résultant de la réaction entre le phosphore et l'oxyde de fer est fixée dans le laitier par la chaux libre sous forme de phosphate de calcium.

L'unique moyen de déphosphoration est l'élimination du phosphore à partir de l'acier liquide dans un laitier hautement basique et oxydant (riche en CaO et FeO).

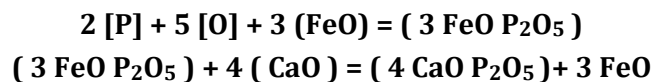
Afin d'éliminer le phosphore de l'acier liquide, le seul moyen est de le lier à l'oxygène, l'éliminer dans un laitier et le lier par l'oxyde de calcium (CaO).

La réaction d'oxydation du phosphore par l'oxyde de fer (théoriquement) qui inclut l'adsorption de l'oxygène et l'interaction avec le phosphore est la suivante :



Les conditions les plus favorables permettant une élimination maximale du phosphore est l'augmentation de la concentration de CaO et la diminution de celle de SiO₂ dans le laitier, autrement dit : la déphosphoration est favorisée par l'augmentation de la basicité du laitier et la concentration de FeO (en réalité, l'augmentation de FeO est limitée).

Comme la déphosphoration par FeO uniquement est impossible, On ajout de la chaux CaO pour achever une bonne déphosphoration. Les réactions suivantes présentent le processus :



Le CaO pouvant décomposer le FeO de sa liaison avec le P₂O₅ car c'est une base forte et par la suite peut se lier solidement avec le P₂O₅

Un pourcentage élevé d'oxygène dans la scorie et aussi dans le bain signifie une bonne scorification et oxydation du phosphore.

En global : $2[\text{P}] + 5[\text{FeO}] + n[\text{CaO}] = [n\text{Ca}, \text{P}_2\text{O}_5] + 5 \text{Fe}$ (avec n=3ou4)

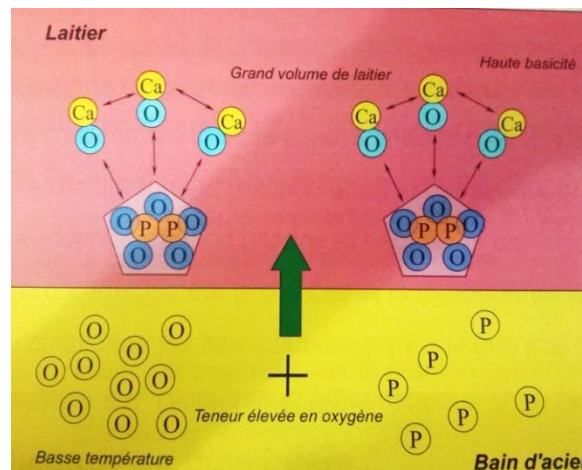


Figure 47: oxydation du phosphore vers le laitier [20]

Facteurs favorisant la déphosphoration de l'acier :

- Basicité du laitier (laitier basique moussant, concentration élevée en chaux)
- Teneur en oxyde de fer (souffler de l'oxygène augmente l'oxydation du laitier)
- Température de l'acier (relativement basse, car il s'agit d'une réaction exothermique)

Les conditions optimales de la déphosphoration sont bien une valeur de basicité comprise entre 1,5 et 3, une teneur en oxyde de fer d'environ 20 à 30 %, la température du bain d'acier ne dépasse pas 1580° C.

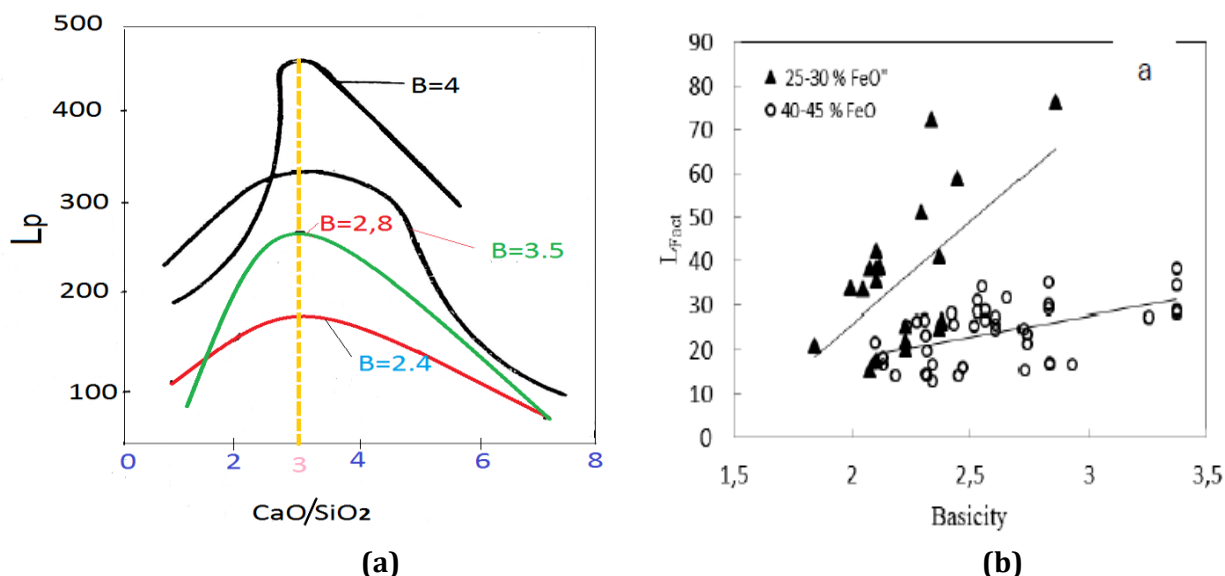


Figure 48 a) : Influence de basicité et le rapport CaO/FeO sur coefficient de partage de phosphore Lp
Figure 48 b) Variation du rapport de distribution du phosphore avec la basicité du laitier [27]

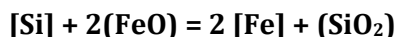
Discussion :

La figure b) montre qu'à une concentration élevée d'oxydes de fer dans le laitier de 40 à 45%, la basicité du laitier a un faible effet sur le rapport de partage du phosphore Lf, en même temps, avec une teneur modérée en FeO dans le laitier de 25 à 30%, la basicité du laitier a un effet significatif sur le rapport de partage, le Lf maximum = 50-75 obtenu à la base B = CaO/SiO₂ ≈ 2.5- 3.0.

III.4.4. Oxydation silicium /manganèse

III.4.4.1. Silicium

La teneur du silicium dans l'acier varie de 0,05 - 0,3%, il existe surtout à l'état de solution ferrite. Son influence n'est pas très importante sur les propriétés de l'acier, mais rend toute fois l'acier plus homogène à la coulée, en s'opposant, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures, l'un des défauts les plus fréquents qu'on rencontre après solidification de l'acier. Ce qui nécessite son élimination du bain. L'oxydation du silicium se déroule selon la réaction suivante :



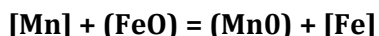
L'oxyde de silicium forme par sa réaction avec la chaux CaO : des silicates sous forme de 2CaO.SiO₂ très stables. Cette formation entraîne la diminution de l'activité de SiO₂ dans le laitier basique ; de plus en présence d'une grande activité de FeO caractéristique de la période de fusion et d'oxydation, le silicium s'oxyde totalement.

III.4.4.2. Manganèse

La teneur du manganèse dans l'acier varie de 0,2 à 0,8%, existe en solution dans la ferrite sous forme de MnS et surtout sous forme de carbure Mn₃C associé à la cémentite Fe₃C.

Au niveau du bain de fusion, l'oxydation du manganèse se déroule à la l'interface Métal – Laitier.

Selon la réaction suivante :



L'oxyde de manganèse MnO a dans le laitier un caractère plus basique que l'oxyde de fer FeO. Dans les laitiers acides les cations de manganèse forment avec les anions de silicates des liaisons plus fortes que les cations de fer et le rapport $f_{\text{MnO}}/f_{\text{FeO}}$ est inférieur à 1. Dans les laitiers basiques, $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \geq 2$ l'activité des cations augmentent par rapport à ceux du fer et ainsi le rapport $f_{\text{MnO}}/f_{\text{FeO}}$ est supérieur à 1.

III.5. Période de réduction des éléments / Raffinage

III.5.1. Raffinage

III.5.1.1. Introduction

Le raffinage de l'acier signifie normalement l'enlèvement d'un ou de plusieurs éléments du bain de métal. Ce raffinage est provoqué par des réactions laitier-métal, des réactions gaz-métal ou des réactions dans le métal liquide. Nous discuterons du raffinage de : S, N, Ca, O.

En outre, les aspects du traitement d'aluminium seront discutés. Le raffinage d'un élément particulier peut être effectué par une ou plusieurs des réactions.

La désulfuration est une réaction typique laitier-métal, car la désoxydation peut être réalisée comme une réaction de masse du métal, une réaction laitier-métal ou même une réaction de gaz métallique.

A ce stade, le moussage du laitier est une nécessité. Pour que le laitier mousse, la production de gaz CO est nécessaire, par l'injection de carbone et d'oxygène à travers des lances ou des brûleurs. Pour le moussage, plusieurs matériaux carbonés sont utiles, en fonction du coût local et de la disponibilité: anthracite, coke de pétrole, brise de coke.

La période de réduction des éléments des fours se passe au niveau de four à poche.

III.5.1.2. Four à poche

Le four poche est une installation combinée au four électrique dans le but d'élaborer des aciers de hautes qualités, permet de réaliser l'épuration de la fusion, la mise à nuance de l'acier, l'équilibrage de la température et le réglage de température de coulée souhaitée, réalise les avantages suivantes :

- Une homogénéisation précise et un ajustement de la température de l'acier.
- Un ajustement précis de la composition de l'acier par addition.
- Une possibilité de produire un acier à faible taux d'inclusion (propreté inclusionnaire)
- Régulariser les cadences de l'aciérie par une fonction (tampon) entre le four et la coulée continue.
- Augmenter la productivité de l'acier.

Les caractéristiques techniques du four à poche sont comme suit :

- puissance du transformateur : 12,5 MVA
- Tension primaire nominale : 63KV
- Fréquence : 50 Hz
- Diamètre des poches utilisées : 3020mm
- Poids nominale de coulée : 80 tonnes
- Capacité du chauffage : 3 à 4°C/min
- Diamètre d'électrode 350mm
- Brassage à l'argon par bouchon poreux au fond de la poche

La partie mécanique du four à poche inclue :

- Trois logements d'électrode coulissent à travers trois passages étanches souples.
- Voute refroidie à l'eau
- additions : 08 trémies +chariot de transport par goulotte
- Un hublot protéger qui permet de Controller le mouvement du bain
- Une trémie de d'addition à chargement automatique.

III.5.1.3. Procédé de four à poche :

Le procédé four poche est utilisée pour l'affinage en milieu réducteur de l'acier liquide, c'est un procédé de fabrication pour tous les types d'acier y compris les aciers de haute gammes où l'accent est mis sur l'affinage métal laitier, ce qui veut dire que l'affinage par le laitier telle la désoxydation et la désulfuration sont facilement réalisée dans la poche sous un laitier hautement basique et atmosphère réductrice.

L'affinage est l'étape de processus du four à arc classique qui a été transposée dans le four poche est soumis aux quatre conditions ci-après :

- 1- Brassage avec gaz inerte (par exemple argon).
- 2- Travail sous atmosphère faiblement réductrice.
- 3- Travail avec laitier réducteur (dans toute la mesure du possible avec laitier blanc).
- 4- Chauffage électrique avec électrodes protégé.

L'acier liquide est brassée dans la poche par bullage pour amorcée les réactions, en réalise ainsi en même temps l'homogénéisation de la température et le control de la composition chimique.

En outre le chauffage arc immergée dans lequel les électrodes en graphites sont plongées dans une couche de laitier liquides permet d'évité l'érosion des réfractaires du au rayonnement des arcs.

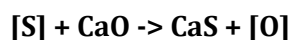
- Le procédée LF a ainsi permis non seulement d'améliorer la qualité et régularisé la composition chimique, la température de l'acier et le rendement de l'acier mais aussi d'augmenté la productivité du four à arc qui travail en principe en directe avec le four LF.

III.5.2. Désulfuration

Le soufre est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A froid le soufre amène également une diminution importante de la résistance la teneur limite en soufre doit être inférieure à $0,035 + 0,06\%$, généralement inférieure à % de la teneur en manganèse. Un minimum de soufre (0,02%) est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité.

Plusieurs éléments apparaissant comme des fragments d'éléments ou des éléments d'alliage dans le bain de métal peuvent se déplacer entre le laitier et le métal. Du point de vue du raffinage, l'élément le plus important à ce stade est le Soufre.

L'élimination de S de l'acier dans le laitier est illustrée par la réaction suivante :



Pour obtenir une bonne désulfuration, il faut d'abord satisfaire les trois conditions fondamentales :

1. Laitier basique
2. Haute température (60-80° C plus élevée que la T. delta)
3. Désoxydation du bain (O₂ inférieur à 40 ppm)

L'agitation du bain et la réactivité du laitier sont importantes pour accélérer la formation de sulfure de calcium.

Une expression pour la partition S entre laitier et métal est déjà définie.

Maintenant, c'est prédire la teneur finale en soufre dans le métal. Cependant, pour cela, il faut connaître le poids spécifique du laitier, c'est-à-dire les kilos de laitier par tonne de métal, la capacité en sulfure du laitier, la concentration initiale de S dans les générateurs de laitier et dans le métal et enfin, le coefficient d'activité S dans le métal.

Nous supposons que la quantité totale de S reste constante, c'est-à-dire que ce qui a quitté le métal se retrouvera dans le laitier.

La désulfuration est représentée mathématiquement par la formule :

$$S_{\text{final}} = S_{\text{initial}} \times e^{-K_s \times (A/V) \times t}$$

A = surface de bain en m²

V = volume de métal en m³

K_s = vitesse de désulfuration constante m/min

t = temps de traitement

Les valeurs de K_s dépendent du pouvoir d'agitation et nous pouvons considérer :

K_s dans le four à arc = 0,08 (0,8-1,2 NI / tonne / minute)

Fe-S en fonction du rapport V du laitier à 1 600° C
Métal : 0,15 C, 0,25 Si, 0,75 Mn, 0,030 Al, 0,030 % de S init
Scories : MgO 7%, Al₂O₃ 15%, 16 kg/tonne
Teneur en métal S d'équilibre, %

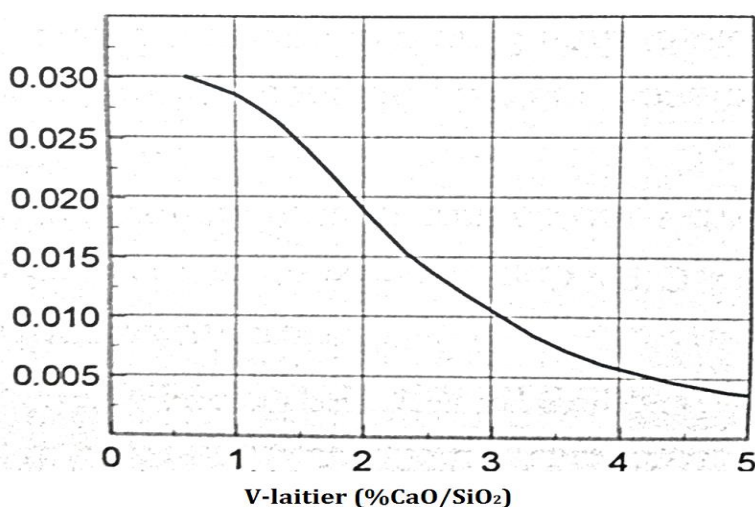


Figure 49: La teneur en soufre en fonction du rapport CaO/SiO₂ [20]

Discussion : il est évident que le rapport V doit être au moins supérieur à pour atteindre une bonne désulfuration.

En revenant au diagramme de phases CaO - SiO₂- MgO - Al₂O₃, les meilleurs résultats de désulfuration sont obtenus avec des laitiers justes saturés en CaO.

Le fait qu'une désulfuration considérable soit possible ne signifie pas nécessairement que la teneur finale en S sera faible.

La réaction d'échange entre le métal et le laitier prend du temps et est principalement influencée par l'intensité de l'agitation et du mélange.

La désulfuration est favorisée par :

- Faible teneur en oxygène par désoxydation avec Al, Si, CaSi.
- Agitation avec argon ou azote. (Traitement sous vide si nécessaire).
- Laitier réactif, très basique, à la chaux vive et garniture de poche de base.
- Gros volume de laitier. (mais pas excessif)
- Large zone de contact entre l'acier et le laitier (turbulence).
- Gaz sous agitation et injection.
- Haute température par chauffage à l'arc.

