République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليـــم العالـــي و البحـــث العلمـــي

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département De Génie Des Procédés

Mémoire de Fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Génie des Procédés

Option: Génie des Procédés des Matériaux

Thème

Contribution à l'étude de la dégradation des briques réfractaires basiques pour les fours à arc et à poche de l'industrie sidérurgique AQS, Bellara, El-Milia -Jijel

Réalisé par :

BOUHADJILA Alaaeddine

BOUDEGHDEGH Tawfiq

Encadré par :

Pr : BOUDEGHDEGH Kamel

Promotion 2020/2021

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليـــم العالـــي و البحـــث العلمـــي

UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département De Génie Des Procédés

Mémoire de Fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Génie des Procédés

Option: Génie des Procédés des Matériaux

Thème

Contribution à l'étude de la dégradation des briques réfractaires pour des fours de l'entreprise AQS, El-Milia

Réalisé par :

BOUHADJILA Alaaeddine

BOUDEGHDEGH Tawfiq

Encadré par :

Pr : BOUDEGHDEGH Kamel

Promotion 2020/2021

Dédicace

- A l'honorable et très chère mère SAFA qui me donne toujours l'espoir, pour ses encouragements pour son sacrifice.
- A celui qui me montre toujours comment surmonter les obstacles avec sagesse mon cher père AHMED.
- A mon frère ADEL et mes sœurs CHAHD, AICHA et FAYZA.
- A ma grande mère, notre bougie KHADOUJA. Et mon grand-père SADEK.
- A mon cher oncle ABDELHADI qui m'encourage à chaque fois que je perds l'espoir.
- A tous mes amis et mes collègues de Hyundai Engineering.
- A tous les scientifiques de mon pays.

Alaa

Dédicace

- A l'honorable et très chère mère AZIZA qui me donne toujours l'espoir, pour ses encouragements pour son sacrifice.
- A celui qui me montre toujours comment surmonter les obstacles avec sagesse mon cher père BOUBAKAR SEDIK.
- A mes frères MOUHAMED ESSIDIK, ABDELMOUMINE, DJABER, ISHAK et mes sœurs ROQIA et FATIMA ZOHRA.
- A tous mes amis et mes collègues de l'Algerian qatari steel (AQS).
- A tous les scientifiques de mon pays.

Tawfiq

Remercîments

***A**vant tout nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science.*

Nos remerciements vont à tous ceux qu'ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail en particulier

***Pr. BOUDEGHDEGH Kamel** pour avoir accepté de nous encadrer et de nous diriger qu'il trouve ici l'expression de nos profondes gratitudes.*

***O**n tient à remercie l'ensemble des membres de jury qui ont accepté de lire et juger notre travail plus particulièrement*

***A** ceux qui ont contribués pour la réalisation de ce travail*

MERCI A TOUS

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Présentation de la société Algerian Qatari Steel - AQS

Introduction générale : ……..1

Partie théorique

Chapitre I

Généralités sur les réfractaires

I.1 Historique : 3

I.2 Définitions : 3

I.3 Fonction assurée par les réfractaires : 4

I.4 Composition chimique et macroscopique : 4

I.4.1 Les agrégats : 5

I.4.2 La phase liante : 7

I.4.3 Les additifs : 8

I.5 Propriétés d'usage : 9

I.6 Technologie de fabrication des matériaux réfractaires : 9

I.7 Classification des matériaux réfractaires : 10

I.7.1 Classification suivant la nature chimique : 10

I.7.2 Classification suivant la masse spécifique et la compacité : 12

I.7.3 Classification selon le mode de fabrication et la présentation physique : 13

I.8 Domaine d'utilisation des matériaux réfractaires : 15

I.9 Causes principales d endommagements des réfractaires : 16

Chapitre II

Réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.R.F)

II.1 Réfractaires du four à arc (E.A.F) :.....17

II.1.1 Four à arc électrique : 17

II.1.2 Procédé de fusion par l'EAF : 18

II.1.3 Portée du projet d'AQS Bellara - Jijel :.....19

II.1.3.1 Géométrie du four à arc électrique (EAF) :.....19

II.1.3.2 L'énergie du système EAF :.....19

II.1.4 Le réfractaire de l'EAF :.....20

II.2 Réfractaires du four à poche (LRF) : 21

II.2.1 Procédé de fusion par LRF :.....21

II.2.2 Géométrie du four à poche (LRF) : 22

II.2.3 L'énergie du système LRF : 23

II.2.4 Le réfractaire de LRF : 23

Partie expérimentale

Chapitre III

Caractérisation des réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.R.F)

III.1. Observations d'échantillon de brique réfractaire usée 25

III.2. Synthèse sur la dégradation 25

III.2.1 Les dégradations d'origine thermomécanique.....26

III.2.2 Les dégradations d'origine chimique : 26

III.2.3 L'érosion et l'usure :.....27

III.3. Matériau du battage de paroi et du fond pour les applications EAF et LRF : 28

Chapitre IV

Méthodes d'analyse physico-chimiques

IV.1 Présentation de la méthode classique : 30

IV.1.1 Méthode gravimétrique : 31

IV.1.1.1 Principe : 31

IV.1.1.2 Echantillonnage et appareillage : 31

IV.1.1.3 Mode opératoire : 32

IV.1.2 Méthode titrimétrique : 38

IV.1.2.1 Principe : 38

IV.1.2.2 Échantillonnage et appareillage : 39

IV.1.2.3 Mode opératoire : 39

IV.2 Présentation des propriétés thermiques des briques réfractaires : 40

IV.2.1 Résistance aux chocs thermiques : 40

IV.2.2 Résistance mécaniques : 42

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1 Composition chimique des matériaux étudiés : 45

V.2 Effet de température sur la dégradation des briques réfractaires : 47

V.3 Résistance des briques réfractaires aux contraintes mécaniques : 49

Conclusion générale……..……..50

Références bibliographiques

Annexe

Liste des abréviations

AQS : Algerian Qatari Steel.

DRI : Direct Reduction Iron.

SMS : Steel Melt Shop.

RM : Rolling Mill.

MRSS : Main Receiving Sub Station

k**V:** Kilo volt

m**W:** Mega watt

LMP : Lime Plant.

ASU : Air Separation Unite.

WTP : Water Tretment Plant.

MHS: Material Handling system

EAF: Electrical Arc Furnace.

LRF: Ladle Refining Furnace.

VI : 6ème siècle

J.C : Jurassique

XVI : 16ème siècle

XVIII : 18ème siècle

XX : 20ème siècle

ASTM : American Society for Testing Materials.