III.5.3. Désoxydation

III.5.3.1. Conditions de désoxydation

La désoxydation est le processus par lequel la teneur en oxygène dissous est réduite dans le métal. Pendant la fusion d'acier, la réaction de décarburation peut entraîner une formation de bulles gazeuses de CO (phénomène d'effervescence) qui provoque de grands défauts de porosité.

Dans le but d'éviter l'apparition des défauts graves, on additionne des éléments ayant une affinité chimique supérieure à celle du carbone et qui permettent de calmer complètement ou partiellement l'acier. De plus, ces métaux forment des oxydes plus stables que FeO et généralement insolubles dans l'acier

L'acier est généralement désoxydé non pas par un seul désoxydant mais à l'aide de 3 ou plusieurs éléments (par exemple: le manganèse, le silicium, l'aluminium, le calcium...).

Indépendamment des niveaux d'équilibre, il est important de comprendre que la séquence et la quantité d'additions de désoxydant peuvent influencer la vitesse de flottation des inclusions formées. Ainsi, lors de la désoxydation avec du silicium et du manganèse, il est préférable d'utiliser un rapport Mn/Si supérieur à 4/1 car les inclusions ainsi produites flottent hors du bain plus facilement que les silicates simples.

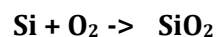
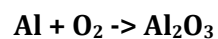
De même, la désoxydation à l'aluminium suivie de l'ajout de silicium peut produire des inclusions globulaires d'alumine, dont l'élimination se déroule plus rapidement que celle des silicates flottants.

III.5.3.2. Désoxydation des précipitations : élimination des inclusions

Il s'agit de la méthode de désoxydation la plus courante, un désoxydant (Al et / ou Si) est ajouté au bain de métal.

La désoxydation par précipitation en elle-même ne réduit pas la teneur en oxygène, mais transforme simplement l'oxygène dissous en oxyde d'oxygène. Ensuite, les particules d'oxydes d'oxygène doivent être éliminées du bain de métal par flottation.

Les réactions sont :



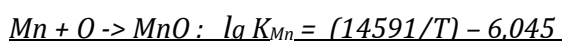
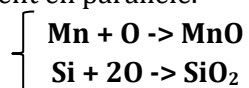
L' Al_2O_3 apparaît sous forme de petites particules solides et tranchantes dans le métal. Ils flottent facilement par agitation au gaz et par induction.

Le Si est rarement utilisé comme désoxydant simple, mais plutôt en combinaison avec du manganèse. (La combinaison de Si et de Mn réduit plus efficacement la teneur en oxygène que l'un ou l'autre des éléments séparément)

Si on n'utilise que le Si seul comme désoxydant, le produit de désoxydation est du **SiO₂ pure** ➡ le SiO₂ est solide jusqu'à 1713°C ➡ les particules précipitées ne collent pas les unes aux autres comme les particules d' Al_2O_3 , mais agissent comme des particules discrètes dans le métal ➡ Ils ne sont donc pas faciles à faire flotter comme inclusions.

Mn+Si :

En ajoutant à la fois du Si et du Mn au bain de métal, les deux éléments sont engagés dans la désoxydation et les réactions se déroulent en parallèle.



La capacité désoxydante du manganèse augmente avec le refroidissement du métal et la ségrégation de l'oxygène

Le manganèse peut désoxyder l'acier liquide à haute température à condition qu'il soit additionné avec un autre élément, par exemple le silicium (désoxydation complexe).

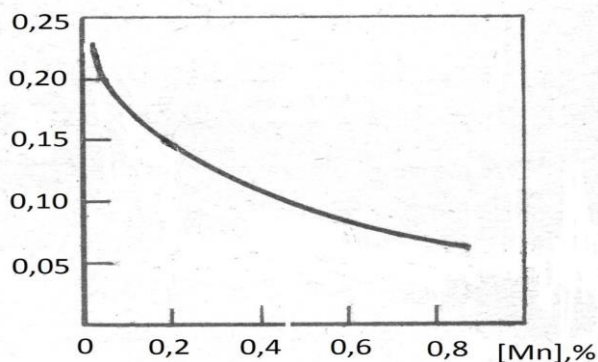


Figure 50: Courbe de désoxydation Mn-O



Il est utilisé dans la désoxydation de tous les aciers calmés grâce à sa grande affinité chimique à l'oxygène et aux bonnes propriétés des inclusions non métalliques SiO_2 .

- Les produits de réaction SiO_2 et le MnO s'attirent fortement parce que le SiO_2 a un caractère acide alors que MnO est fortement basique : un silicate de manganèse se formera donc, dans lequel les activités du SiO_2 et du MnO sont fortement réduits. La désoxydation de précipitation génère des inclusions de laitier amovible par flottation dans le bain de métal.

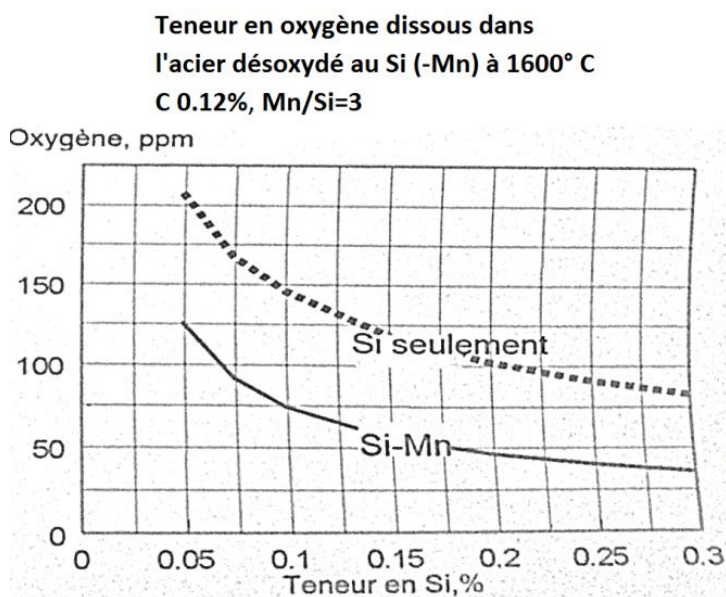


Figure 51: l'effet d'utilisation de Si seul et Si+Mn sur la désoxydation d'acier

Après la désoxydation, la cible est un rapport $Mn / Si > 3$.

Cela garantit que le silicate formé au manganèse est liquide aux températures d'élaboration.

III.5.3.3. Elimination des inclusions non métalliques

L'élimination des inclusions non métalliques s'effectue par leur passage vers le laitier ou les réfractaires qui sont en contact avec le métal liquide dans lequel elles se sont formées. Le déplacement des inclusions vers le laitier ou les réfractaires se déroule soit grâce à leur flottation ou grâce au transfert provoqué par les courants du métal.

III.6. Coulée continue d'acier de poche

III.6.1. Introduction

L'acier brut liquide fondu dans les aciéries est ordinairement coulé dans des lingotières, puis les divers lingots ou brames passent dans des laminoirs pour être transformés en demi-produits, c'est-à-dire en blooms, lingots méplats, billettes et larges.

Schématiquement, le procédé de coulée continue consiste essentiellement :

- à former de façon continue, dans une lingotière ouverte à ses deux extrémités et énergiquement refroidie, une carapace de métal solide assez résistante pour contenir le métal liquide ;
- à faire avancer cette carapace, qui est détachée de la lingotière grâce à la contraction du métal, et à achever la solidification de celui-ci par aspersion d'eau.

Les deux raisons majeures qui, dès l'origine, ont rendu ce procédé très attractif par rapport à la coulée classique en lingots sont :

- **L'amélioration du rendement métallique de la coulée** : en effet, la retassure, qui était à l'origine de forts chutages dans les lingots d'acier calmé, est éliminée du fait de l'alimentation en continu de la lingotière ;
- **La possibilité de couler des produits de plus faible section, directement adaptés aux laminoirs finisseurs**, sans avoir à passer par un *blooming* ou un *slabbing*, ce qui représente un gros avantage en matière d'investissement et de prix de revient.

Par la suite, d'autres avantages sont apparus ou se sont affirmés : économie d'énergie, économie de main-d'œuvre, amélioration de la qualité (diminution de la ségrégation et meilleure homogénéité), cycle de fabrication plus court et meilleures conditions de travail.

La composition de l'acier est fixée par les propriétés demandées au produit fini. Les contraintes amenées par la coulée continue pourront conduire à la modifier légèrement, mais la marge de manœuvre est généralement étroite.

III.6.2. L'opération

En simplifiant beaucoup, on peut décrire de la manière suivante l'opération de la coulée continue, par exemple d'une billette : comme pour couler des lingots classiques, l'acier liquide est versé dans une poche de coulée dans une lingotière en cuivre, sans fond, refroidie à l'eau. La section intérieure libre de cette lingotière correspond à la section extérieure de la billette que l'on veut obtenir; avant la coulée, la lingotière est fermée par la «fausse billette», nom donné à un mandrin portant à la partie supérieure une plaque de même section que la lingotière. A cette plaque est fixé un boulon à tête à marteau destiné à être noyé dans la barre qui va être coulée. Dans la lingotière une mince couche d'acier brut coulé se solidifie très rapidement au contact direct des parois intérieures de la lingotière refroidies à l'eau, et à celui de la fausse billette servant de fond. Il se forme, pour ainsi dire, un récipient d'acier à parois minces rempli d'acier liquide. Si l'on abaisse lentement la billette servant de fond au fur et à mesure que continue à s'écouler le flot d'acier contenu dans la poche de coulée, il se forme une billette de plus en plus longue qu'il faut continuer à refroidir jusqu'à solidification complète et qui est ensuite tronçonnée à la longueur voulue.

III.6.3. La coulée

- Avant la coulée proprement dite, l'installation de coulée continue doit être préparée pour l'opération. Le revêtement réfractaire du panier intermédiaire est préalablement chauffé à une température d'un peu plus de 1000 °C, à l'aide des brûleurs prévus à cet effet. On vérifie le bon fonctionnement de tous les dispositifs de l'installation. La fausse billette qui sert à fermer la lingotière au début de la coulée, est placée sur un mandrin suffisamment long; introduite par en dessous dans la lingotière de cuivre, à l'aide des rouleaux extracteurs ou à l'aide d'un treuil.

- Dans la lingotière, on bouche ensuite l'espace libre entre la fausse billette et les parois de la lingotière, par exemple avec un cordon d'amiante.
- La poche de coulée remplie d'acier liquide est amenée à l'aide d'un pont ou d'un monte-charge au-dessus de la cuve intermédiaire, puis, en levant la quenouille ou en faisant basculer la poche, lorsqu'il s'agit de poches théières, le couleux laisse l'acier se déverser dans la cuve intermédiaire. Simultanément les robinets d'eau froide alimentant la lingotière sont ouverts. Dès que la cuve intermédiaire est presque remplie, la quenouille qui en ferme le fond est levée. Pour pouvoir contrôler le bon fonctionnement de la quenouille, on peut, tout d'abord, laisser l'acier s'écouler dans une rigole spéciale dans la cuve de secours prévue en cas d'incident.
- C'est seulement lorsque le jet d'acier liquide coule normalement que la rigole est enlevée, ce qui permet au métal de s'écouler librement dans la lingotière refroidie à l'eau. On met alors en marche le dispositif de va-et-vient de la lingotière, puis, progressivement, les pulvérisateurs de la ligne de refroidissement et les rouleaux moteurs.
- Le débit d'acier liquide dans la lingotière est réglé par relèvement ou abaissement de la quenouille du panier, de telle sorte que le niveau de l'acier liquide soit, pendant toute l'opération, à quelques centimètres en dessous du bord supérieur de la lingotière. Lorsque la barre ainsi coulée et encore chaude, a été saisie par les rouleaux extracteurs, la fausse billette est remplacée par la barre chaude et évacuée par le bas.
- La barre chaude descend, est saisie par le dispositif de cintrage et mise à l'horizontale; elle traverse ensuite la dresseuse avant de passer dans la tronçonneuse où elle est découpée à la longueur voulue, puis entreposée. L'acier brut, s'écoulant de la poche à la fin de l'opération et charge, la plupart du temps, de scorie, est dirigé par la rigole vers la cuve de secours. En même temps, la descente de la barre qui vient d'être coulée est interrompue jusqu'à ce que l'acier verse en dernier lieu dans la lingotière se soit solidifié en surface. Alors seulement la coulée tout entière est évacuée.

On peut accélérer la solidification de la tête de coulée par pulvérisation d'eau.

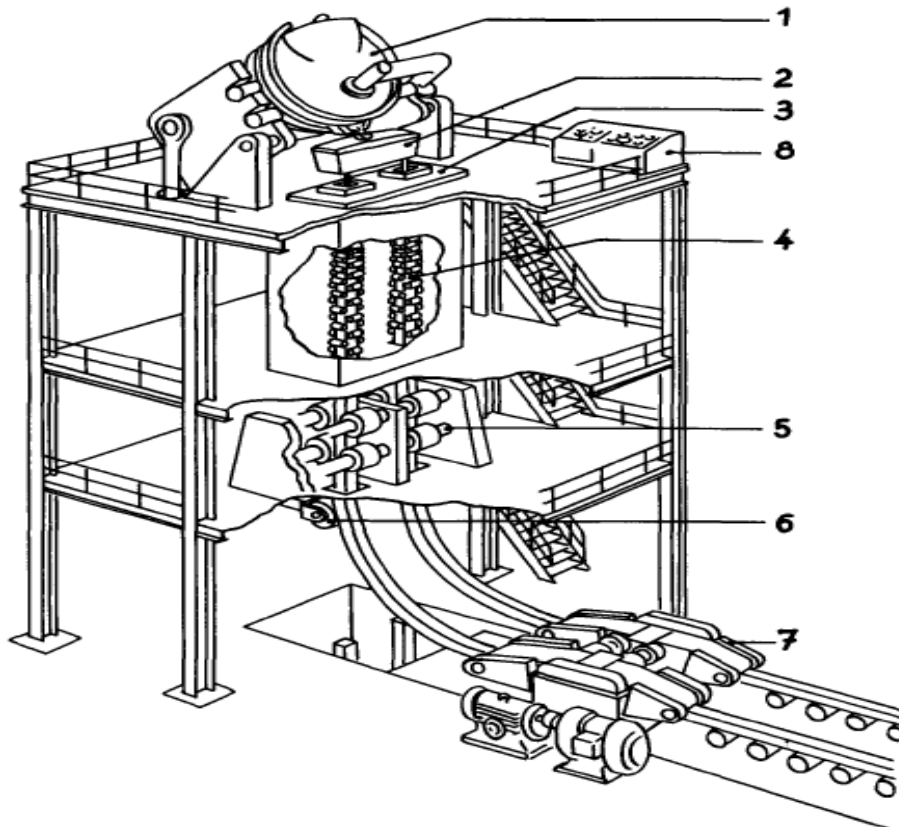


Figure 52: Schéma d'une installation coulée continue à deux lignes [28]

1. poche basculante,
2. Tundish,
3. Lingotière,
4. caisse de refroidissement,
5. rouleaux moteurs,
6. dispositif de cintrage,
7. dresseuse,
8. pupitre de mesure et de commande.

III.6.4. Structure interne de l'acier coulée

La coupe transversale d'un produit coulé en continu présente : [29]

Surface : un lard de quelques millimètres obtenu par solidification ultrarapide dans la lingotière

Une zone dendritique : où les dendrites sont dirigées vers le centre du produit

La structure dendritique confère au métal une certaine fragilité de par sa nature et de par l'orientation des dendrites.

L'importance relative de la zone dendritique croît avec la teneur en carbone, la surchauffe du métal, la section du produit, la vitesse de coulée et l'intensité du refroidissement secondaire.

Une zone équiaxe qui occupe la partie centrale.

Dans la zone équiaxe, on constate une succession de creux situés dans l'axe du produit, c'est la porosité axiale, qui peut affecter diverses formes : creux finement et régulièrement distribués (large zone équiaxe) ou au contraire creux de plus grandes dimensions d'allure triangulaire. La zone de la porosité axiale est aussi le siège de la plus forte ségrégation.

Dans la zone équiaxe, on trouve aussi un autre type de ségrégation: la ségrégation en « V » appelée aussi semi-macro-ségrégation. Elle a son origine dans la contraction des masses d'acier spongieux en bout de solidification qui donnent naissance à de petits canaux dirigés vers le centre où se glisse et se solidifie le métal enrichi venant des couches supérieures.

III.6.5. Les demi-produits issus de la coulée continue

- La billette, dont la section carrée va généralement de 100 × 100 à 150 × 150 mm ;
Dans des autres cas :
- Le bloom, dont la section varie le plus souvent de 180 × 180 à 240 × 240 mm (avec un maximum de l'ordre de 350 × 600 mm) ;
- La brame, dont l'épaisseur varie en général de 150 à 300 mm et la largeur de 600 à 2 200 mm (avec un maximum réalisé de l'ordre de 2 700 mm).

Chapitre IV. Calcul du bilan de matière

Calcul du bilan de matières avec période oxydante complète :

Le calcul se fait pour 100 Kg de charge métallique.

➤ **Tableau: 01**

Eléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Va	Al	Cu	Sn
%	0,31 0,36	1,15 1,35	0,15 0,30	≤ 0,03 5	≤ 0,03 0	≤ 0,05	0,07 0,07	≤ 0,04	≤ 0,25 0	≤ 0,03 5
Moyenne %	0,33 5	1,25 0	0,22 5	-	-	-	0,05	-	-	-

Tableau 01: Composition chimique de la nuance 110F.

➤ **Tableau:02**

Eléments	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Co ₂	H ₂ O	S	Cr ₂ O ₃
Fondants											
Chaux	82	3,30	2,50	1	96	-	0,10	0,20	0,20	0,10	-
Minerai de Fer	0,10	0,30	6,25	2,50	90	-	0,25	-	0,17	-	-
Spath-fluor	0,40	-	0,10	0,20	0,80	95	-	0,30	-	0,20	-
Sable	-	-	97	1	2	-	-	-	-	-	-
Magnésie	3,50	90,25	3,45	0,80	2	-	-	-	-	-	-
Cendre d'électrode	11,8	-	56,5	31,7	-	-	-	-	-	-	-
Chamotte	0,70	0,30	62	35	2	-	-	-	-	-	-
Cendre de Coke	5	1	48,7	25	20	-	0,30	-	-	-	-
Chrome-Magnésie	2	66	6,50	4	11,5	-	-	-	-	-	10

Tableau 02 : Composition chimique des matières fondantes et réfractaire

➤ **Tableau 3 :**

Eléments	C	Si	Mn	Cr	Al	P	S	Cend	Fe	Ca	Ti	Mv
Ferraille	0,40	0,30	0,36	0,035	–	0,05	0,05	–	98,80	–	–	–
Fonte solide	4,20	0,80	1,80	–	–	0,05	0,05	–	93,1	–	–	–
Fe- Mn(75%)	6	2	75	–	–	0,30	0,03	–	16,67	–	–	–
Fe-Si (75%)	0,12	75	0,40	–	2,50	0,04	0,03	–	21,91	–	–	–
Fe-Si (45%)	0,15	45	0,50	–	1	0,03	0,02	–	53,30	–	–	–
Si-Mn	1	20	66	–	–	0,08	0,05	–	12,87	–	–	–
Al	–	–	–	–	98	–	–	–	2	–	–	–
Fe-Cr	4	2	0,4	70	–	0,05	0,03	–	23,52	–	–	–
Coke	80	–	–	–	–	–	2	13	–	–	–	5
Si-Ca	–	70	–	–	–	–	–	–	–	25	–	–
Ti-Al	–	–	–	–	35	–	–	–	–	–	40	–

Tableau 03 : Composition chimique de la charge métallique ferroalliages et coke

Composition, destination, exigences aux propriétés mécanique et particularités de la technologie de la production de l'acier de nuance 110F :

- ✓ Nuance de l'acier 110F (composition chimique) :
La composition chimique de l'acier 110F est représentée dans le tableau n°01
- ✓ Destination de l'acier 110F :
L'acier de nuance 110F, est destiné pour la fabrication des tubes, (sans soudure) qui sera ensuite utilisé pour les hydrocarbures (pétroles, gaz naturel,...)
- ✓ Préparation du four :
Le lit de fusion est préparé de telle façon que la concentration en carbone soit au minimum de 0,4% pour un bon travail du bain.

Le laitier de la période de fusion est formé grâce à l'addition de chaux (25 Kg/t), de minerai de fer (10 Kg/t) et de spath-fluor (8 Kg/t) ou de chamotte (7 Kg/t). L'état final de la fusion est intensifié grâce au chauffage d'oxygène pour la fusion finale de morceaux de ferrailles à la périphérie et l'élévation de la température du métal. A la fin de la période de fusion, on décasse de 70 à 80% du laitier et on forme un nouveau laitier en additionnant de la chaux (9,028 Kg/t) et du spath-fluor (0,058 Kg/t) et on étame la période oxydante.

L'oxydation du carbone se déroule grâce à l'addition de minerai de fer on soufflage d'oxygène on grâce à l'utilisation des deux.

La vitesse d'oxydation est de 0,3 à 0,5 % de carbone par heure. Lors de l'ébullition du bain, on n'oxyde pas moins de 0,4% de carbone, le phosphore s'élimine jusqu'à une concentration inférieure à 0,015%, la concentration du manganèse et du carbone doivent être supérieur à 0,08 + 0,1%.

En même temps avec la formation de laitier de la période réductrice, à l'aide de (X Kg/t) de chaux, (X Kg/t) de spath-fluor, (X Kg/t) de chamotte, on additionne du ferro-Manganèse pour atteindre la fourchette inférieure de la concentration de cet élément. On désoxyde (par précipitation) le métal en additionnant du Ferro-silicium en morceaux pour avoir 0,15% de silicium (sans pertes au feu).

La désoxydation par diffusion se fait à l'aide de mélange de poudre de coke (déchets d'électrodes), de Ferro-silicium et de chaux. On corrige la composition chimique et la température. A 20 - 40 minutes avant la coulée de l'acier avec une concentration du 0,25% de silicium, avec un laitier blanc, on procède à la désoxydation finale à l'aide d'aluminium (environ 0,6%), par la suite on corrige la concentration en silicium.

Dans les mélanges déjà cités (mélanges de poudre), pour le traitement du laitier de coulée, on additionne 0,5 Kg/t de poudre d'aluminium et de spath-fluor si nécessaire.

La coulée de l'acier s'accompagne d'un traitement du métal en poche à l'aide de laitier synthétique très fluide, hautement basique (50+55% de CaO) et pas plus de 0,5% de FeO.

a- Calcul du lit de fusion :

Période de fusion et d'oxydation :

- o La composition de la charge est déterminée avant tout en partant de la concentration de carbone dans cette charge.

La concentration de carbone dans la charge $[C]_{ch}$ (et dans le métal avec la fusion) doit favoriser une oxydation lors de la période d'ébullition de pas moins de 0,4% de carbone

($\Delta[C] = 0,5\%$) et doit-être égale à :

$[C]_{ch} + \Delta[C] + [C]_{fe} = \text{concentration du carbone après l'ébullition du métal.}$

Où : $[C]_{fe}$ - Concentration du carbone après l'ébullition du métal.

Pour compenser la carburation du métal à partir des électrodes la concentration du carbone, dans l'acier à la fin d'ébullition ($[C]_{fe}$) doit-être de 0,03-0,05/ inférieur à la fourchette inférieure dans la nuance ($[C]_{fi}$ = carbone de la fourchette inférieure), mais au maximum de 0,1%.

Lors du calcul du lit de fusion (calcul de la concentration du carbone de départ), il faut tenir aussi compte des ferro-alliages riches en carbone qui peuvent apporter du carbone ($[C]_{fa} = 0,1\%$ = carbone apporté par les ferro-alliages), dans ce cas :

$[C]_{fe} = 0,1\%$ = carbone apporté par les ferro-alliages), dans ce cas :

$[C]_{fe} = [C]_{fi} - (0,03 + 0,05) - [C]_{fa}$.

$[C]_{fe} = 0,335 - 0,04 - 0,1 = 0,195 / = [C]_{fe}$.

Pour l'acier 110F et en tenant compte du fait qu'à la fin de la période oxydante, il reste dans l'acier 0,01% de manganèse avec l'addition de ferro-manganèse (à 75% de Mn) et du ferro-chrome (à 70% de Cr).

Pour obtenir l'acier final $(Mn)_{Moy} - 0,194 = 0,335 - 0,194 = 0,141\%$.

Pour 0,194 % de manganèse résiduel, on additionne :

$G_{Fe-Mn} = 98. (1,250 - 0,194) / (0,75. 0,85. 100) = 1,602 \text{ Kg.}$

Et ($Cr_{moy} - 0,02080 = 0,575 - 0,0208 = 0,5542\%$) en additionnant :

$$G_{Fe-Cr} = 98.(0,575 - 0,008) / (0,7 \cdot 0,92 \cdot 100) = 0,863 \text{Kg.}$$

Les ferro-alliages apportent 0,1% de carbone.

Dans ce cas :

$$\begin{aligned} [C]_{ch} &= [C]_{fi} - (0,03 + 0,05) - [C]_{fa} + \Delta[C]. \\ &= 0,310 - 0,04 - 0,1 + 0,5 = 0,660 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

La quantité de fonte nécessaire (X) dans la charge est déterminée par l'équation suivante :

$$[C]_{ch} = [C]_{fonte} \cdot X/100 + [C]_{ferrailles} \cdot (100-X)/100.$$

$$\text{Donc : } 0,660 = 4,2 \cdot X/100 + 0,4(100-X)/100,$$

$$0,660 - 40 = 0,038 X \quad \Rightarrow X = 6,842 \text{ Kg.}$$

Donc la composition chimique de la charge adoptée sera présentée dans le tableau suivant :

Quantité adoptée Kg/%	C	Si	Mn	Cr	P	S
Ferrailles : 93,16	0,773	0,28	0,335	0,0326	0,0466	0,0466
Fonte : 6,84	0,287	0,055	0,123	-	0,0034	0,0034
Total : 100	0,660	0,335	0,458	0,0326	0,050	0,050

Tableau 04

La température de fusion du fer avec l'addition d'autres éléments diminue et elle peut être calculée selon :

$$T_f = 1539 - 90 \cdot C - 6,2Si - 1,7Mn - 1,8Cr - 2,9Ni - 1,7Mo - 1,3V - 1,7Ti \dots (C^\circ)$$

La température du métal avant la coulée de l'acier 110F est égal à :

$$T_c = T_f + \Delta T_m + \Delta T_p.$$

Ou : ΔT_m : diminution de la température lors de la coulée et du maintien de l'acier dans la poche (30 - 50°C)

ΔT_p : dépend du revêtement de l'épaisseur des lingots leur masse et la nuance de l'acier, et varie de 80 à 110 °c.

Lors de la fusion de l'acier 110F, la température à la fin de fusion (T_1) doit être égale à :

$$T_1 = 1539 - 90 \cdot C + (50 + 70^\circ c)$$

$$T_1 = 1539 + 90 \cdot 0,66 + 60^\circ c = 1539,6^\circ c.$$

A la fin de la période d'ébullition, elle est de : (T_2)

$$T_2 = T_c + (20 + 30^\circ c) = 1539 - (30 + 50^\circ c) + (80 + 110^\circ c) + (20 + 30^\circ c).$$

En calculant $T_f = 1477 + 40 + 95 = 1612^\circ\text{C}$.

Et finalement on aura :

$$T_2 = 1612 + 25 = 1637^\circ\text{C}.$$

b- La somme des concentrations d'oxyde de fer dans le laitier oxydant dépend en général de la concentration de carbone dans le métal, et peut être déterminée par l'équation :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755\% [\text{C}]$$

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755/0,66 = 8,64\%$$

Dans notre cas, la somme des oxydes (ou bien des concentrations des oxydes) de fer dans le laitier à la fin de la période de fusion (à $[\text{C}]_{\text{ch}} = 0,66\%$) est égale à :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755/0,66 = 8,64\%.$$

A la fin de la période d'ébullition elle sera :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755\% [\text{C}]_{\text{fe}}.$$

Où $[\text{C}]_{\text{fe}}$: est la concentration du carbone de fin d'ébullition. Donc :

$$\% (\text{FeO}) = 7,5 + 0,755\% 0,195 = 11,372\%.$$

c- Au moment de la fusion totale de la charge, le silicium s'oxyde totalement.

En ce qui concerne le manganèse, à une à une concentration de 0,458% dans la charge, il s'oxyde de 60 à 70%. Sa concentration dans le métal, lors de la période de fusion est déterminée par la température du bain, et pour un chauffage normal du bain, la concentration du manganèse sera d'environ : (70% s'oxyde, qui est de 0,3206%).

d- L'un des buts les plus essentiels de la période d'oxydation est la déphosphoration du métal.

La dépendance du coefficient de partage du phosphore entre le métal et le laitier en fonction de la concentration des oxydes de fer dans le laitier et sa basicité à 600°C est la suivante :

Dépendance :

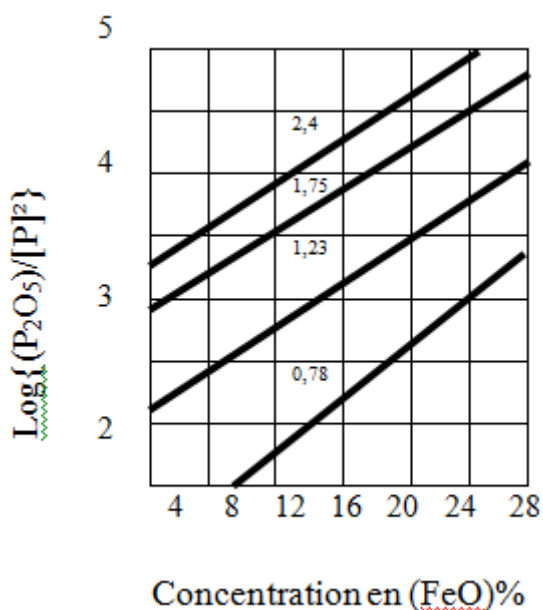


Fig. : La dépendance du coefficient de partage

En fonction de la basicité du laitier et de la concentration des oxydes de fer dans ce dernier à 1600°C (les chiffres au-dessus des courbes basicités du laitier).

Si la température du processus est différente de 1600°C, il faut corriger la valeur de :

$$\text{LogF} = \text{Log} \{ (\text{P}_2\text{O}_5) / [\text{P}]^2 \}$$

A une température plus petite que 1600°C, sa valeur augmente de 0,05 pour 10°C et au contraire.

La valeur : F_B , pour calculer la basicité 'B', est déterminée selon la formule :

$$B = 2,4 : \text{LogF} = 11,448 + 0,0642\% [\text{C}] - t/200.$$

$$B = 1,75 : \text{LogF} = 11,125 + 0,0629\% [\text{C}] - t/200.$$

$$B = 0,87 : \text{LogF} = 9,290 + 0,0795\% [\text{C}] - t/200.$$

$$B = 1,23 : \text{LogF} = 10,413 + 0,0657\% [\text{C}] - t/200.$$

Où : t est la température du métal, (°C)

Quantité du laitier :

Pour la formation d'un laitier basique de la période de fusion, lors du chargement ou lors de la fusion, on additionne 2,5% de chaux, 0,7% de chamotte et 1% de minerai de fer. Ainsi le silicium de la charge, de la chaux, de la chamotte et du minerai de fer oxydé lors de la période de fusion, donne :

$$\text{SiO}_{2\text{tot}} = \text{SiO}_{2(\text{charge})} + \text{SiO}_{2(\text{chaux})} + \text{SiO}_{2(\text{chamotte})} + \text{SiO}_{2(\text{minerai de fer})} = 1,278 \text{ Kg.}$$

- A 20% de SiO_2 , la quantité de laitier (U_1) sera égale à :

$$U_1 = \text{SiO}_{2(\text{totale})} \cdot 100/20 = 1,278 \cdot 100/20 = 6,39.$$

- La concentration résiduelle du phosphore dans le métal à la fin de la période de fusion $[\text{P}]_1$ est déterminée par l'équation :

$$[\text{P}]_1^2 + 229 \cdot [\text{P}]_1 / 2F_1 \cdot U_1 = 229 [\text{P}]_{\text{ch}} / 2F_1 \cdot U_1 ;$$

Où : $[\text{P}]_{\text{ch}} = 0,05\%$ (phosphore de la charge)

En supposant que la basicité de la période d'oxydation :

$$(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 1,75$$

Avec la somme des oxydes de fer % (FeO) est égale à 8,64/, selon la figure, on trouve :

$$\text{LogF} = 3,23$$

Et en tenant compte de l'influence de la température, on trouve :

$$\text{LogF}_1 = 3,42 ; \text{ d'où } F_1 = 2632.$$

Donc on peut avoir :

$$[\text{P}]_1^2 + 229 \cdot [\text{P}]_1 / 2F_1 \cdot U_1 = 229 \cdot [\text{P}]_{\text{ch}} / 2F_1 \cdot U_1.$$

$$[\text{P}]_1^2 + 229 \cdot [\text{P}]_1 / 2 \cdot 2632 \cdot 6,39 = 229 \cdot 0,05 / 2 \cdot 2632 \cdot 6,39.$$

$$[\text{P}]_1 = -229/33638 + ((229/33638)^2 + 229 \cdot 0,05/33638)^{1/2}$$

$$[\text{P}]_1 = 0,013\%.$$

- A la fin de la fusion, on élimine environ 95% du laitier. La quantité de phosphore restante dans le four est égale à :

$$P_{\text{oxydé}} \dots \dots \dots 100\%$$

$$X \dots \dots \dots 5\% \qquad \text{Donc : } X = 0,0185\%$$

C'est-à-dire : la concentration résiduelle du phosphore dans le métal, lorsque la réduction est entamée, est égale à :

$$[P]_{\text{résiduel}} = [P]_1 + [P]_{\text{restant}(5\%)} = 0,013 + 0,002 = 0,015\%$$

- La quantité supplémentaire de l'acier (U_2), nécessaire pour atteindre le degré exigé de phosphore du métal est déterminé par la formule :

$$U_2 = 229 \cdot ([P]_1 - [P]_2) / F_2 \cdot [P]_2^2$$

Si des exigences concernant une déphosphoration encore plus poussée ne sont pas posées, la période oxydante est stoppée à une concentration du phosphore dans le métal égale à 0,008%.