ISO : International Standardisation Organisation.

CCM : Continus casting machine

MVA : Méga volt ampère

k**A :** Kilo ampère

ASEA : Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget Company

VAD : Detection d'activité vocale

BOF: Blast Oxygen Furnace

XRF : X-RAY Fluorescence

HF : Hydrofluoric Acid

P&R : Indicateur de patton et Reeder

BDS : Sodium diphynile amine sulfonate

PF : Perte au fou

Br : volume de burette.

TH : Total Hardness.

EBT : Eriochrome black T

EDTA : Ethylène diamine tétra acétique.

CaH : Calcium Hardness

WDXRF : Wavelenght Dispersive X-RAY fluorescence

CCS : Compression Crushing Strong

Liste des figures

Partie théorique

Chapitre I

Généralités sur les réfractaires

Figure I.1 : Description schématique de la texture macroscopique d'un matériau réfractaire…..……..……..……..…..…...05

Figure I.2 : Vue microscopique d'un matériau réfractaire (grossissement *50) ….....05

Figure I.3 : Les étapes générales de fabrication des réfractaires……..…….….....…..10

Figure I.4 : Photographie des briques isolante……..…….…….….……..12

Figure I.5 : Photo d'une brique de réfractaire dense……..……...…….…….12

Chapitre II

Réfractaires du four à arc (E.A.F)

et du four à poche (L.R.F)

Figure II.1 : Schéma général du processus d'obtention de l'acier.……..…….....…..17

Figure II.2 : Schéma du procédé de l'EAF …….……...…….....…18

Figure II.3 : Photographie d'EAF de l'aciérie 01 …….…….....….....19

Figure II.4 : Le profil réfractaire en déférentes sections (A-A) (B-B) (C-C)….....….....20

Figure II.5 : Profil du réfractaire du four EAF (vu A/A)….…….....……...20

Figure II.6 : Réfractaire de sole et de côté d'EAF….…….…...……....21

Figure II.7 : Profil du réfractaire du four LRF (vu A/A)…….……...…..…....23

Figure II.8 : Profil du réfractaire du four LRF (vu B/B)……...…...…....24

Figure II.9 : Réfractaire de sole et de côté d'LRF…..…..……..….....24

Partie expérimentale

Chapitre III

Caractérisation des réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.R.F)

Figure III.1: Photographie d'une brique réfractaire après utilisation ……..…....……..25

Figure III.2: Photographie du réfractaire endommagé chimiquement par réaction du laitier…….....……..27

Figure III.3 : Photographie présente l'usure du côté chaud..…….....…….28

Chapitre IV

Méthodes d'analyse physico-chimiques

Figure IV.1 : Section réfractaire au site SMS……...……...…….…… 30

Figure IV.2 : Laitier extracté au cours de fusion…….…….…….. 30

Figure IV.3 : Concasseur & broyeur……...……..…….…….. 31

Figure IV.4 : Balance analytique……..……... 32

Figure IV.5 : Solution mère…….……..……... 33

Figure IV.6 : Solution mère après filtration……....…… 33

Figure IV.7 : Four à moufle……...……33

Figure IV.8 : Dessiccateur……..……...……....33

Figure IV.9 : Plaque chauffante……...……...……..35

Figure IV.10 : pH mètre……...…....……36

Figure IV.11 : La solution après filtration……...……..37

Figure IV.12 : équipement de base du processus de titrage…….....……38

Figure IV.13 : Tamis électrique……...……39

Figure IV.14 : Un morceau de brique réfractaire au cours du chauffage (en utilisant un four à moufle)…….…...……40

Figure IV.15 : Photographie lorsqu'on plonge l'échantillon dans l'eau froide…....……..41

Figure IV.16 : Brique a l'état initial……...……..….41

Figure IV.17 : Cycle 01……...…….……41

Figure IV.18 : Cycle 05……...…….……41

Figure IV.19 : Cycle 10……...……..……41
Figure IV.20 : Cycle 15……...…….….……42
Figure IV.21 : Cycle 20……...…….….……42
Figure IV.22 : Procédure de l'essai d'écrasement…….….…...42
Figure IV.23 : Diagramme contrainte-écrasement…….…….…..43
Figure IV.24 : Machine d'écrasement forte (CCS)…….…..44

Chapitre V

Résultats et discussions

Figure V.1 : Histogramme d'évolution de la concentration des oxydes basiques……...……...…….46
Figure V.2 : Histogramme d'évolution de la concentration des oxydes acides…….….46
Figure V.3 : Variation de perte de masse des briques réfractaires LZD-9 sous l'effet de température…….…...….48
Figure V.4 : Variation de la résistance à la compresion de LZD-9 et EZD-3...……....49

Liste des tableaux

Partie théorique

Chapitre I

Généralités sur les réfractaires

Tableau I.1 : Liste des agrégats…..……..……..…….. 06

Tableau I.2 : Exemples de liants utilisés dans les réfractaires …….…... 07

Tableau I.3 : Quelques exemples d'additifs et de leurs propriétés associées……...…..... 08

Tableau I.4 : Classification générale des réfractaires ISO/R1109……....……..... 11

Tableau I.5 : Classification des produits réfractaire suivant le procédé de fabrication…... 15

Chapitre II

Réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.F)

Tableau II.1 : Géométrie d'EAF……...…….....…..……19

Tableau II.2 : L'énergie du système d'EAF……...……...…..……..19

Tableau II.3 : Géométrie de LRF ……..……22

Tableau II.4 : L'énergie du système de LRF……....……...…23

Partie expérimentale

Chapitre III

Caractérisation des réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.F)

Tableau III.1 : les caractéristiques des briques réfractaires utilisées pour le four à arc (EAF) et four à poche (LRF).…….....…….29

Chapitre V

Résultats et discussions

Tableau V.1 : L'évolution de la concentration des oxydes acides et les oxydes basiques (brique réfractaire / de laitier) de la section LRF…….....….45

Tableau V.2 : évolution de perte de masse des briques réfractaires sous l'effet de température……47

Partie théorique

Présentation de la société Algerian Qatari Steel - AQS

1 La Société Algerian Qatari Steel (AQS) :

1.1 Présentation de l'entreprise :

- La Société mixte « Algerian Qatari Steel (AQS) a été créée en décembre 2013 et dans le cadre d'un partenariat d'investissement entre la République Algérienne et l'État du Qatar. Dotée d'un capital de 58, 610, 000, 000 Dinars Algériens. Elle est détenue à 49% par Qatar Steel International, à 46% par le Groupe Industriel SIDER et à 05% par le Fonds National d'Investissement.
- L'AQS opère dans la zone industrielle de Bellara, dans la commune d'El-Milia, (wilaya de Jijel), située à 400 km de la capitale Alger, où elle exploite un Complexe sidérurgique d'une superficie totale de 216 hectares.
- Grâce à son volume de production, à sa fiabilité opérationnelle et à ses progrès techniques, l'Algerian Qatari Steel occupe une place importante dans la carte de l'industrie sidérurgique nationale et régionale.
- L'AQS accorde également une grande attention au capital humain, en tant que moteur de croissance économique et de progrès social, notamment à travers la création d'un environnement de travail, qui encourage la créativité et l'innovation au profit de ses 1500 employés de différentes disciplines et qualifications.