On considère la basicité du deuxième laitier égale à 2,4, à la somme des oxydes de fer (FeO)₂ égale à 12% (d'après la figure), dans ce cas, selon la figure on aura :

$$\text{Log}F = 3,85. \text{ Tenant compte de l'influence de la température on obtient :}$$

$$\text{Log}F_2 = 3,95 \text{ d'où } F_2 = 8912.$$

Donc U_2 sera :

$$U_2 = 229 \cdot (0,015 - 0,008) / 8912 \cdot (0,008)^2 = 2,81 \text{ Kg, (\%)}$$

- La quantité totale du laitier (U_0) nécessaire pour une déphosphoration exigée est égale à :

$$U_0 = U_1 + U_2 = 6,39 + 2,81 = 9,20 \text{ Kg.}$$

e- En déterminant les régimes de déphosphoration du métal, il faut calculer la quantité de chaux nécessaire pour la formation du laitier oxydant.

La concentration de CaO dans le laitier de la période de fusion à 20% de SiO_2 et $(CaO) / (SiO_2) = 1,75$ doit être égale à :

$$\%(CaO) = \%(SiO_2) \cdot 1,75 = 35\%$$

La quantité de chaux (Z_1) utilisés dans ce cas (la chaux contient 92% de CaO) est déterminée par la formule :

$$U_1 \cdot 35/100 = Z_1 \cdot 92/100 ; Z_1 = U_1 \cdot 35/92 = 2,43 \text{ Kg.}$$

Dans le laitier de période oxydante à 20% de SiO_2 et $(CaO) / (SiO_2) = 2,4$, on obtient :

$$\%(CaO) = 20 \cdot 2,4 = 48\%$$

En tenant compte de (CaO) dans le laitier restant après la période de fusion(5%), la quantité de chaux additionnée (Z_2) pour la formation du deuxième laitier est égale à :

$$U_2 \cdot 48/100 - U_2 \cdot 35/100 \cdot 5/100 = Z_2 \cdot 92/100$$

$$\text{Donc : } 0,48 U_2 - 0,0175 U_2 = 0,92 Z_2, \qquad \text{d'où } Z_2 = 1,24 \text{ Kg/100 Kg de charge.}$$

f- La masse principale du soufre éliminée, passe dans le métal vers le laitier.

Si on néglige la possibilité d'élimination du soufre sous une forme gazeuse, dans ce cas les variations de la concentration du soufre dans le métal et dans le laitier, dans n'importe qu'elle période de fusion, peut être déterminée par l'équation :

$$S_d + S_d \cdot 0,01U = S_f + 0,01U \cdot S_f$$

Ou :

U : quantité de laitier dans le métal, % ;

S_{dd} ; S_f ; S_{dd} ; S_{ff} : concentration de départ et finales du soufre dans le métal et le laitier, %.

Le coefficient de partage du soufre entre le métal et le laitier est égal à :

$$L = S_{ff} / S_f .$$

En remplaçant $(S)_f$ par $L_s \cdot S_d$ dans la formule précédente on obtient :

$$S_f = S_d + 0,01 \cdot U \cdot (S)_d / (1 + 0,01 \cdot U \cdot L_s)$$

En connaissant la basicité du laitier, la valeur de (L_s) peut être trouvée d'après la figure.

La concentration du soufre $(S)_d$, en tenant en considération le soufre contenu dans les fondant et le minerai de fer est égale à environ : 0,05%

Comme : $S_d = 0,05 \%$; $U_1 = 6,39 \text{ Kg}$; $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 1,75$,

Donc :

$L_s = 2,75$ (est calculé d'après la figure suivante) :

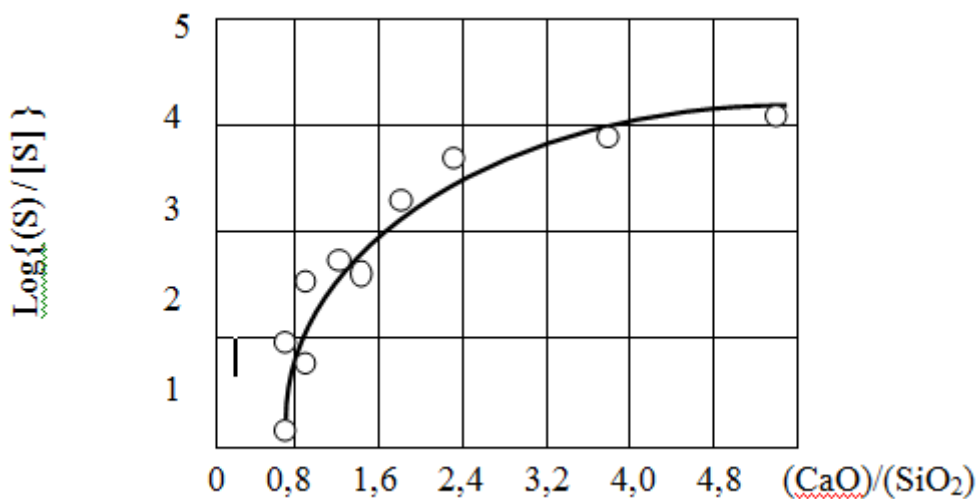


Fig: Influence de la basicité du laitier sur le coefficient de partage du soufre lors de la période oxydante.

La concentration du soufre dans le métal lors de la période de fusion est égale à :

$$S = (0,05 + 0,01 \cdot 6,39 \cdot 0,05) / (1 + 0,01 \cdot 6,39 \cdot 2,75)$$

$$= 0,0532 / 1,175725 = 0,045\% .$$

La quantité des oxydes est calculée, pour l'élimination des éléments, l'oxyde de carbone, la formation de laitier et la dissolution dans le métal. Pour simplifier les calculs on pose les conditions suivantes :

- L'oxydation de Si, Mn, P et des autres éléments dont la quantité principale est éliminée lors de la période de fusion, se déroule grâce à l'oxygène de l'air, l'oxygène technique utilisé pour l'intensification de la période de fusion.
- Le degré d'oxydation du laitier est obtenu grâce à l'utilisation du minerai de fer. L'oxydation du carbone est provoquée par le soufflage d'oxygène technique.

Le contenu et l'ordre du calcul, la quantité d'oxygène et du minerai de fer sont les suivants :

- Lors de la période de fusion, il s'oxyde 0,335 Kg de silicium et 0,308 Kg de manganèse et 0,042 Kg de phosphore.

Le calcul de la quantité nécessaire d'oxygène est présenté dans le tableau suivant :

Eléments	Quantités oxydés (Kg)	Réactions	Oxygène nécessaire (Kg)
Si	0,335	$\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$	0,383
Mn	0,308	$\text{Mn} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{MnO}$	0,090
P	0,042	$2\text{P} + \frac{5}{2}\text{O}_2 = \text{P}_2\text{O}_5$	0,054

Tableau 05: Quantité d'oxygène nécessaire pour l'oxydation du silicium, manganèse et phosphore.

D'après ce tableau, l'oxygène total est de 0,527 Kg = (O_{tot}).

Le volume d'oxygène est de :

$$V = O_{\text{tot}} \cdot 22,4/32 \text{ (m}^3\text{/ 100 Kg de charge)}.$$

$$V = 0,527 \cdot 22,4/32 = 0,37\text{m}^3\text{/Kg de métal.}$$

En général, le débit d'oxygène insufflé utilisé après fusion de 80 à 90% de charge pour la fusion finale de cette dernière et l'augmentation de la température, est de 4 à 6 m³/t. Comme on le voit, cette quantité (même sans prendre en considération l'oxygène de l'air) est largement suffisante pour l'oxydation des éléments.

La quantité de minerai de fer, pour la formation du laitier de la période de fusion et oxydante, est calculée comme suit :

La quantité de fer dans le laitier oxydant pour la somme des oxydes de fer :

$$\Sigma(\text{FeO})_1 = 8,64\% \text{ et } \Sigma(\text{FeO})_2 = 12\% :$$

$$\Sigma(\text{FeO})_1 = U_1 \cdot (\text{FeO})_1 \cdot 56/70 \cdot 100.72$$

$$\Sigma(\text{FeO})_1 = 6,39 \cdot 8,64 \cdot 56/7200 = 0,43\text{Kg.}$$

$$\Sigma(\text{FeO})_2 = U_2 \cdot (\text{FeO})_2 \cdot 56/70 \cdot 100.$$

$$\Sigma(\text{FeO})_2 = 2,81 \cdot 12 \cdot 56/1200 = 0,26 \text{ Kg.}$$

Le rapport entre (FeO) et (Fe₂O₃) dans le laitier dépend de la basicité de ce dernier et de son potentiel d'oxydation, à 35-45% CaO, 15-25% SiO₂ dans un laitier oxydant, Le rapport Fe / Fe est d'environ 0,3.

$$D'ici (Fe)^{2+} = \Sigma(Fe)/1,3 ; Fe^{3+} = \Sigma(Fe) - Fe^{2+},$$

La quantité de (FeO), (Fe₂O₃) dans le premier et deuxième laitier est de :

$$(FeO)_1 = \Sigma(Fe)_1 ; 72/1,3 \cdot 56 = 0,43 \cdot 72/1,3 \cdot 56 = 0,425 \text{ Kg.}$$

$$(Fe_2O_3)_1 = (\Sigma(Fe)_1 - (Fe)^{2+}_1) \cdot 160/112 = (0,43 - 0,331) \cdot 1,43 = 0,141 \text{ Kg.}$$

$$(Fe)_{FeO} = (FeO)_1 \cdot 56/M_{3FeO} + (FeO)_2 \cdot 56/M_{3FeO}$$

$$= (0,425 + 0,236) \cdot 56/216 = 0,171 \text{ Kg.}$$

- a. Pendant le soufflage, la quantité de carbone qui s'oxyde est de 0,5%, donc la nécessité en oxygène sera :

$$\text{On à la réaction : } (FeO) + C = Co + Fe$$

$$O_c = 0,5 \cdot 16/12 = 0,667 \text{ Kg}$$

Et le volume sera :

$$V_{O_c} = O_c \cdot 22,4/32 = 0,667 \cdot 22,4/32 = 0,467 \text{ m}^3.$$

Lors du processus d'oxydation du carbone, une quantité d'oxygène insufflée est dépensée pour l'oxydation du fer, une autre quantité est dissoute dans le bain. Ainsi le coefficient d'utilisation d'oxygène (Mo₂) diminue continuellement ce qui amène à une augmentation du volume de l'oxygène à insuffler.

La valeur moyenne (Mo₂) dans un intervalle de concentration de carbone de départ [C]_d jusqu'à une concentration finale [C]_f est déterminée selon la formule :

$$Mo_2 = 1 - \frac{\sqrt{a}}{[C]_d - [C]_f} \left(\text{Arctg} \frac{[C]_d}{\sqrt{a}} - \text{Arctg} \frac{[C]_f}{\sqrt{a}} \right)$$

Ou : **a** = coefficient dont la valeur se trouve dans les limites 0,008- 0,012% pour les alliages au carbone on choisit **a** = 0,010.

$$Mo_2 = 1 - \frac{0,010}{0,66 - 0,195} \left(\text{Arctg} \frac{0,66}{0,01} - \text{Arctg} \frac{0,195}{0,01} \right) = 0,930$$

Pour oxyder 0,5% de carbone, la quantité d'oxygène exigée lors du soufflage est égale à :

$$O_2 = O_c/M_{O_2} = 0,667/0,93 = 0,717 \text{ Kg/100 Kg.}$$

D'où le volume d'oxygène est de :

$$V_{O_2} = O_c/M_{O_2} \cdot 22,4 = 0,717 \cdot 22,4/32 = 0,502 \text{ m}^3/100 \text{ Kg.}$$

Selon les données de [Co] : la relation entre [O] et [C] dans un bain effervésant (four électrique) à [C] 0,05% est décrit par l'équation :

$$\% [O] = 0,0033/ \% [C] - 0,00455 = (0,0033/0,335) - 0,00455$$

D'où : % [O] = 0,0053.

La quantité d'oxygène dissoute dans le métal, lors de la période oxydante (pour $[C]_{\text{charge}} = 0,66\%$) et pour $[C]_{\text{Fe}}$ (de fin d'ébullition) est égale à 0,195%) est égale à :

$$\Delta [O] = 0,0033 / [C]_{\text{Fe}} - 0,0033 / [C]_{\text{ch}} \dots (3,4,7)$$

$$\Delta [O] = 0,0033 / 0,195 - 0,0033 / 0,66 = 0,012\% \text{ Kg.}$$

La quantité d'oxygène insufflée pour l'oxydation du fer (O_{Fe}) est égale à :

$$O_{\text{Fe}} = O - O_c - \Delta [O] = 0,717 - 0,667 - 0,012 = 0,038 \text{ Kg.}$$

Ainsi les pertes de fer lors du soufflage d'oxygène sont :

$$Fe_o = O_{\text{Fe}} \cdot 56/6 = 0,038 \cdot 56/6 = 0,353 \text{ Kg.} \dots (3,48).$$

Lors de la période de fusion est d'oxydation, il ya des pertes d'éléments et de fer par oxydation, ainsi que des pertes de fer par évaporation (zone de l'arc, zone de soufflage d'oxygène) et des pertes mécanique du métal lors du décrassage. En partant des données pratiques, on peut admettre que 15% des pertes totales de fer passent dans le laitier décrassé et 85% de pertes s'évaporent dans la zone à haute température. Les pertes de métal lors du décrassage $Fe_{\text{(Laitier)}}$ sont généralement de 15% [B], pour notre cas, on suppose qu'ils sont de 1%. Ainsi la quantité de métal à la fin de la période oxydante (X_1) est égale à :

$$X_1 = 100 - \Sigma (\text{des éléments oxydés}) - (Fe)_{\text{FeO}} - Fe_{\text{O}_2} - Fe_{\text{évaporé}} - Fe_{\text{Laitier}} (3,40)$$

$$X_1 = 100 - (0,335 + 0,308 + 0,042 + 0,5) - (0,171 + 0,133 + ((Fe/FeO + FeO_2) 85/15 + 1)) = 95,788 \text{ Kg.}$$

Période réductrice :

A la fin de la période oxydante, la quantité de métal (X_2) et la quantité de ferro-alliage (P_{fa}) peuvent être calculées d'après les équations :

$$X_2 = X_1 + P_{\text{fa}} (3,50) \text{ et}$$

$$P_{\text{fa}} = (X_2 \cdot [\%E_f] - X_1 \cdot [\%E_d] / [\%E]_{\text{fa}}) \cdot M_E \dots (3,51)$$

Ou :

$[\%E_f]$; $[E]_d$; $[\%E]_{\text{fa}}$: les concentrations de l'élément d'alliage finale, de départ et dans les ferro-alliages

M_E : le rendement de l'élément ;

P_{fa} : quantité de ferro-alliage additionnée, en (Kg).

La composition chimique de départ et celle pour l'obtention de l'acier 110F, sont représentées dans le tableau suivant :

Composition chimique	C	Si	Mn	Cr	P	S
A la fin de la période oxydante	0,195	-	0,15	-	0,008	0,045
Acier 110F obtenu	0,335	0,225	1,25	0,575	0,035	0,030

TAB N°06

Mise à la nuance :

$$P_{Fe-Si(75)} = X_2 \cdot 0,27 / 75 \cdot 0,5 + X_2 \cdot Si_{(Nuance\ moyenne)} / 75 \dots (3,52)$$

$$P_{Fe-Mn(75)} = (X_2 \cdot Mn_{(Nuance\ moyenne)} - X_1 \cdot Mn_{(reste\ p,\ oxy)}) / 75 \dots (3,53)$$

$$P_{Fe-Cr(70)} = X_2 \cdot Cr_{(Nuance\ moyenne)} / 70 \dots (3,54)$$

$$P_{Fe-V(80)} = X_2 \cdot V_{(Nuance\ moyenne)} / 80 \dots (3,55)$$

En calculant, on trouve :

$$P_{Fe-Si(75)} = X_2 \cdot (0,27/37,5 + 0,225/75) = 0,0102 X_2 ;$$

$$P_{Fe-Mn(75)} = 0,0167 \cdot X_2 - 0,192 ;$$

$$P_{Fe-Cr(70)} = 0,0082 \cdot X_2 ;$$

$$P_{Fe-V(80)} = 0,0006 \cdot X_2.$$

Mais on a : $X_2 + X_1 + P_{fa}$; donc :

$$X_2 = X_2 \cdot (0,0102 + 0,0167 + 0,0082 + 0,0006) - 0,192 + 95,788$$

D'où :

$$X_2 = 0,0357 / (1 - 0,0357) = 99,13 \text{ Kg.}$$

Alors la quantités des ferro-alliages à additionner seront :

$$P_{Fe-Si(75)} = 0,714 + 0,297 = 1,011 \text{ Kg ;}$$

$$P_{Fe-Mn(75)} = 1,463 \text{ Kg ;}$$

$$P_{Fe-Cr(70)} = 0,813 \text{ Kg ;}$$

$$P_{Fe-V(80)} = 0,059 \text{ Kg.}$$

La quantité de laitier de la période réductrice (U_3) est déterminée en fonction du degré de désulfuration du métal ($\%S = \%[S]_d - \%[S]_f$). La formule pour calculer cette quantité est obtenue en utilisant l'équation

$$[S]_f = ([S]_f + 0,01 \cdot U_3 \cdot (S)_d / (1 + 0,01 \cdot U_3 \cdot L_a)) \dots (3,56).$$

Dans ce cas :

$$U_3 = 100 \cdot \Delta S[S] / [S]_f \cdot L_s - (S)_d \dots (3,57)$$

Le coefficient de partage du soufre obtenu grâce au traitement par laitier blanc lors de la coulée de l'acier, est égal, selon les données à :

$$L_s = (20 + 30) / (\% \text{FeO}).$$

La valeur minimale (20) est valable pour l'acier à bas carbone. Les valeurs supérieures à (30) sont valables pour les aciers à concentration moyennes en carbone.

Si on considère $[S]_f = 0,015\%$ avec $(S) = 0,05\%$, dans ce cas

$$L_s = 20 / 0,5 = 40 ;$$

En tenant compte du soufre apporté par les ferro-alliages. Dans ce cas

$$\Delta[S] = S_{fo} + S_{fa} - 0,015.$$

Le soufre apporté par les ferro-alliages :

Le soufre apporté par les ferro-alliages :

$$S_{fa} = 1,011. 0,03 / 100 + 0,813. 0,03 / 100 + 0,059. 0,03 / 100 + 1,463. 0,03 / 100 = 0,001 \text{ Kg.}$$

$$\text{Donc : } \Delta[S] = 0,045 + 0,001 - 0,015 = 0,031\%.$$

$$\text{Alors : } U_3 = (100. 0,031) / (0,015. 40 - 0,05) = 5,64\%.$$

Pour l'obtention d'un laitier blanc très fluide, la somme des oxydes basiques (CaO + MgO) ne doivent pas dépasser 65%. La somme des composants fluidisant (SiO₂ + Al₂O₃ + CaF₂) ne doivent pas être inférieur à 30%.

Les quantités de spath-fluor, de chamotte et de chaux, pour la formation du laitier cité, sont les suivantes :

La quantité de spath-fluor nécessaire pour la formation de laitier blanc fluide est généralement égale à 2,5 Kg/t (ou 0,25 Kg/100Kg). Cette quantité de spath-fluor, apporte :

$$0,25. 0,95 = 0,2375 \text{ Kg de CaF}_2.$$

Environ 40% de Ca F₂ réagit avec SiO₂ selon la réaction :



Ainsi la quantité de (SiO₂) qui réagit avec Ca F₂ est égale à :

$$0,2375. 0,4. 60 / 156 = 0,037 \text{ Kg.}$$

La quantité de CaO formée après réaction de CaF₂ avec SiO₂ est égale à :

$$0,2375. 0,4. 112 / 156 = 0,068 \text{ Kg.}$$

La quantité de CaF₂ restante dans le laitier est égale à :

$$0,068. 0,6 = 0,1425 \text{ Kg.}$$

Pour U₃ = 5,64 Kg/ 100 Kg, le pourcentage de CaF₂ dans le laitier est égale à :

$$0,1425. 100 / 5,64 = 2,53\%.$$

b- Pour déterminer la quantité de chaux exigée (Z_c), on considère que la concentration de CaO dans le laitier est de 53%. Pour 92% de CaO dans la chaux, en tenant compte de CaO formée après la réaction de CaF avec SiO₂, ainsi que CaO apportée par les restes du laitier de la période oxydante, (Z_c) peut être calculée d'après l'équation :

$$(CaO)_{CaF} + (CaO \text{ apporté par le laitier oxydant}) + 0,92. Z_c = 53. U_3/ 100 + 0,068 + (2,81. 5.48/100. 100) + 0,92. Z_c = 53. 5,64/ 100$$

D'où $Z_c = 3,102$ Kg.

c- La quantité de chamotte (X) est déterminée de telle façon à obtenir 20% de SiO₂ dans le laitier. En tenant compte de SiO₂ apporté par le laitier oxydant, par la chaux, par l'oxydation du ferro-silicium pour la désoxydation du métal et du laitier, de celle neutralisée par 40% de CaF₂, on calcule la quantité de déchets de chamotte nécessaire pour atteindre 20% de SiO₂ dans le laitier :

$$(SiO_2)_{\text{reste du laitier oxydant}} + (SiO_2)_{\text{Chaux}} + (SiO_2)_{\text{oxydation du Fe-Si}} + 0,62. X - (SiO_2)_{SiF_2} = 20. U_3/ 100 \dots (3,59)$$

Donc :

$$(2,81. 5. 20/ 10000) + (3,102. 2,5/ 100) + (50,714. 75. 60. 50/ 280000) + 0,62. X - 0,037 = 20. 5,64/ 100 ;$$

$$0,62. X = 0,4856 : \text{d'où} :$$

$$X = 0,78 \text{ Kg}$$

d- Pour vérifier l'influence de la composition chimique du laitier sur la fluidité de ce dernier, il est obligatoire de déterminer la concentration d'Al₂O₃ dans ce laitier.

L'oxyde de l'aluminium passe dans le laitier à partir de la chamotte, du spath-fluor et de la chaux. La poudre d'aluminium utilisée pour la désoxydation du laitier réducteur s'oxyde totalement et passe dans le laitier (0,05 Kg de poudre d'Al par 100 Kg). Une partie de l'aluminium en morceaux (0,06 Kg/ 100 Kg) est utilisée pour la désoxydation finale. La concentration résiduelle de l'aluminium dans un acier calmé est généralement de 0,02 à 0,03%. Ainsi la quantité de Al₂O₃ dans le laitier est égale à :

$$Al_2O_{3(\text{chamotte})} + Al_2O_{3(\text{spath-fluor})} + Al_2O_{3(\text{chaux})} + (0,05 + 0,06 - 0,03). 102/ 54 : \dots (3,60)$$

Il est égale à :

$$0,78. 35/ 100 + 0,25. 0,2/ 100 + 3,102. 1/ 100 + 0,15 ;$$

Elle est égale à : 0,455 Kg.

Le pourcentage de Al₂O₃ dans le laitier (U_3) est de :

$$0,455. 100/ 5,64 = 8,1\%.$$

La somme des composants fluidisant est de :

$$\% (SiO_2) + \% (Al_2O_3) + \% (CaF_2) > 30\% \dots (3,61)$$

$$20 + 8,1 + 2,53 = 30,63\%.$$

On procède à la vérification et à la précision de la quantité de désoxydants pour l'obtention d'un acier calmé et d'un laitier bien désoxydé.

La quantité d'oxygène apportée par le métal de la période oxydante est égale à :

$$\begin{aligned} O_{f\acute{e}} (\text{fin d'\acute{e}bullition}) &= 0,003\% [C]_{f\acute{e}} + 0,00455 \dots \dots (3,62) \\ &= 0,003 / 0,195 + 0,00455 = 0,02 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Selon les données expérimentales, les restes du laitier oxydant apportent 0,03 + 0,15% d'oxygène (on prend 0,1%), les réfractaires détruits apportent environ 0,035 + 0,07% d'O₂, l'air jusqu'à 0,3%.

Pour simplifier les calculs, on peut supposer que l'oxygène dissout dans le métal est apporté par les réfractaires, est neutralisé par le silicium et l'aluminium utilisés pour la désoxydation, les poudres des désoxydations (coke, Fe-Si, Al) doivent neutraliser l'oxygène apporté par les restes du laitier par les réfractaires et par l'air :

1. La désoxydation préliminaire par précipitation se passe en utilisant du ferro-silicium (75% de Si) de telle façon à avoir 0,15% de silicium. Le rendement du silicium étant de 50%, la quantité de silicium oxydée est égale à $99,12 \cdot 0,15 / 100$. 100 elle est égale à 0,074 Kg. En ce qui concerne la désoxydation finale, on additionne 0,6 Kg/t d'aluminium.

Puisque sa concentration résiduelle doit être égale à 0,03% la quantité qui s'oxyde est égale à : $0,06 - 0,03 = 0,03 \text{ Kg}$.

Dans ce cas, le silicium et l'aluminium utilisés pour la désoxydation neutralisent :

$$0,074 \cdot 32 / 28 + 0,03 \cdot 48 / 54 = 0,11 \text{ Kg d'oxygène.}$$

Comme nous le remarquons, même en prenant en considération le fait que l'apport de l'oxygène (par le métal de la période oxydante et par les réfractaires) peut être sensiblement important, les quantités additionnées de silicium et d'aluminium pour la désoxydation sont plus que suffisantes pour la neutralisation de cet oxygène

2. Pour la désoxydation par diffusion, on utilise :

$$0,715 - 99,13 \cdot 0,15 / 100 \cdot 75 = 0,515 \text{ Kg.}$$

Pour un rendement de silicium de 50%, on a :

$$0,515 \cdot 75 \cdot 50 / 100 \cdot 100 = 0,193 \text{ Kg (du silicium oxydé)}$$

Cette quantité de silicium est 0,05 Kg/ 100 Kg de poudre d'Al neutralisent :

$$0,193 \cdot 32 / 28 + 0,05 \cdot 45 / 54 = 0,265 \text{ Kg, (}\%) \text{ d'oxygène apporté par les restes du laitier oxydant par les réfractaires et par l'air.}$$

La quantité de cet oxygène est de :

$$0,1 + 0,07 + 0,3 = 0,47\%$$

3. Pour neutraliser : $0,47 - 0,265 = 0,205 \text{ Kg d'oxygène}$, on utilise de la poudre de coke (à 80% de carbone) de telle façon que 20% du carbone du coke soient assimilés par le métal :

$$0,205 \cdot 12 \cdot 1000 / 16 \cdot 80 \cdot 80 = 0,240 \text{ Kg,}$$

Ce qui correspond à l'addition habituelle du coke lors du traitement sous laitier blanc (2 + 3 Kg/t).

4. Considèrent que la quantité de poudre de coke utilisée pour le traitement du laitier est égale à : 3 Kg/t. La quantité de coke pour carburer le métal est égale à : $0,3 \cdot 20 / 100 = 0,06 \text{ Kg}$. La quantité de carbone apportée par 0,06 Kg de coke est :

$$0,06 \cdot 80 / 100 = 0,048 \text{ Kg}$$

Apport et addition de la matière		C		Si		Mn		P		S		Cr		V		Fe	
Quantité en	K	K	/	Kg	/	K	/	K	/	Kg	/	Kg	/	Kg	/	Kg	/
	g	g				g		g									
Métal de la période oxydante	95,788	0,187	0,195	-	-	0,144	0,15	0,0077	0,008	0,043	0,045	-	-	-	-	95,407	99,602
Fe-Mn (75%)	1,463	0,088	6	0,03	2	1,1	75	0,0044	0,30	0,0004	0,03	-	-	-	-	0,244	16,67
Fe-Cr (70%).	0,813	0,033	4	0,016	2	0,003	0,4	0,0004	0,05	0,0002	0,03	0,570	70	-	-	0,131	23,52
Fe-V (81%)	0,059	0,00002	0,02	0,0001	0,2	-	-	6.10 ⁻⁶	0,01	3.10 ⁻⁵	0,5	-	-	0,048	81	0,010	17,56
Fe-Si(75%) Désoxydant	0,714	0,0009	0,12	0,536	75	0,003	0,4	0,0003	0,04	0,00002	0,03	-	-	0,048	-	0,156	21,91
Fe-Si(75%) Mise à la nuance	0,297	0,00036	0,12	0,223	75	0,01	0,4	0,0001	0,04	0,00009	0,03	-	-	-	-	0,065	21,91
Passé du métal dans le laitier	-	-	-	0,525	-	-	-	-	-	0,0299	-	-	-	-	-	-	-
Passé du laitier sans le métal	0,35	0,047	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total en Kg	-	0,35	-	0,28	-	1,21	-	0,01	-	0,01	-	0,57	-	0,04	-	96,0	-
Total en %	-	0,35	-	0,28	-	1,27	-	0,013	-	-	0,014	-	0,58	-	0,046	-	97,44
																	100

Chapitre V. Défauts de soufflures - Partie pratique

V.1. Hypothèse

A l'origine les déchirures d'acier proviennent :

- Des inclusions non métalliques
- Des criques de métal
- Des tapures
- Des soufflures.

Si on considère que les trois causes premières ne sont pas les causes principaux d'apparition de ce défaut puisque :

1. a. les inclusions endogènes

Ou exactement l'alumine, oui il provoque fortement la déchirure à cause de sa forme aléatoire aigue. Mais d'après l'analyse de la composition chimique du métal et du laitier et d'après les quantités ajoutées, c'est non car la quantité est insuffisante

b. les inclusions exogènes dépendent de l'outillage :

Provenant des briques réfractaires

➤ Maitrisé : par :

- Briques doivent être résistant à l'érosion.
- Bien souffler les canaux de plaque
- Respect de tableau de température

➤ et réparable ;

2. Criques

➤ Maitrisé par :

- Respect des températures de coulée
- Respect des vitesses de coulée

3. Tapures

➤ Maitrisé par :

- Respecter un temps de maintien de refroidissement en lingotière (refroidissement adéquat)

On pense que la cause dominante pour l'apparition de ce défaut est :

Le mauvais calmage et la désoxydation du métal qui causera par la suite l'apparition de soufflure qui vont donner la naissance de déchirure de métal (semi-produit billette)

V.2. Présentation de défauts de soufflures

Description

Cavités gazeuses localisées en peau des billettes ayant pour origine un dégagement de CO, H₂ ou N₂ lors de la coulée.

Le terme soufflure est communément attribué aux défauts liés à un manque de calmage de l'acier et le terme piqure à une humidité excessive du matériel de coulée.



Figure 53: Défauts de soufflures

Nuances affectées

Le défaut de soufflures affecte généralement les aciers à bas carbone (**C < 0.15**)
Avec **Si < 0,15 < 0.30** insuffisamment calmées.

Caractéristiques géométriques moyennes du défaut de soufflures

Taille :

Lorsqu'à plusieurs millimètres de diamètre.

Profondeur :

Quelques centimètres sous la peau

Répartition :

Soufflures : répartition a priori aléatoire.

Piqure : préférentielle ment en pied de billette.

Localisation dans une section du produit :

Défauts de peau ou sous cutanés.