Figure 1 : Une vue aérienne du site.

- L'Algerian Qatari Steel contribue à la création de richesse et au soutien du tissu industriel national en répondant aux besoins du marché local du Fer et en exportant la production excédentaire sur les marchés régionaux et internationaux.
- Le Complexe sidérurgique de Bellara est doté de la technologie la plus avancée au monde et comprend neuf unités de production respectueuses de l'environnement, qui garantissent une efficacité maximale de la production et une qualité des produits conforme aux normes internationales.

1.2 Présentation et explication des différentes unités du complexe :

- **Quelques chiffres concernant le complexe :**

Le projet consiste en la construction d'une usine sidérurgique intégrale pour superficie globale de 216 hectares et une capacité de quatre millions de tonnes de produits sidérurgique en deux phases :

1.2.1 Phase 01 :

Avec une capacité de 2 millions de tonnes (1,5 million de tonnes de barres et 0,5 million de tonnes de fil machine), début prévu pour 2017.

1.2.1.1 Unités du processus sidérurgique :

- Une unité de Réduction Directe de 02 millions de tonnes de DRI à partir des pellets dont on retire l'oxygène en le brulant avec du gaz naturel.
- Une aciérie électrique et une machine de coulée continue pour la fabrication des billettes à transformer au niveau des laminoirs.
- Deux laminoirs à rond à béton et un de fil machine de capacité de 02 million de tonnes par an.

1.2.1.2 Unités auxiliaires1 :

- Une unité de production de chaux destinée au processus de fabrication de l'acier.
- Une unité de production d'eau industrielle à partir de l'eau brute.
- Unités de traitement des eaux usées (domestiques et industrielles).
- Des ateliers centraux de maintenance.
- Les magasins de stockage des pièces de rechange et consommables.
- Les locaux sociaux.
- Des faisceaux ferroviaires et axes routiers.
- Un poste de transformation et distribution électrique.
- Un poste principal de détente du gaz naturel.
- Une unité de production des gaz industriels (oxygène, azote, argon).

1.2.2 Phase 02 :

Avec une capacité de 2 millions de tonnes début prévu pour 2019.

A. Unités de procès :

- Une deuxième unité de réduction directe de (deux) 02 millions de tonnes de DRI par an.
- Une aciérie électrique de capacité de (deux) 02 millions de tonnes par an.
- Deux ou trois laminoirs pour une capacité de (deux) 02 millions de tonnes par an de produits sidérurgiques.

– A la fin de la deuxième phase le nombre des travailleurs prospectives est de :
  - ❖ 3.000 emplois directs.
  - ❖ 15.000 emplois indirects.

– Digue de protection et canal centrale (2m50 de profondeur) Pour protéger le site contre les inondations dues aux débordements de l'Oued El Kebir ou au ruissèlement des pluies, une digue de 4800 m a été construite le long de l'Oued suscité. Aussi des déviations des Oueds Adder et Mekrabel ont été réalisées.

– Le mur de terre (mur écologique) (3m) à implanter comme enceinte de la parcelle, pour atténuer l´impact acoustique a aussi la capacité de mitiger le risque d´inondation, notamment dans le côté sud, le plus vulnérable en raison de la configuration de la vallée et du site.

– L'écran acoustique (3m) pour protéger la région et l'entourage de l'usine a des effets sonores dangereux ou indésirables.

1.3 Unités de production de l'acier :

1.3.1 Unité de fer à réduction directe (DRI) :

Également appelé éponge, est fabriqué à partir de la réduction directe du minerai de fer (sous forme de grumeaux, de granulés ou de fines) en fer par un gaz réducteur ou un carbone élémentaire issu du gaz naturel ou du charbon.

Le fer réduit dérive du changement chimique que subit le minerai de fer lorsqu'il est chauffé dans un four à haute température en présence de gaz riches en hydrocarbures, de monoxyde de carbone ou de carbone élémentaire.

Figure 2 : Photographie d'unité de fer à réduction.

Figure 3 : Fer spongieux.

1.3.2 Usine de production d'acier avec 2 Aciéries électriques (SMS) :

La fabrication de l'acier est le processus de production d'acier à partir de minerai de fer et de ferraille. Dans la fabrication de l'acier, des impuretés telles que l'azote, le silicium, le phosphore, le soufre et l'excès de carbone sont éliminées du fer brut, et des éléments d'alliage tels que le manganèse, le nickel, le chrome et le vanadium sont ajoutés pour produire différentes nuances d'acier. Ce projet repose sur la technologie de l'acier au four à arc électrique (EAF) (1650°C), qui utilise de la ferraille et du fer à réduction directe (DRI) comme matière principale.

L'usine de production d'acier contenant également les unités auxiliaires suivantes :

- Station de traitement des fumées.
- Déchet de Ferraille.
- Station de traitement des eaux.

– Ferroalliage.

Figure 4 : Photographie d'EAF.

Figure 5 : Photographie de LRF.

1.3.3 Laminoir (RM) :

Le processus de laminage comprend le réchauffage de chaleur de billette (1050°C), les opérations de laminage et de formage. Dans cette plante, la taille, la forme et les propriétés métallurgiques des billettes métalliques sont modifiées par compression répétée de métal chaud entre des rouleaux entraînés électriquement.