Fréquence d'apparition

Rare

Conditions d'apparition

Manque de calmage

Humidité excessive du matériel de coulée

Surchauffe très importante ;

Causes inhérentes à la coulée :

Oxydation du métal en cours de coulée (mauvaise protection du jet ou du ménisque)

Mauvaise qualité de l'huile de lubrification.

Mode de détection

- Au contrôle visuel sur les billettes froides

- Dans le cas des soufflures, les défauts ne sont pas forcément débouchant : la détection peut alors se faire lors de la coupe du billette avant sa mise en œuvre

- Au contrôle ultrasons après forgeage ou laminés (soufflures non refermées)

Réparation possible?

En fonction de l'importance des défauts, les zones touchées des billettes seront chutées, meulées ou mises en œuvre en l'état.

Si les défauts sont détectés après laminage ou forgeage : usinage supplémentaire ou rebut de la pièce

V.3. Problématique

Pour confirmer l'hypothèse présentée préalablement qui dit que les origines principales de défaut de déchirure d'acier d'origine élaboration (aciérie électrique) sont les soufflures puisque les autres causes de ces défauts sont de faibles proportions d'apparition ou bien sont réparable.

L'apparition des soufflures dans la billette au cours du stade de la coulée continue est principalement due à des déséquilibres dans l'étape d'affinage d'acier dans le four à poche, notamment :

- Déséquilibre entre le métal et le laitier dû à un mauvais passage d'oxygène
- Calmage insuffisant d'acier par le SiCa
- Proportions inexactes des ferro-alliages qui mène a une mise à la nuance erronée

Pour cela on va effectuer une étude basé sur 3 méthodes différentes afin de connaitre :

- Si le métal est bien désoxydé selon les règles et ce qu'il y a déséquilibre entre laitier et métal d'un point de vue oxygène si oui donc : il y'aura apport d'oxygène par le laitier, plus spécifiquement le mono oxyde de fer FeO.
- Influence du traitement avec le calcium SiCa dans le four à poche sur l'activité d'oxygène qui détermine à son tour l'apparition des soufflures ou pas.
- La mise à la nuance correcte de l'acier dans le four à poche pour éviter le mauvais calmage de l'acier qui conduit vers l'apparition des défauts de soufflures.

V.4.1. Equilibre d'oxygène entre métal et le laitier

1^{er} Méthode : Déterminer la concentration d'oxygène via un capteur à immersion

- Des aciers de qualité et spéciaux sont affinés grâce à un contrôle étroit des laitiers en tête de louche.
- La connaissance du potentiel d'oxydation des laitiers par rapport à l'état d'oxydation de l'acier liquide peut être utilisée pour améliorer la récupération de l'alliage, la désulfuration, la capture d'inclusions non métalliques et l'usure de la garniture.

Donc : Un capteur à immersion dans un liquide spécial mesure l'activité de l'oxygène du laitier sur la base des technologies des sondes à oxygène Celox : il permet de prédire **la teneur en FeO** en quelques secondes.

2^{eme} Méthode (méthode calcul) : La concentration d'oxygène en équilibre avec l'oxyde de fer FeO

L'apparition des défauts de soufflures est liée à l'apport d'oxygène par le laitier, plus spécifiquement le mono oxyde de fer FeO : il y'aura donc un déséquilibre entre le laitier et métal d'un point de vue oxygène.

Cette méthode permettra de déterminer la concentration d'oxygène dans l'équilibre.

Stade 1 : Détermination de l'activité de l'oxyde de fer dans le laitier

Si on considère que l'oxyde FeO pur, dans ce cas :

$$a_{(FeO)} = N_{FeO} \cdot f_{FeO}$$

Ou : N_{FeO} : Fraction molaire de FeO dans le laitier

- selon la loi de répartition L_0 (coefficient de partage de l'oxygène entre le laitier et le métal) peut déterminer selon l'équation :

$$\log L_0 = 6320/t + 2.734 \quad \text{à } 1600^\circ\text{C} (t^\circ = 1873\text{K}), L_0 = 0.23$$

la valeur réelle d'habitude déterminée selon [% O] dans le fer se trouve en équilibre dans le fer pur dans n'importe quel laitier, on peut déterminer $a_{(\text{FeO})}$ comme :

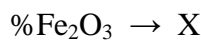
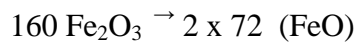
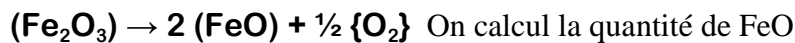
$$a_{(\text{FeO})} = (\% \text{FeO}) \cdot f_{\text{FeO}} = [\% \text{O}] / L_0$$

Stade 2 : Méthode de détermination de (% FeO) en fonction des concentrations des oxydes Fe_{total} et (Fe_2O_3) dans le laitier

- Fe_{Total} ou $\Sigma (\text{Fe}) = 0,778(\% \text{FeO}) + 0,700(\% \text{Fe}_2\text{O}_3)$

$$\text{D'où : } \% \text{Fe}_2\text{O}_3 = [\text{Fe}_{\text{total}} - 0,778(\% \text{FeO})] / 0,700$$

- Ensuite d'après la réaction :



- On ajoute à ce résultat celui de l'analyse et ainsi on obtient **la quantité totale de FeO**

Suite Stade 1 + Stade 2 :

Activité de FeO dans le laitier

1. Conversion du pourcentage massique au pourcentage molaire :

- Le nombre de mole : $n = m / M$ ou :

n : le nombre de mole (mole)

m : la masse de l'élément (gramme g)

M : la masse atomique (gramme/ mole)

- le pourcentage molaire :

$$\% X = (n_x / n_{\text{tot}}) \cdot 100 \quad \text{ou :}$$

X : l'élément (combinaison chimique : oxyde ou autre)

n_x / n_{tot} : la fraction molaire ou le nombre d'ions N.

2. Deux méthodes pour trouver l'activité de FeO :

2.1. Méthode géométrique :

On utilisant le diagramme d'équilibre ternaire :

$$(\% \text{CaO} + \% \text{MnO} + \% \text{MgO}) - (\% \text{SOi}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5) - (\% \text{FeO})$$

Cette méthode consiste à trouver l'intersection de trois lignes formés par la somme des :

- oxydes basiques : $\% \text{CaO} + \% \text{MnO} + \% \text{MgO}$
- oxydes acides : $\% \text{SOi}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5$ (plus que $\% \text{Al}_2\text{O}_3$)
- l'oxyde de fer FeO

Exemple de méthode géométrique :

Supposant la composition de laitier basique comme suit :

Oxyde	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃
% Molaire	36	21	15	9	16.85	0.15

La somme des oxydes basiques : %CaO + %MnO + %MgO = 60%

La somme des oxydes acides : %SiO₂ + %P₂O₅ + %Al₂O₃ = 38%

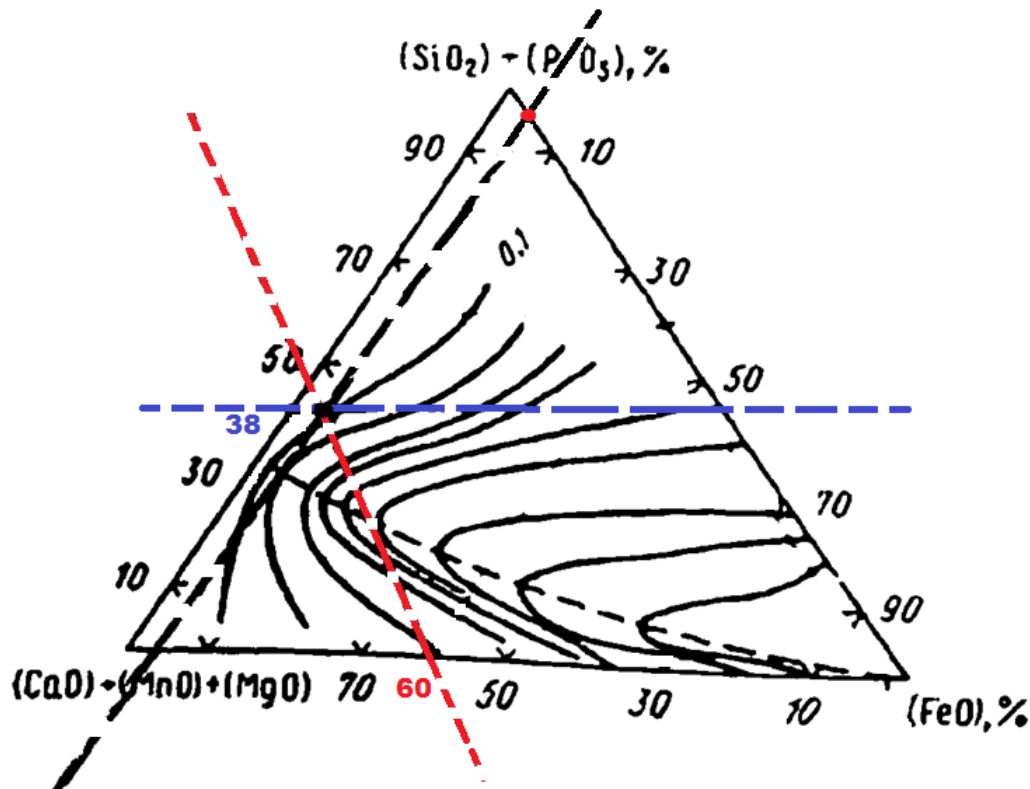


Figure 54: Diagramme d'équilibre ternaire (%CaO + %MnO + %MgO) - (%SiO₂ + %P₂O₅) - (%FeO)

On trace à partir des deux axes (%CaO + %MnO + %MgO) - (%SiO₂ + %P₂O₅) les lignes données par ces deux résultats,

La projection à partir du point d'intersection de ces deux lignes précédentes sur l'axe [FeO] qui présente la concentration d'oxyde de fer permet de trouver l'activité de FeO dans le laitier.

2.2. Méthode analytique :

On utilise la formule suivante :

$$a_{\text{FeO}} = N_{\text{Fe}^{2+}} \cdot N_{\text{O}} = \frac{n_{\text{FeO}} (n_{\text{FeO}} + n_{\text{MnO}} + n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}} - 2n_{\text{SiO}_2} - 3n_{\text{Al}_2\text{O}_3})}{(n_{\text{FeO}} + n_{\text{MnO}} + n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}}) (n_{\text{FeO}} + n_{\text{MnO}} + n_{\text{CaO}} + n_{\text{MgO}} - n_{\text{SiO}_2} - n_{\text{Al}_2\text{O}_3} + n_{\text{S}})}$$

Après l'obtention des résultats et les comparer ensemble, on calcul avec ces résultats la concentration d'oxygène en équilibre avec l'oxyde de fer FeO

Stade Finale: calcul de la concentration d'oxygène en équilibre avec FeO

D'après la réaction chimique :



Donc :

$$K = a_{\text{FeO}} / a_{\text{Fe}} \times a_{\text{O}}$$

$$K = N_{\text{FeO}} \times f_{\text{FeO}} / [\text{Fe}] \cdot f_{\text{Fe}} \times [\text{O}] \cdot f_{\text{O}}$$

$$\Rightarrow [\text{O}] = N_{\text{FeO}} \times f_{\text{FeO}} / [\text{Fe}] f_{\text{Fe}} \times f_{\text{O}} \times K$$

Et $\log K = -\Delta G / 2.3 R T$ (la température en kelvin)

3^{ème} Méthode : la concentration d'oxygène en équilibre avec le carbone ainsi que d'autres éléments désoxydants

Pour chaque une des nuances élaborée, une prise d'échantillon est faite avant et après ajout des éléments d'additions qui ont le rôle soit pour la désoxydation soit servent à la mise à la nuance de la composition correcte demandé.

Cette opération a pour rôle de connaître la composition chimique du bain ainsi que le déroulement des processus chimiques (réaction d'oxydoréduction) à l'intérieur du bain et donc aussi un moyen de traiter le métal pour éviter l'apparition de défauts (soufflures..).

A chaque addition on calcule le pourcentage d'oxygène d'équilibre avec, Dont le but de savoir le minimum d'oxygène résidu dans le métal. A condition que l'élément ajouté présente une affinité chimique à l'oxygène plus puissant que celui précédent.

Les réactions chimiques possibles :

- $[\text{C}] + [\text{O}] = \{\text{CO}\} \quad \Delta G_T^\circ = -22175 - 38.28T$
 $\text{Log } K_C = 11600/T + 2$
- $[\text{Mn}] + [\text{O}] = (\text{MnO}) \quad \text{Log } K_{\text{Mn}} = 14591/T - 6.045$
- $[\text{Si}] + 2[\text{O}] = (\text{SiO}_2) \quad \text{Log } K_{\text{Si}} = 48174/T - 21.63$
- $2[\text{Al}] + 3[\text{O}] = (\text{Al}_2\text{O}_3) \quad \text{Log } K_{\text{Si}} = 64900/T - 20.53$
- $[\text{Ca}] + [\text{O}] = (\text{CaO}) \quad \Delta G_T^\circ = -158660 + 45,91 \cdot T$
 $\text{lg } K_{\text{CaO}} = -34680/T + 10,035$

[O] en équilibre avec le carbone :



$$\text{Lg } K_C = \frac{P_{\text{CO}}}{a_{[\text{C}]} \cdot a_{[\text{O}]}} = \frac{P_{\text{CO}}}{[\text{C}] \cdot f_{\text{C}} \cdot [\text{O}] \cdot f_{\text{O}}} = -\text{Lg } [\text{C}] - \text{Lg } f_{\text{C}} - \text{Lg } [\text{O}] - \text{Lg } f_{\text{O}}$$

$$\text{Lg } K_C = \frac{-\Delta G_1}{2.3 \cdot RT}$$

Après avoir calculé Lg Kc :

$$\text{Lg } [\text{C}\%] + \text{Lg } f_{\text{C}} + \text{lg } K_C = -\text{Lg } [\text{O}\%] - \text{Lg } f_{\text{O}} \dots (1)$$

$$\text{Lg } f_{\text{C}} = e^{\text{C}}[\text{C}\%] + e^{\text{Mn}}[\text{Mn}\%] + e^{\text{Si}}[\text{Si}\%] + e^{\text{P}}[\text{P}\%] + e^{\text{S}}[\text{S}\%] + e^{\text{Cr}}[\text{Cr}\%] + e^{\text{Mo}}[\text{Mo}\%] + e^{\text{V}}[\text{V}\%] + e^{\text{Nb}}[\text{Nb}\%] + e^{\text{Al}}[\text{Al}\%] + e^{\text{Cu}}[\text{Cu}\%] + e^{\text{Sn}}[\text{Sn}\%] + e^{\text{Ni}}[\text{Ni}\%] + e^{\text{Ti}}[\text{Ti}\%] + e^{\text{O}}[\text{O}\%]$$

$$\mathbf{Lg f_o} = e^{O}[O\%] + e^{Mn}[Mn\%] + e^{Si}[Si\%] + e^p[P\%] + e^S[S\%] + e^{Cr}[Cr\%] + e^{Mo}[Mo\%] + e^V[V\%] + e^{Nb}[Nb\%] + e^{Al}[Al\%] + e^{Cu}[Cu\%] + e^{Sn}[Sn\%] + e^{Ni}[Ni\%] + e^{Ti}[Ti\%] + e^C [C\%]$$

Après le calcul de $Lg f_c$ et $Lg f_o$ en remplace dans l'équation (1)

Elle résulte une équation avec deux variantes [C%] et [O%]

On calcul la concentration d'oxygène en fonction du celle du carbone.

[O] en équilibre avec le silicium :

$$[Si] + 2 [O] = (SiO_2) \quad Lg K_{Si} = (31100/T) - 12$$

$$Lg K_{Si} = \frac{a_{SiO_2}}{a_{[Si]} * a_{[O]}^2} = \frac{a_{SiO_2}}{[Si] * f_{Si} * [O]^2 * f_{O^2}} = -Lg [Si] - Lg f_{Si} - 2Lg [O] - 2Lg f_o$$

$$Lg K_{Si} = \frac{-\Delta G_2}{2.3 * RT}$$

Après avoir calculé $Lg K_{Si}$:

$$\mathbf{Lg [Si\%] + Lg f_{Si} + Lg K_{Si} = -2 Lg [O\%] - 2 Lg f_o \dots (2)}$$

$$\mathbf{Lg f_{Si}} = e^c[C\%] + e^{Mn}[Mn\%] + e^{Si}[Si\%] + e^p[P\%] + e^S[S\%] + e^{Cr}[Cr\%] + e^{Mo}[Mo\%] + e^V[V\%] + e^{Nb}[Nb\%] + e^{Al}[Al\%] + e^{Cu}[Cu\%] + e^{Sn}[Sn\%] + e^{Ni}[Ni\%] + e^{Ti}[Ti\%] + e^O[O\%]$$

$$\mathbf{Lg f_o} = e^O[O\%] + e^{Mn}[Mn\%] + e^{Si}[Si\%] + e^p[P\%] + e^S[S\%] + e^{Cr}[Cr\%] + e^{Mo}[Mo\%] + e^V[V\%] + e^{Nb}[Nb\%] + e^{Al}[Al\%] + e^{Cu}[Cu\%] + e^{Sn}[Sn\%] + e^{Ni}[Ni\%] + e^{Ti}[Ti\%] + e^C [C\%]$$

Après le calcul de $Lg f_{Si}$ et $Lg f_o$ en remplace dans l'équation (2)

Elle résulte une équation avec deux variantes [Si %] et [O%]

On calcul la concentration d'oxygène en fonction du celle du Silicium.