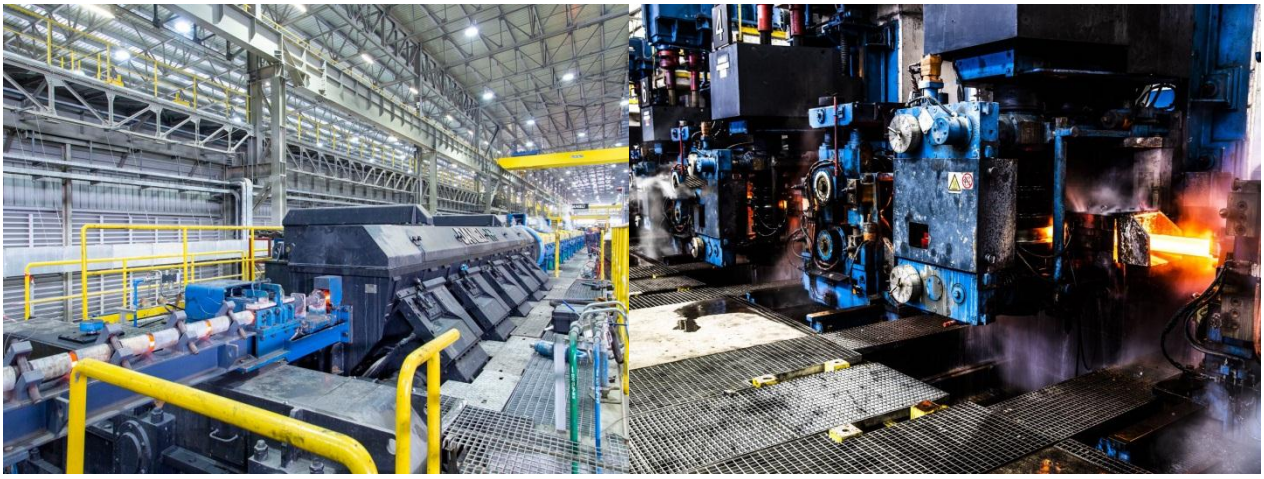


Figure 6 : Photographie de laminoir.

1.4 Usines auxiliaires :

1.4.1 Sous-station électrique (MRSS) :

Une sous-station fait partie d'un système de génération, de transmission et de distribution électrique. Les sous-stations transforment la tension du haut vers le bas, ou vers l'inverse, ou effectuent l'une des nombreuses autres fonctions importantes.

La sous-station du complexe d'acier de Bellara (poste 400KV) composée de : bâtiment de contrôle ; Construction de relais ; Transformateurs et salle diesel. Ce sera le chargeur de l'énergie électrique du complexe d'une capacité de 450 MW. Les équipements principaux de cette sous-station sont : Transformateur 400/33 KV et 33/6.6 KV.

Figure 7 : Une vue aérienne de Sous-station électrique.

1.4.2 Unité traitement de chaux (LMP) :

L'usine de production de chaux est utilisée pour produire à la fois la chaux rapide et la chaux dolomitique (dolomie) à partir des matières premières correspondantes en utilisant deux fours.

Les produits seront utilisés principalement pour la fabrication d'acier dans le SMS. Une petite partie sera utilisée pour le revêtement de pellets dans l'usine de DRI.

Figure 8 : Photographie d'Unité traitement de chaux.

1.4.3 Unité de séparation de l'air (ASU) :

Une installation de séparation d'air sépare l'air atmosphérique en ses composants primaires, typiquement l'azote et l'oxygène, et parfois aussi l'argon et d'autres gaz inertes rares.

Figure 9 : Photographie d'Unité de séparation de l'air.

1.4.4 Station générale de traitement des eaux (WTP) :

Le traitement de l'eau est un procédé qui rend l'eau plus acceptable pour une utilisation finale spécifique. L'utilisation finale peut être la consommation d'eau potable, l'approvisionnement en eau industrielle, l'irrigation, l'entretien des cours d'eau, les loisirs nautiques ou bien d'autres utilisations, y compris le retour en toute sécurité dans l'environnement.

Le traitement de l'eau supprime les contaminants et les composants indésirables, ou réduit leur concentration afin que l'eau soit adaptée à son utilisation finale souhaitée.

Figure 10 : Une vue aérienne de Station générale de traitement des eaux.

1.4.5 Système de manutention (MHS) :

La manipulation des matériaux et le chargement, le déplacement et le déchargement des matériaux. Pour le faire de manière sûre et économique, différents types d'attaques, de gadgets et d'équipements sont utilisés. L'importance première de la manipulation des matériaux est aidée la productivité et augmente ainsi la rentabilité d'une industrie. (3 430 000 tonnes / an).

Introduction Générale

Introduction générale

Les briques réfractaires sont des matériaux qui peuvent être utilisés de façon permanente à des hautes températures, tout en conservant leurs formes physiques et leurs compatibilités chimiques en fonction de la température. Elles se retrouvent dans de nombreuses industries telles que la métallurgie, la sidérurgie, l'industrie du verre et du ciment, en d'autres termes partout où il y a des fours à hautes températures et/ou des conditions sévères.

Les performances de ces produits passent obligatoirement par la connaissance et la maitrise de leurs propriétés physico-chimiques et thermomécaniques. Le choix du réfractaire doit donc prendre en compte les différentes sollicitations d'origine chimique, mécanique et thermique ainsi des considérations techniques économiques.

L'industrie réfractaire, par nécessité, a été développée en réponse aux demandes des industriels, en particulier à celles du secteur sidérurgique qui utilisent de l'ordre 70% des briques réfractaires pour le revêtement intérieur de leurs fours et poches.

Le four à arc est un l'outil de la fusion des ferrailles et l'éponge de fer provenant de la station de la réduction direct du fer (DRI). Le four à poche (LRF) est la section où se déroule l'ajustement de la nuance d'acier. La nature des briques réfractaires utilisées dépend de la zone du four, dans la zone où se trouve le métal et la zone où se trouve le laitier on utilise des briques à base de MgO.

Dans le travail présent, nous avons étudiéle phénomène de dégradation des briques réfractaires basiques (à base de MgO) utilisant des analyses physico-chimiques, mécaniques et thermiques. Sachant que ces briques sont utilisées pour le revêtement du four à arc électrique ainsi pour du four à poche. Donc l'objectif de cette étude est de maitriser le phénomène de dégradation des briques basiques à base de MgO ainsi les attaques chimiques influençant sur ces briques.

Pour atteindre l'objectif visé, nous avons structuré notre travail comme suit :

Dans la partie théorique, après une présentation sur le complexe de la société mixte Algerian Qatari Steel « AQS » et introduction générale, le premier chapitre donne un aperçu sur des généralités sur les matériaux réfractaires. Ensuite dans le second chapitre, on a donné des informations sur les réfractaires du fourà arcélectrique et du four à poche.

Dans la partie expérimentale, dans le troisième chapitre, on a montré des méthodes d'analyse ensuite une analyse visuelle sur les briques réfractaires avant et après l'utilisation.

Le quatrième chapitre présentera la préparation des échantillons selon la méthode classique et selon la méthode par XRF, ensuite une série des tests thermiques sur les briques réfractaires étudiées.

En ce qui concerne le cinquième chapitre, il consiste à interpréter les résultats obtenus. Finalement une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et présente des perspectives concernant les futurs travaux.

Chapitre I

Généralités sur les Réfractaires

I.1. Historique :

On estime que les humains savaient déjà cuisiner la terre en Mésopotamie vers le VIe siècle avant J.C. Il a remarqué que l'argile a une plasticité extrêmement élevée, elle a donc reçu une grande attention. En plus d'être facile à mettre en forme, elle présente également une certaine résistance au feu.

Par la suite, l'argile a été utilisée pour fabriquer les premiers ustensiles principalement utilisés pour chauffer les nourritures ou faire bouillir l'eau. Les briques d'argile moulées sont utilisées comme matériaux de construction pour les habitations, mais on ne sait pas comment et quand elles seront utilisées dans la confection des fours. Il s'avère que vers 1500 avant J.C, les humains l'ont utilisé dans des fours pour fabriquer du verre, du cuivre et de l'acier à partir de minéraux naturels.

Jusqu'au XVIe siècle, la température dans les fours utilisés n'était pas très élevée. Au début du XVIIIe siècle, avec la révolution industrielle, la demande de réfractaires à haute performance commence à augmenter. En raison des nouvelles exigences, il est nécessaire de développer de nouveaux matériaux réfractaires capables de répondre aux nouvelles exigences. [1]

Au XXe siècle, on a découvert comment augmenter le caractère réfractaire de l'argile en augmentant sa teneur en alumine, un facteur souligné par Bowen et Greig (1924). La période 1920-1930 a été riche en recherches scientifiques dans le domaine des réfractaires.

Le développement de la technique de diffraction des rayons X, peut mettre en évidence les différentes structures cristallines et les systèmes de base de l'argile (Al_2O_3-SiO_2, Fe_2O_3-Al_2O_3, MgO-Al_2O_3-SiO_2, FeO-Al_2O_3-SiO_2). [2]

Ces développements scientifiques ont donné naissance à de nouvelles variétés de matériaux réfractaires, qui servent à leur tour le développement de la science des matériaux et de l'ensemble de la technologie industrielle.

I.2. Définitions :

Le mot « réfractaire » vient du latin « refrāctārius », qui signifieêtu ou têtu. Dans le "English Dictionary" de Webster, les réfractaires sont définis comme des matériaux qui ne se déforment pas ou ne changent pas de manière significative à des températures élevées. Dans d'autres dictionnaires classiques, les matériaux réfractaires sont également définis comme des matériaux difficiles à utiliser et particulièrement résistants à la chaleur et à la pression. [3]

Selon la spécification ASTM C71, les matériaux réfractaires sont définis comme « des matériaux non métalliques avec des propriétés chimiques et physiques qui peuvent être utilisés dans des structures ou des composants de système ». De plus, selon la compréhension générale,

les matériaux réfractaires sont des matériaux inorganiques non métalliques, qui conviennent pour une utilisation dans des structures de four à des températures élevées. Bien que leur fonction principale soit de résister à des températures élevées sous de lourdes charges, ils doivent également résister à d'autres effets destructeurs pendant le traitement thermique, tels que la pression de frottement, les attaques chimiques et les changements rapides de température. En fait, les matériaux réfractaires sont des produits utilisés pour tout traitement à haute température, utilisés dans les systèmes d'isolation, introduisant des conditions de processus résistantes à la corrosion, et sont principalement constitués de minéraux non métalliques. Leur conception et leurs méthodes de traitement permettent de résister à la corrosion et à l'érosion à haute température des gaz chauds, des liquides et des solides dans divers types de fours et d'étuves. [3]

Les matériaux réfractaires doivent avoir une stabilité chimique et physique à des températures élevées. En fonction de l'environnement de fonctionnement, ils doivent être résistants aux chocs thermiques, chimiquement inertes et / ou avoir une plage spécifique de conductivité thermique et de coefficient de dilatation thermique. [4]

Bien que ces définitions déterminent correctement les caractéristiques de base des matériaux réfractaires, leur capacité à limiter les substances à des températures élevées, les matériaux réfractaires comprennent une large gamme de matériaux présentant les caractéristiques ci-dessus, ces matériaux à des périodes de temps différentes, et des conditions différentes degrés. Il existe de nombreuses compositions réfractaires de différentes tailles et formes, et elles ont été adaptées à diverses applications. Le point commun est que chaque fois qu'un matériau réfractaire est utilisé, il résiste à des températures élevées. [3]

I.3. Fonction assurée par les réfractaires :

Les grandes fonctions des matériaux réfractaires sont :

- Assurer la protection physique du personnel et des installations entre la matière chaude (le produit traité) et la carcasse extérieure de l’outil de traitement. Notons que la matière chaude peut se trouver sous toutes les formes habituelles : liquide, solide et gazeuse.
- Assurer le transfert de liquides chauds.
- Réduire les pertes thermiques.
- Jouer un rôle de récipient ou de conduite ; ils maintiennent à une température donnée des charges solides ou liquides, sans altérer la qualité.

I.4. Composition chimique et macroscopique :

Dans la plupart des cas, les réfractaires sont composés de trois phases macroscopiques différentes : les grains ou agrégats, la phase liante et la porosité. Pour les réfractaires isolants, la

porosité est plus élevée dans les applications d'isolation thermique (> 50%), alors que pour les réfractaires denses, la valeur de la porosité doit être réduite (de 10% à 20%) pour améliorer certaines propriétés et performances mécaniques contre la corrosion. La description schématique macroscopique et microscopique d'un matériau réfractaire sont représentées dans les figures Figure I.1 et Figure I.2 respectivement.