[O] en équilibre avec l'aluminium :

$$2[Al] + 3[O] = (Al_2O_3) \quad Lg K_{Al} = (64900/T) - 20,63$$

$$Lg K_{Al} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_{[Al]}^2 * a_{[O]}^3} = \frac{a_{Al_2O_3}}{[Al]^2 * f_{Al} * [O]^3 * f_{O^2}} = -2 Lg [Al] - 2 Lg f_{Al} - 3 Lg [O] - 3 Lg f_o$$

$$Lg K_{Al} = \frac{-\Delta G_3}{2.3 * RT}$$

$$\mathbf{Après avoir calculé Lg K_{Si} : \quad Lg [Al\%] + Lg f_{Al} + Lg K_{Al} = -3 Lg [O\%] - 3 Lg f_o \dots (3)}$$

On calcule $Lg f_o$ et $Lg f_{Al}$ avec la même méthode de calcul de $Lg f_o$, $Lg f_{Si}$, $Lg f_c$ et l'on remplace dans l'équation (3) afin de trouver la concentration d'oxygène en fonction d'aluminium.

Résultat : Développer les résultats ci-dessus dans un graphe permet de définir la diminution des concentrations d'oxygène dans les équilibres O-Al-Si-C, n'importe quelle quantité d'oxygène négligée provoque sans doute une nouvelle oxydation du carbone et donc l'apparition des soufflures.

Equilibre Métal-laitier

Il est possible de distinguer trois phases durant cette période. Ces phases dépendent des réactions chimiques intervenant dans le bain métallique et, plus particulièrement, la décarburation, la

désiliciation et la déphosphoration. Nous présentons sur la Figure l'évolution de la teneur en carbone, silicium et phosphore dans l'acier au cours de désoxydation.

Le graphique suivant présente l'évolution des oxydes de fer contenus dans le laitier au cours de l'affinage.

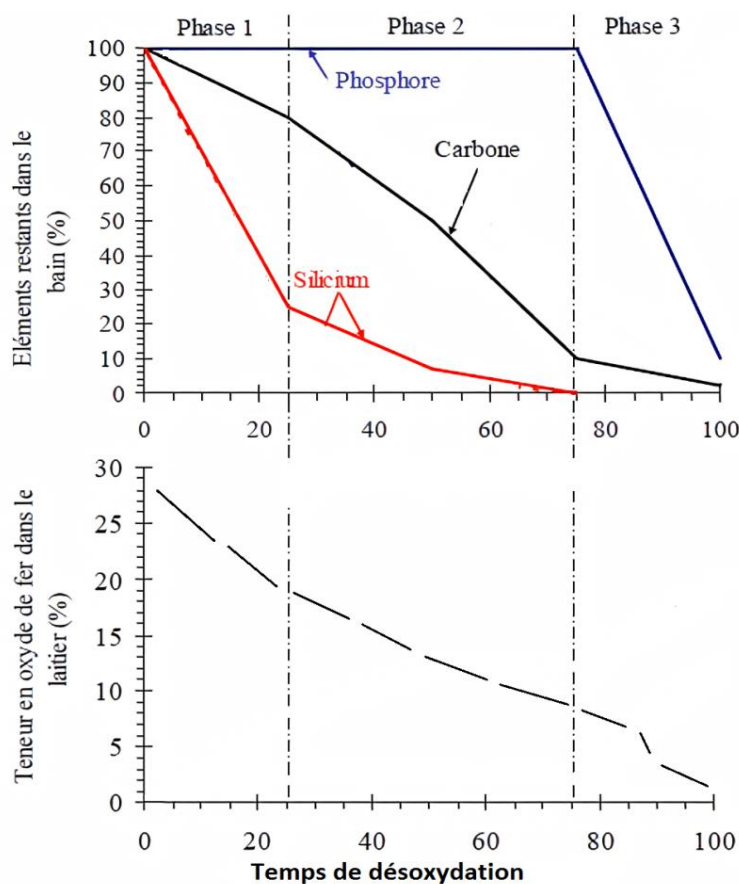


Figure 55: Evolution de la composition du métal et de la teneur en fer au cours de désoxydation

- 1^{er} phase : L'interaction bain métallique – laitier provoque la réaction d'oxygène contenu dans FeO avec le carbone, le fer et le silicium
Le carbone s'oxyde avec un dégagement de CO tandis que les globules de FeO se dispersent dans le bain métallique, la désoxydation du silicium est immédiate et précède même la décarburation et la désoxydation du fer car son affinité standard de formation est plus forte que celle du carbone et du fer.
La réaction désoxydation du silicium intervient avec les globules de FeO disséminés dans le laitier. Les oxydes de fer sont réduits par le silicium. $FeO + Si \rightarrow (SiO_2)_{(dissous\ dans\ des\ globules\ de\ FeO)} + Fe$
- 2^{ème} phase: la vitesse de décarburation atteint son maximum et reste constante lorsque la teneur en silicium devient inférieure à 10%. Toutefois les oxydes de fer FeO néoformés sont immédiatement réduits par le carbone de métal non désoxydé.
- 3^{ème} phase: la teneur en FeO diminue sensiblement car le laitier étant fortement décarburé, le CO gazeux est donc dégagée, plus la décarburation est poussée, plus la quantité de fer dissout dans le métal croit et en parallèle la quantité d'oxygène décroît du métal.

Conclusion : Le but d'atteindre un équilibre métal-laitier avec la minimum valeur d'oxygène est l'obtention d'un acier calmé (acier pauvre en O₂) de façon à éviter la formation de défaut (soufflures).

V.4.2. Influence du traitement avec le calcium SiCa sur l'apparition des défauts de souffres :

Comme mentionnée précédemment, les déchirures qui apparaîtraient sur le semi-produit acier (billette) à cause des souffres, sont d'origine élaboration (four à poche : Désoxydation)

Le bon traitement du bain de métal avec du calcium métallique présentée sous forme de SiCa permet d'avoir un acier calmé avec les moindres proportions d'inclusions et d'oxygène.

En atteignant cet objectif, la possibilité de création des défauts de souffres lors de la coulée de l'acier diminue.

Traitement avec Ca :

L'affinage par traitement au calcium signifie que le bain de métal est traité avec du calcium métallique, plusieurs formes de calcium peuvent être utilisées, par exemple Ca Si, Ca pur et CaFe

Le traitement au calcium vise en modifiant les particules solides d' Al_2O_3 en aluminates de calcium liquides sphériques dans la plupart des cas à :

- améliorer la coulabilité d'acier et optimiser la fluidité du laitier
- réduire le pourcentage d'oxygène dans le métal
- contrôler la composition et la morphologie des inclusions (oxydes ou sulfures)

Le traitement au Ca doit être la toute dernière opération d'affinage en poche, après laquelle l'acier doit être coulé. La puissance et le type d'agitation sont d'une importance décisive pour la propreté finale de l'acier.

➤ Amélioration de la coulabilité

La coulabilité est améliorée par la réaction entre les particules de Ca et d' Al_2O_3 dans l'acier (Les particules d' Al_2O_3 sont solides et à arêtes vives aux températures de production d'acier. Ils ont tendance à s'accumuler dans les buses du panier de coulée et à obstruer le flux d'acier)

Quelle que soit la forme de Ca utilisée, elle se vaporise immédiatement au contact de l'acier, car la pression de vapeur du Ca pur est de 1,92 atm à 1600° C, sa solubilité à 1600° C et à 1 atm n'est que de 300 ppm.

Par réaction avec le CaO formé, les particules d' Al_2O_3 formeront des particules liquides sphériques d'aluminate de Ca qui s'écouleront à travers les buses sans les obstruer.

La quantité de Ca injectée dans l'acier doit être telle que la composition de l'aluminate de calcium se situe approximativement dans la plage de $3(CaO)(Al_2O_3)$ à $(CaO)(Al_2O_3)$. Cela garantit que les aluminates formés sont liquides à la température de production de l'acier.

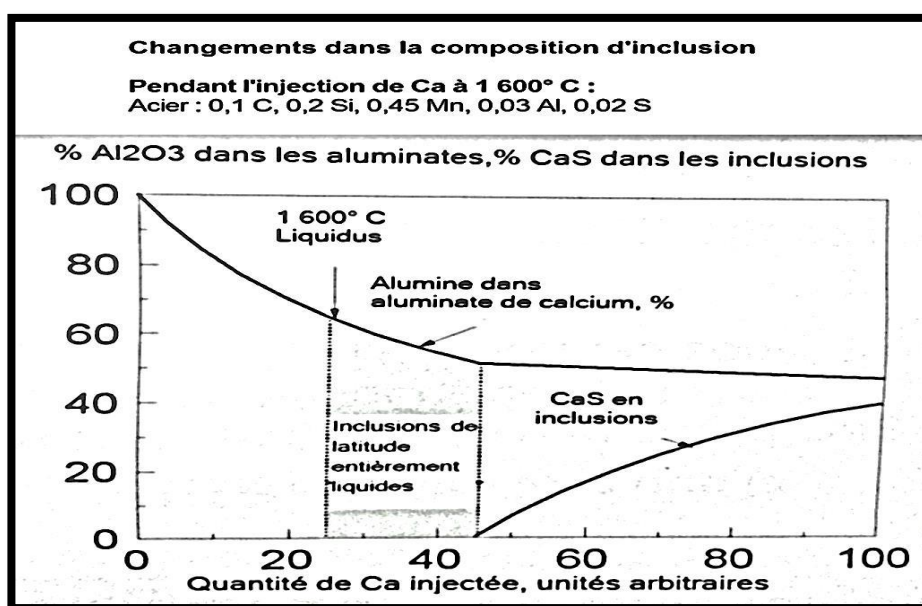


Figure 56: Changement de composition d'inclusion en fonction de Ca injectée

Discussion : Le graphique montre également que plus la teneur en alumine de l'acier est faible, moins il y a de problèmes de coulabilité.

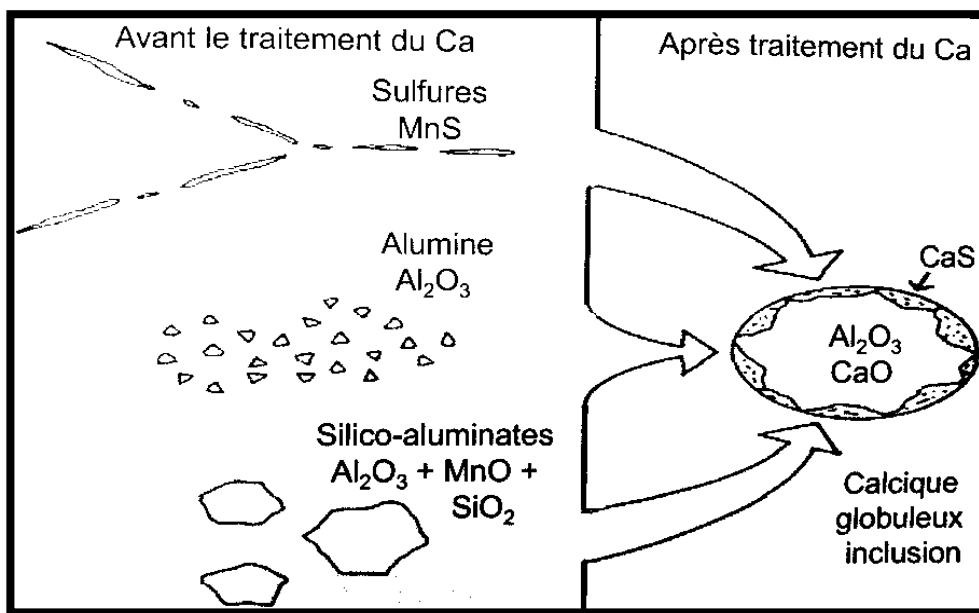


Figure 57: Modification des inclusions non métalliques par traitement de calcium

➤ Réduction de % d'oxygène dans le bain métallique

Comme le Ca a une forte affinité pour l'oxygène et le soufre, il peut (s'il est fourni en quantité suffisante) réagir et transformer tous les oxydes et sulfures présents dans le bain de métal. Les sulfures seront transformés en CaS et les autres oxydes seront transformés en CaO et dégageront du Mn, du Si, etc. dans le métal.

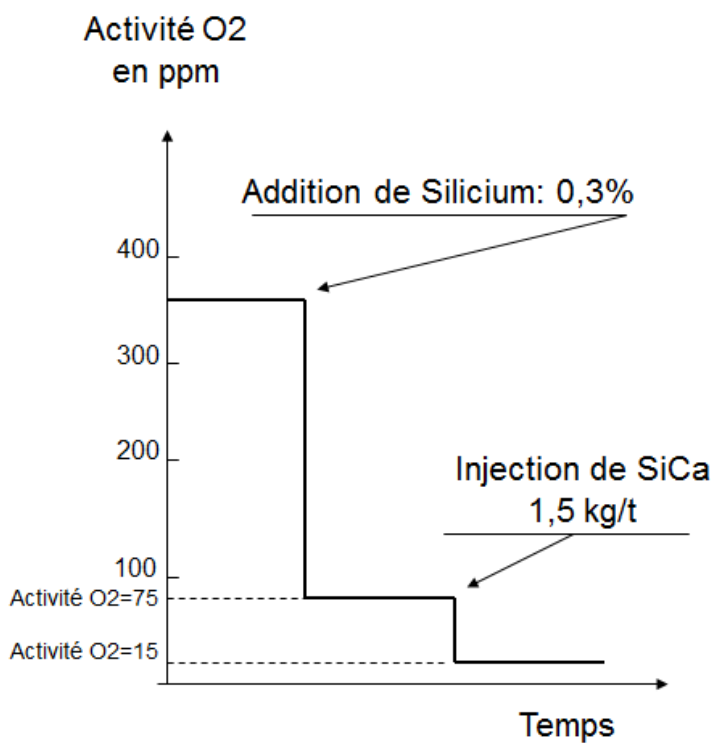


Figure 58: Activité d'oxygène dans le bain métallique lors du traitement en Ca

Un contrôle précis de l'addition de calcium au bain d'acier est nécessaire pour obtenir une globularisation des inclusions présentes dans le métal au moment du traitement tout en évitant certaines réactions secondaires comme par exemple la précipitation du CaS dans l'acier liquide

La Figure suivante s'agit du diagramme d'équilibre calculé pour le système Fe-Al-Ca-O-S à 1 600 °C, Obtenu par d'un modèle de calcul prévisionnel de la composition des inclusions, qui suppose l'équilibre thermodynamique entre le métal liquide et les inclusions oxydées et sulfurées à la température de traitement.

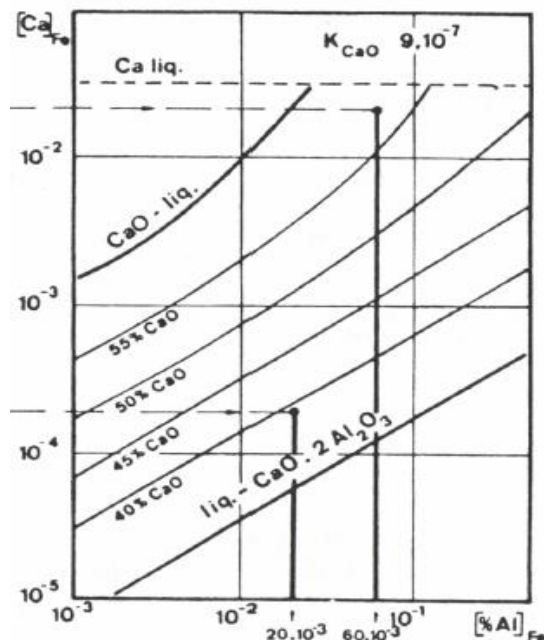


Figure 59: diagramme d'équilibre calculé pour le système Fe-Al-Ca-O-S

Sur le diagramme sont tracées les évolutions de la composition des inclusions oxydées en fonction des activités en aluminium et en calcium de l'acier. Lorsque, pour une teneur en Al déterminée, la teneur en Ca augmente, les amas solides d'alumine sont transformés d'abord en inclusions solides d'aluminates de chaux puis en inclusions liquides d'aluminates dont la teneur en chaux peut croître jusqu'à la saturation. Les inclusions de chaux pure dont la formation n'est possible que dans les aciers à faible teneur en Al ($A1 < 0,020 \%$) et très forte activité en Ca, ont peu de chance de se former dans les conditions industrielles.