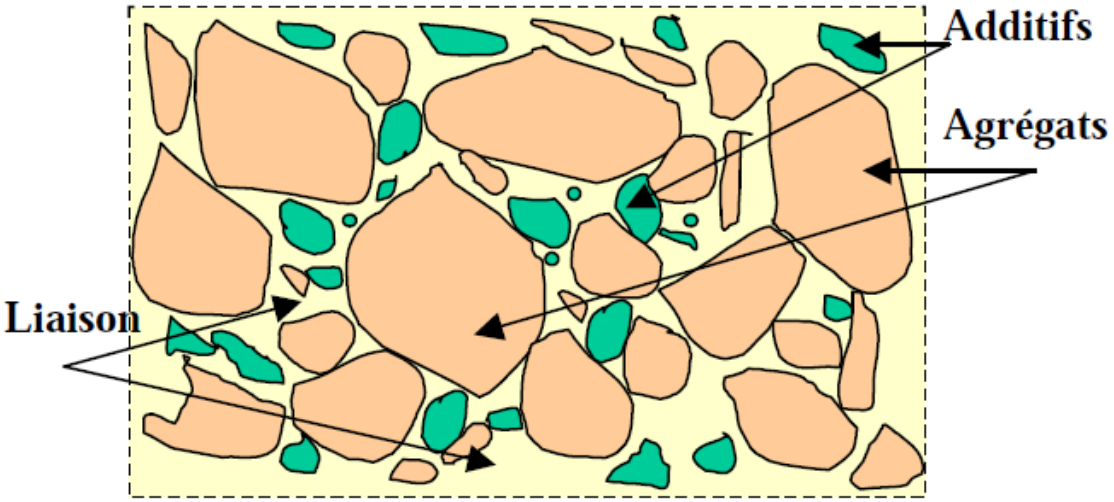


Figure I.1 : Description schématique de la texture macroscopique d'un matériau réfractaire. [5]

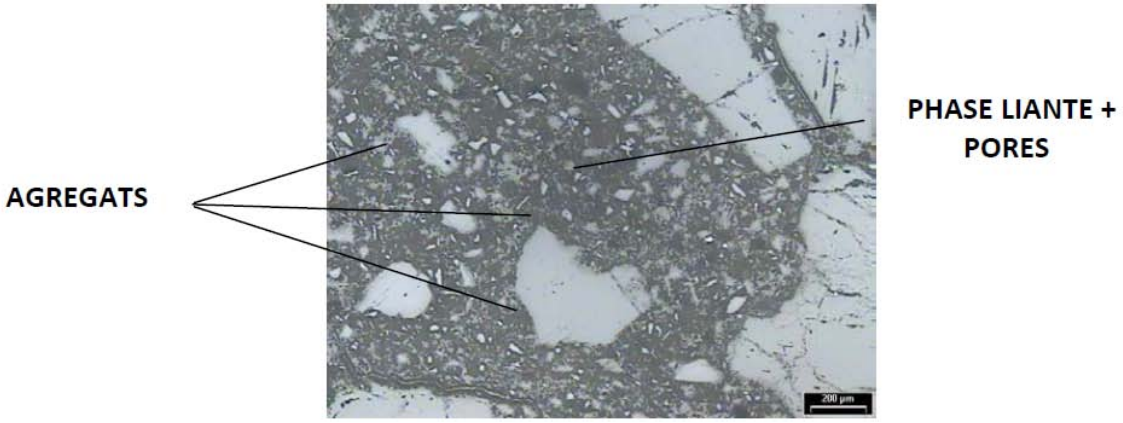


Figure I.2 : Vue microscopique d'un matériau réfractaire (grossissement *50). [6]

I.4.1. Les agrégats :

Les agrégats forment le squelette de matériaux hétérogènes et confèrent au produit final de nombreuses caractéristiques. Les propriétés thermodynamiques et chimiques dépendent de la nature et de la proportion des grains cristallins. Généralement composés d'un ou plusieurs minéraux, essentiellement des oxydes sous forme cristalline, ces minéraux confèrent au produit final les principales caractéristiques (réfractarité et complémentarité). Ces minéraux représentent 70% à 100% de la composition du produit, occupent généralement toute la distribution granulométrique et occupent toujours la partie la plus grossière. [6]

En fonction de leur origine et de leur type de fabrication, on distingue :

- Les matières premières naturelles : En général, elles sont toujours traitées le plus souvent.
- Les matières premières synthétiques : Elles sont de grande pureté et peuvent être élaborées thermiquement transformées à partir de matières premières naturelles, ou elles peuvent être produites par des réactions physiques et chimiques en produits synthétiques.

Le tableau I.1 ci-dessous présente les principales matières premières utilisées pour la fabrication des produits réfractaires.

Tableau I.1 : Liste des agrégats. [6]

Groupe	Matières premières	Type
Système Silice – Alumine		
Alumine	Alumine tabulaire (frittée)	Synthétique
	Alumine calcinée	Synthétique
	Alumine électro-fondue blanche	Synthétique
	Alumine électro-fondue brune	Synthétique
	Bauxite réfractaire	Naturel
	Mullite frittée et électro-fondue	Synthétique
	Cyanite	Naturel
	Andalousite	Naturel
Silice-alumine	Chamottes d'argile	Naturel
	Argile	Naturel
	Argile réfractaires	Naturel
	Bentonites-pyrophylites	Naturel
	Perlite-vermiculite	Naturel
	Quartzites	Naturel
Silice	Silice vitreuse	Naturel
	Silice volatilisée	Synthétique
Systèmes basiques		
Magnésie	Magnésie électro-fondue	Synthétique
	Magnésie frittée terrestre	Synthétique
Forstérite	Olivine	Naturel
Dolomie	Dolomie frittée	Synthétique
Spinelle	Spinelle électro-fondue	Synthétique
	Spinelle frittée	Synthétique

Chrome	Chromite Co-clinker magnésie /chromite Oxyde de chrome vert	Naturel Synthétique Synthétique
Autres		
Carbone **Carbure** **Zirconium**	Graphite Noir de fumée Carbure de silicium Sable de zirconium Zircone dense Zircone/Mullite électro-fondue	Naturel Synthétique Synthétique Naturel Synthétique Synthétique

I.4.2. La phase liante :

La phase liante assure la cohésion du squelette des particules, et la composition chimique de la phase liante n'est pas très différente de la composition chimique de l'agrégat. Seul le niveau granulométrique permet de les distinguer, en effet, la phase liante est constituée de fines particules.

Cette cohésion est maintenue en permanence, car elle doit être efficace du froid à la température de travail et pendant toute la durée de vie du matériau. Certains matériaux ajoutés comme liants ne sont pas toujours réfractaires : généralement, ces matériaux sont ajoutés en petites quantités et représentent toujours une petite partie de la granulométrie du produit final.

Cela a évidemment du sens, car c'est la partie du matériau qui "recouvre" l'agrégat et les additifs pour maintenir le matériau ensemble. Il existe quatre systèmes de liaison :

- La liaison céramique.
- La liaison hydraulique.
- Les liaisons chimiques minérales.
- Les liaisons organiques.

Tableau I.2 : Exemples de liants utilisés dans les réfractaires.[7]

Nature de liaison	Céramique	Chimique inorganique	Chimique organique	Hydraulique
Liant	Argile Oxydes pulvérulents Mullite, Si_3N_4 SiAlON, AlN	Silicate de sodium Gel de silice Phosphate de sodium Sels de magnésie	Goudron Brai Dérivés de cellulose	Ciment alumineux

I.4.3. Les additifs :

La matrice est généralement le maillon le plus faible du matériau. La tendance actuelle est de valoriser les propriétés de la matrice en introduisant des poudres fines et des poudres ultra fines ou des poudres synthétiques ayant les caractéristiques suivantes :

- Une grande pureté.
- Une distribution granulométrique étroite.
- Un fort rapport (surface/volume) et une grande réactivité chimique.

On trouvera, au tableau I.3, quelques exemples non exhaustifs de propriétés apportées parles additifs.

Tableau I.3 : Quelques exemples d'additifs et de leurs propriétés associées. [6]

Additifs	Propriétés associées
Chromite, mullite frittée et électro fondue, spinelle	Augmentation de la réfractarité
Aluminium métal (aux températures moyennes) Silicium métal (aux températures élevées) associés avec du carbone	Augmentation de la résistance mécanique à chaud
Carbure de silicium Graphite (anti-mouillant) Oxyde de chrome Zircone Spinelle Porteurs de carbone : noir de fumée, brai, résine	Augmentation de la résistance à la corrosion
Carbure de silicium Alumine électro fondue	Augmentation de la résistance à l'abrasion et l'érosion
Mullite Graphite Silice vitreuse	Augmentation de la résistance aux chocs thermiques
Carbure de silicium Graphite	Augmentation de la conductivité thermique
Produits pyrolisables (création de porosité par ajouts divers)	Diminution de la conductivité thermique

Imprégnation par brai et goudron	Augmentation de la compacité et bouchage de la porosité
Argile (retrait) Cyanite, sable de quartz (gonflement)	Modification des dimensions à chaud
Argile, bentonite, produits organique divers (plastifiants) Produit organique divers (défloculants et fluidifiants)	Modification rhéologique

I.5. Propriétés d'usage :

Le but de la combinaison granulat / liant / composant additif est d'adapter les propriétés du matériau aux conditions d'utilisation.

- Un comportement réfractaire.
- Par conséquent, les produits réfractaires peuvent non seulement résister aux « hautes températures », mais également résister à d'autres corrosions :
  - La corrosion chimique.
  - L'érosion mécanique à chaud.
  - Les chocs thermiques.
  - Les sollicitations mécaniques.
- La dureté.
- La fragilité.
- Une faible conductivité thermique et électrique en général.

I.6. Technologie de fabrication des matériaux réfractaires :

Les produits réfractaires sont des matériaux à liaisons covalentes ioniques. Ces liaisons très fortes favorisent une réfractarité élevée, leur confèrent une dureté élevée et n'ont aucune ductilité à faible résistance (à basses températures). Ces propriétés leur interdisent d'être fabriquées par des méthodes conventionnelles telles que les métaux. Le moulage des matériaux réfractaires est principalement réalisé par la technologie de la céramique en poudre. Ces procédés visent à transformer des matières premières (sous forme de poudres et d'agrégats) en produits finis aux propriétés physiques, mécaniques et chimiques spécifiques. L'organigramme de la figure I.3 résume les étapes générales de la production de réfractaires.

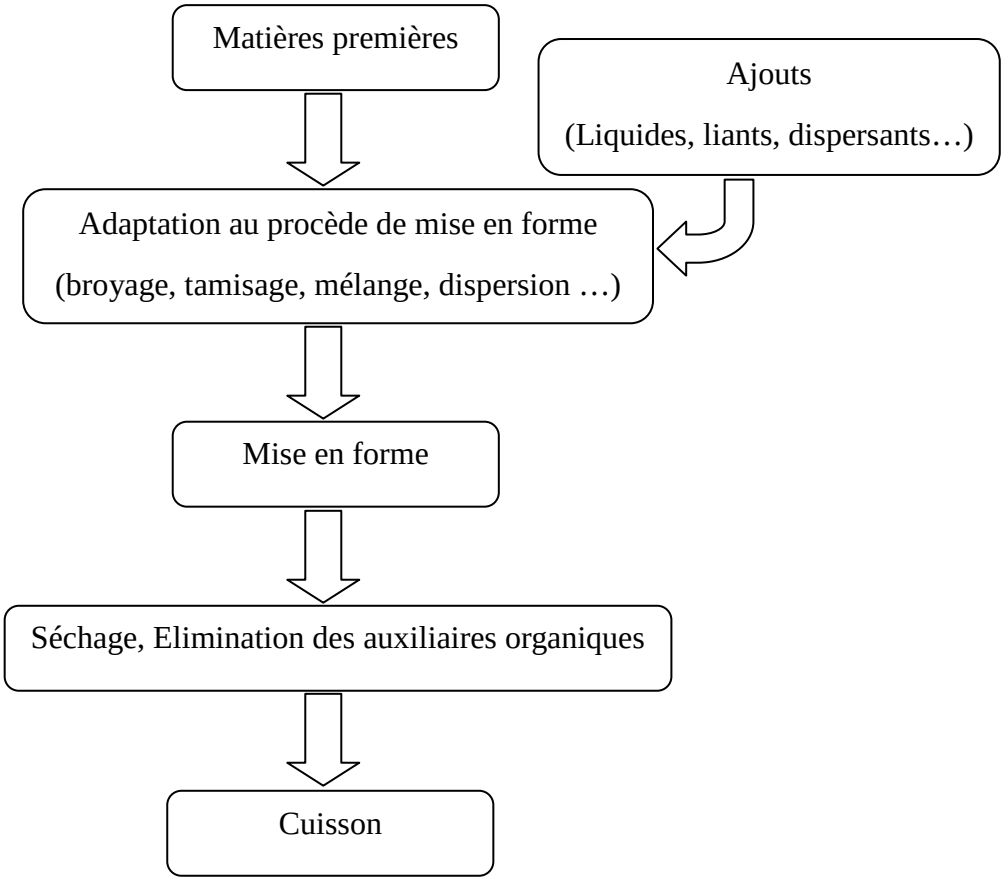


Figure I.3 : Les étapes générales de fabrication des réfractaires. [8]

I.7. Classification des matériaux réfractaires :

Les matériaux réfractaires peuvent être classés selon les différentes catégories suivantes :

I.7.1. Classification suivant la nature chimique :

Selon ISO/R1109, les céramiques réfractaires sont divisées en trois catégories en fonction de la teneur en composants principaux : [9], [10]

- Les réfractaires acides ou aluminosilicates : Alumineux, argileux, silico-argileux, siliceux et de silice.
- Les réfractaires basiques : Produits de magnésie, magnésie-chrome, foresterie, et de la dolomite.
- Les réfractaires spéciaux : A base de carbone, graphite, de zircone, de carbure de silicium, de nitrures tels que (Si_3N_4), de borures (B_4C).