Conclusion :

- L'évolution de la composition des inclusions oxydées contenu dans le laitier nous amène à la conclusion que le pourcentage d'oxygène a diminué au cours de traitement ce qui donne avantage aux défauts de soufflures de ne pas apparaître dans la prochaine étape.
- Les mêmes défauts s'affecte par le taux de la coulabilité d'acier liquide, la présence des alumines dans la composition finale d'acier provoque l'apparition de ces défauts.
- Les valeurs optimales obtenues du traitement avec le calcium métallique afin d'éviter ou minimise l'apparition des défauts sont comme suit :

La valeur d'oxygène $O_2 = 15$ ppm (une valeur relativement basse) définit le succès de processus de désoxydation

La valeur du Ca final (moyenne = 20 ppm) définit l'efficacité de la transformation des oxydes et sa qualité.

Si elle est inférieure à 18 ppm, cela signifie que le processus n'est pas sous contrôle et que les oxydes n'ont subi aucune transformation partielle, ni physico-chimique.

Si 20-25, cela signifie que le résultat final est optimal.

Si > 28-30 jusqu'à 40, nous sommes dans le domaine des aciers Ca, avec de gros problèmes.

Trop peu de Ca provoque une modification insuffisante et des inclusions solides.

Trop de Ca génère également des inclusions solides et est très agressif envers les réfractaires du panier de coulée.

La consommation de Ca pour la modification des inclusions de laitier est comprise entre 0,15 et 0,35 kg x tonne (exprimée en calcium pur).

En raison de sa pression de vapeur élevée et de sa solubilité très limitée dans l'acier, pratiquement tout le Ca contenu dans l'acier après traitement au Ca apparaît sous forme d'oxyde ou de sulfure.

Il ne reste aucune quantité importante de Ca dissous en tant que tampon pour modifier l'Al susceptible d'être réoxydé après un traitement complet au Ca.

V.4.3. Calcul correcte des additions des ferro-alliages (mise à la nuance d'acier)

Un calmage non-équilibré d'acier en ajoutant des ferro-alliages et du coke métallique par des quantités non convenables plus ou moins de la proportion nécessaire, provoque une mauvaise désoxydation du bain métallique qui conduit inévitablement à un déséquilibre des rapports d'oxygène dans l'atmosphère métal-laitier ; qui conduit à son tour au germination des bulles de gazes sur la surface des billettes lors de la coulée d'acier au stade la coulée continue , provoquant le défaut de soufflure.

Il nécessaire donc de bien gérer la quantité des ferro-alliages introduits dans le four à poche et de même pour les quantités de coke afin de réaliser une mise à nuance optimale (il faut aussi respecter le moment et l'ordre d'addition dans le cas où il y a plusieurs additions en même temps)

En bref mise à la nuance de l'acier est une opération très importante qui se fait en même temps que la désoxydation, elle consiste à additionner des Ferro- alliages afin de conférer des teneurs des éléments en fonction des caractéristiques mécaniques désirés.

Dans ce titre on présente la méthode correcte pour calculer les quantités optimales des ferro-alliages et du coke métallurgique et le rendement de chacun des deux pour une mise à nuance optimale sans défauts de désoxydation.

On commence d'abord par présenter les ferro-alliages utilisés dans cette étape et qui sont presque exclusivement utilisés comme additions finale dans la fabrication de l'acier, soit pour désoxyder et ajuster le bain (Fe-Mn, Fe-Si,...), soit pour introduire des éléments d'alliages (Fe-Ti..).

Ferromanganèse	On le prépare à partir d'un minerai (MnO_2 et/ou MnO), généralement suffisamment riche en fer. Le Ferro- manganèse carburé contient : 75 % de manganèse et 6.50 % de carbone. Le Ferro- manganèse affiné contient : 82 % de manganèse et 1.00 % de carbone. Un excès de silice dans la charge donne un Silico- Manganèse (20 - 30 % Si, 50- 70 % Mn), ou du Silice- Spiegel (10-20 % Si, 18 - 22 % Mn). Le manganèse améliore les caractéristiques de résistance de l'acier, notamment la résistance à la traction, la dureté. Le Ferro- manganèse est utilisé pratiquement pour toutes les nuances, il est indispensable pour les aciers destinés aux moteurs pour leur tenue en eau de mer ainsi que ' aux aciers spéciaux.
-----------------------	--

<u>Ferro-silicium</u>	<p>La charge du four comporte du quartz, des tournures de fer et du coke.</p> <p>Le Ferro- silicium améliore la résistance à la traction, la limite d'élasticité, la résistance électrique et la résistance magnétique.</p> <p>Il est utilisé pour les aciers à ressorts, aciers réfractaires.</p>
<u>Ferro-chrome</u>	<p>Il est préparé à partir de la chromite ou du fer chrome dont le constituant essentiel est Cr₂O₃.FeO</p> <p>Lorsque la teneur du chrome dans l'acier est < 3 % la dureté et le durcissement structurel ainsi que la tenue à l'abrasion de l'acier augmente, par contre à une teneur > 12 % la résistance à la corrosion augmente.</p> <p>Il est utilisé pour la fabrication des aciers inoxydables, aciers de construction mécanique, aciers réfractaires.</p>
<u>Ferro-molybdène</u>	<p>Même lorsqu'il est présent en quantité minime le molybdène à un effet préventif contre la fragilité due au revenu, le renforcement de la dureté à chaud et la résistance au fluage, ainsi que pour l'acier inoxydable, il sert à l'élévation de la résistance à la corrosion.</p> <p>Il est utilisé comme acier à construction, acier Cr- Mo, acier résistant à la corrosion, acier à coupe rapide, acier à outils, acier inoxydable.</p>
<u>Ferro-vanadium</u>	<p>Le vanadium améliore les caractéristiques mécaniques (résistance à la rupture, dureté à froid et à chaud).</p> <p>Il est utilisé comme addition aux aciers spéciaux.</p>
<u>Ferro-niobium</u>	<p>Le niobium fixe le carbone présent dans l'acier inoxydable .Un addition minime sert à améliorer : la résistance à la rupture, d'où la fabrication d'un acier à haute résistance, toute en améliorant la résistance au fluage des aciers réfractaires.</p> <p>Il est utilisé pour les aciers inoxydables et les aciers au carbone.</p>
<u>Ferro-titane</u>	<p>Il sert à éliminer l'azote car le titane possède une affinité chimique élevée pour l'azote et l'oxygène.</p> <p>Le titane augmente entre autre la ductilité et la résilience de l'acier et renforce la tenue à la corrosion.</p> <p>Il est utilisé pour les aciers inoxydables et les aciers à bas carbone.</p>
<u>Ferro-nickel</u>	<p>Le nickel est destiné à la production des aciers inoxydables et les aciers réfractaires, sur le plan des caractéristiques, il améliore la résistance à la traction, ajoute pour les nuances à bas carbone, il relève la valeur de la résilience à froid.</p> <p>Il est utilisé pour la fabrication des aciers de charpente (acier Ni-Cr, Ni-Cr-Mo), acier inoxydable, acier réfractaire, acier à outil, tôles fortes.</p>
<u>Aluminium</u>	<p>Le seul minerai d'aluminium est la bauxite dont le constituant essentiel est l'alumine hydratée et dont les principales impuretés sont la silice, l'oxyde de fer et l'oxyde de titane.</p> <p>L'alumine est à l'état de mono- hydrate Al₂O₃ 3H₂O .On distingue deux types de bauxites :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les bauxites rouges dont la teneur en oxydes de fer sont relativement élevées. - les bauxites blanches qui contiennent peu de fer mais beaucoup de silice.

Modes de calculs des ferro-alliages à enfourner

X_i : nature de l'élément dans le ferro-alliage

$X_{initial}$: teneur initiale de l'élément dans l'acier

X_{finale} : teneur finale de l'élément dans l'acier

Q_t = Quantité

Rendement : rendement du ferro-alliage en %

Teneur : pourcentage de l'élément dans le ferro-alliage.

Quantité de Ferro- X_i à enfourner :

$$Q_t \text{ Fe-}X_i = \frac{\{(\%) X_i \text{ initial} - (\%) X_i \text{ final}\} \times \text{Quantité acier versée}}{\text{Teneur} \times \text{Rendement} \times 100}$$

Rendement de X_i :

$$Q_t \text{ Fe-}X_i = \frac{\{(\%) X_i \text{ initial} - (\%) X_i \text{ final}\} \times \text{Quantité acier versée}}{\text{Teneur} \times Q_t \text{ à enfourner}} \times 100$$

Augmentation de X_i :

$$\{(\%) X_i \text{ init} - (\%) X_i \text{ fin}\} = \frac{\text{Teneur} \times Q_t \text{ à enfourner} \times \text{Rendement}}{\text{Quantité d'acier versée}} \times 100$$

Modes de calculs du coke à enfourner

Augmentation de coke: quantité de coke apportée par l'addition du Ferromanganèse carbure

Quantité de coke à enfourner

$Q_t \text{ .Coke} =$

$$\frac{\{(\%) [C] \text{ init} - (\%) [C] \text{ fin} - \text{Augmentation [C] par Fe-Mn Carb.}\} \times \text{Quantité d'acier versée}}{\text{Teneur} \times Q_t \text{ de coke enfourner} \times 100} \times 100$$

Rendement de coke :

$$\text{Rend. .Coke} = \frac{\{(\%) [C] \text{ init} - (\%) [C] \text{ fin}\} \times \text{Quantité d'acier versée}}{\text{Teneur} \times \text{Rendement} \times Q_t \text{ de coke enfourner}} \times 100$$

Modes de calculs de l'augmentation de carbone en cas d'enfournement du ferro-

Manganèse carburé :

Augment. De carbone=

$$\frac{Q_t \text{ de Fe-Mn à enfourner} \times \text{teneur en carbone [C]} \times \text{Rendement}}{Q_t \text{ acier versé}} \times 100$$

Conclusion Générale

A l'issue de cette étude, nous avons présenté les importants aspects métallurgiques du processus d'élaboration des semi-produits qui sont les billettes d'acier dans l'aciérie électrique, on mentionne :

- L'étape pré-fusion qui consiste à charger le four en matières premières, l'importance de cette étape se résume dans le choix de ces matières, qui détermine à leur tour :
 - Le rendement énergétique dans le four à arc
 - Qualité de l'acier à produire
 - Le mode de fonctionnement du four à arc
- L'avantage d'utilisation des bruleurs d'oxygène qui assure le minimum de ferraille non fondue.
- Garder une teneur ajustée en carbone lors d'oxydation produit une bonne interaction entre le métal et laitier et homogénéisation de la température.
- l'élimination du phosphore est l'une des réactions chimiques les plus importantes survenue lors de la fusion, influencée par la basicité du laitier.
- Le rapport $\text{CaO/FeO}=3$ présente la valeur optimale de partage de phosphore dans le laitier.
- les meilleurs résultats de désulfuration sont obtenus avec des laitiers justes saturés en CaO, très basiques.

D'un autre côté, nous avons étudié l'apparition des défauts de soufflures sur les billettes d'acier, et les principales conditions qui conduisent à son émergence, d'un point de vue oxygène.

On a conclu que :

- n'importe quel déséquilibre entre le métal et le laitier dans la période de désoxydation amène à une nouvelle oxydation du carbone, qui amène à son tour à l'apparition des défauts de soufflures.
- Le traitement par le calcium Ca joue un rôle décisif sur les proportions d'oxygène dans le bain métallique et moins l'oxygène est présent dans le bain, moins est la possibilité des formations des défauts de soufflures.

Références bibliographiques

- [1] Guy MURRY, Aciers. Généralités , Techniques de l'ingénieur, M 300 , 2000
- [2] J. Baralis, G. Maeder Précis de Métallurgie, (élaboration, structures- propriétés et normalisation), 5ème édition, Nathan, 1990.
- [3] P.J. Cunat Aciers inoxydables : Critères de choix et structure, Techniques de l'ingénieur, M 4540, 2000
- [4] BAIN (E.C.) et PAXTON (H.W.). – *Les éléments d'addition dans l'acier* (traduction par C. Leymonie). Dunod (1968).
- [5] B. Thomas, J.H.Schmitt.Durcissement des Aciers: Rôle de la microstructure, Techniques de l'ingénieur, M 4341, 2002.
- [6] C.W. kovach High performance stainless steel, Technical marketing resources, Inc, Pittsburg, PA, USA.
- [7] S.BENSAADA, ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS).
- [8] Phillip F. Ostwald, Jairo Muñoz, *Manufacturing Processes and Systems* (9^e éd.), John Wiley & Sons, 1997, p. 48.
- [9] Jean-Marcel MASSON , Élaboration de l'acier moulé - Fours de fusion, Techniques de l'ingénieur M3623 , 10 sept. 2005
- [10] Dr.-Ing. Egbert Baake , *Technical basics and applications of induction furnaces*, Germany
- [11] Stead Fast Engineers ,(November, 2015), wordpress: *TYPES OF INDUCTION FURNACE* [Article web]. Consulté le 12 juillet
<https://steadfastengineersinductionheatermanufacturers.wordpress.com/2015/11/25/types-of-induction-furnace/>
- [12] Jean-François BOURGEOIS et Alain Girault, Fours électriques à résistances - Présentation générale, technique de l'ingénieur D5910 , Février 2005
- [13] Résistance Furnace. (n.d.) *McGraw-Hill Dictionary of Scientific & Technical Terms*, 6E. (2003). Consulté le 13 juillet 2020 [encyclopedia2.thefreedictionary.com/Resistance+Furnace]
- [14] <http://metallurgymachine.fr> , Consulté le 15 juillet 2020
- [15] Maurice KRATZ, Fours à arc, technique de l'ingénieur, Février 1999
- [16] Ahindra Ghosh et Amit Chatterjee , *IRONMAKING AND STEELMAKING: Theory and Practice* , Septembre, 2008
- [17] Madias, J (2014) *Electric Furnace Steelmaking.*, Volume 3, Chapter 1.5, pp. 271-285. Elsevier Ltd..
- [18] World Steel Association, www.worldsteel.org 2015
- [19] J.A.T. Jones , *The making shaping and treating of steel* , 11th edition , the aise steel foundation, p 564-565, 1998
- [20] Algerian Qatari steel / Danieli Documents DPOGN914

- [21] P.A. Gonzalez Mier, in: AISTech 2011 Proceedings—vol. I, 2011, pp. 1063–1069.
- [22] P. Ayed, C. Ouvradou, J.Astier ; « Aciérie électrique » ; Techniques de l'ingénieur, M 7 700, Mars 2005
- [23] M. Piazza, F. Bianco, D. Patrizio, M. Ometto , La Metallurgia Italiana : EAF process optimization through a modular automation system , v : 9 , 2016
- [24] J.A.T. Jones , The making shaping and treating of steel , 11th edition , the aise steel foundation, Chapter 10, 1998
- [25] La Sidérurgie ; « Guide pour l'estimation des gaz à effet de serre produits par des systèmes de combustion et des procédés industriels ». Division des gaz à effet de serre Environnement Canada Mars 2004
- [26] D.H. Hubble, The making shaping and treating of steel , 11th edition , the aise steel foundation, Chapter 3, 1998
- [27] Hassan A.I, Kotelnikov G. I, Semin A. E, Megahed G. M , PHOSPHOROUS BEHAVIOR IN ELECTRIC ARC FURNACE STEELMAKING WITH THE MELTING OF HIGH PHOSPHOROUS CONTENT DIRECT REDUCED IRON , National University of Science and Technology (MISiS), Moscow, Russian Federation , 2015
- [28] NOUVEAUX PROCEDES TECHNIQUES DANS LA SIDERURGIE, Volume 3, Bruxelles, avril 1971
- [29] Joseph FARHI, Coulée continue de l'acier : Données physiques et métallurgiques, Techniques de l'ingénieur, M 7810, 10 juil. 1989.