Le tableau suivant illustre la classification générale des matériaux réfractaires selon ISO/R1109.

Tableau I.4 : Classification générale des réfractaires ISO/R1109.

Système	Désignation	Teneur en oxyde principal
Produits Silico-alumineux Al_2O_3-SiO_2	Extra-alumineux	Al_2O_3>56%
	Alumineux	45%< Al_2O_3 ≤56%
	Argileux	30%≤ Al_2O_3< 45%
		30%≤ Al_2O_3< 33%
		33%≤ Al_2O_3< 37%
		37%≤ Al_2O_3< 40%
		40%< Al_2O_3< 42%
		42%≤ Al_2O_3< 45%
	Silico-argileux	10%< Al_2O_3 ≤ 30% avec SiO_2<85%
	Siliceux	85% ≤ SiO_2<93%
	De silice	SiO_2 ≥93%
Produits Basiques	Magnésie	MgO ≥80%
	Magnésie –chrome Produits de dolomie	55%≤ MgO<80%
	Chrome-magnésie	25%≤ MgO<55%
	Chromite	Cr_2O_3 ≥25%
	Forstérite	MgO ≤ 25%
Produits spéciaux	Carbone, graphite, zircone, …	SiC

I.7.2. Classification suivant la masse spécifique et la compacité :

- Il y a une différence entre les produits denses et les produits légers (et donc isolés).
- Par définition, la porosité totale des produits isolants légers est supérieure à 45% (volume).

Figure I.4 : Photographie des briques isolantes.

Figure I.5 : Photo d'une brique de réfractaire dense.

I.7.3. Classification selon le mode de fabrication et la présentation physique :

Selon différentes méthodes ou procédés de fabrication, ils peuvent être divisés en quatre catégories :

I.7.3.1. Les réfractaires façonnés :

Ce sont les plus connus. Ils sont surtout faits de briques et sont souvent cuits. C'est le cas des briques de silice alumine ou de silice, mais ils ne sont pas non plus cuits et ne passent chimiquement qu'à basse température (150 ° C à 800 ° C Méthode de collage par agglomération et traitement thermique, c'est le cas des briques de magnésie. Leur porosité totale (ouverte et fermée) doit être inférieure à 45%.

La mise en forme a lieu :

- Moulage sur pâte plastique (la porosité totale du produit est de 18% à 35%).
- Pressage à sec du mélange de poudre (porosité 12% à 25%).
- Ou dans certains cas, par coulage en « barbotine » dans un moule en plâtre mobile.

Les produits comprimés secs ont une plus petite porosité, des dimensions plus précises et une meilleure résistance aux chocs thermiques.

I.7.3.2. Les réfractaires non façonnés (monolithiques) :

De nos jours, de plus en plus d'applications industrielles nécessitent des matériaux amorphes appelés monolithes.

Le terme « monolithique » comprend tous les matériaux qui n'ont pas été formés avant leur application ou leur utilisation. D'un point de vue historique, il a été rapporté dans la bibliographie que H.S-C Deville (1856) a mis en œuvre le premier matériau réfractaire monolithique (un creuset avec des granulats et du ciment d'aluminium). Vers 1929, les États-Unis ont commencé la production de béton réfractaire à l'échelle industrielle, et son utilisation n'a cessé de se développer depuis lors.

La raison de cette expansion est que ce matériau présente les avantages suivants par rapport aux réfractaires façonnés :

- Le processus de fabrication est très court et donc économique car il évite le façonnage et la cuisson préalable.
- Afin d'obtenir une meilleure efficacité thermique et une meilleure efficacité de fonctionnement, on utilise généralement des fours de forme large et complexe. Parfois, l'utilisation de réfractaires façonnés est faisable, mais elle nécessite un travail méticuleux et qualifié et une grande quantité de travail.

- Dans les réfractaires façonnés, en raison de contraintes thermiques ou thermomécaniques, les joints entre différentes briques constituent le point de départ de la rupture, ce qui n'est pas le cas pour une structure globale continue et uniforme.
- La réparation et l'entretien des réfractaires monolithiques sont relativement rapides et faciles.

I.7.3.3. Réfractaires électro-fondus :

Ces réfractaires sont obtenus en faisant fondre un mélange réfractaire d'oxydes dans un four à arc électrique (1800°C-2400°C) puis en versant le mélange dans un moule en graphite. Afin d'éliminer la tension superficielle, il doit être recuit entre 900°C-1000°C. Ces réfractaires présentent les avantages et les inconvénients suivants : [9], [10]

- Stabilité dimensionnelle à hautes températures (1500°C-1600°C).
- La porosité est inférieure ou égale à 3%.
- Bonne résistance mécanique.
- Excellente résistance à la corrosion.
- Une faible résistance aux chocs thermiques.

Les principaux produits électro-fondus sont : Les produits de mullite, les produits d'alumine et les produits de chrome magnésie…

I.7.3.4. Les matériaux réfractaires isolants façonnés rigides :

Les produits réfractaires isolants durs sont poreux et doivent être réfractaires (résistance à haute température supérieure à 1500°C), et leur porosité totale doit être d'au moins 45% du volume apparent, et parfois la porosité peut atteindre 85%.

Ils sont moulés ou façonnés par compression intense, et sont généralement agglomérés par cuisson. La porosité peut être obtenue par divers moyens. La plage de densité est de 1/6 à 1/2 des produits denses ayant les mêmes propriétés chimiques.

La conductivité thermique diminue dans une proportion similaire (au moins à basse température). Ces produits sont principalement constitués d'argile réfractaire (avec une densité allant de 0,4 à 1,2), mais sont également constitués d'alumine, de silice, etc…

Ces produits ont une faible résistance mécanique, une résistance aux chocs thermiques et une résistance chimique. Le tableau suivant classe les produits réfractaires selon le processus de fabrication.

Tableau I.5 : Classification des produits réfractaire suivant le procédé de fabrication. [11]

TYPES DE PRODUITS	EXEMPLES DE PRODUITS
Réfractaires façonnés	Briques crues Briques cuites Agglomérés
Réfractaires non façonnés	Ciments alumineux fondus Mortiers à prise céramique Mortiers à prise chimique Masses à pisé Enduits et mastics
Réfractaires électro-fondus	Briques d'alumine, silice, zircone, …
Réfractaires isolants	Briques poreux

I.8. Domaine d'utilisation des matériaux réfractaires :

L'utilisation de matériaux réfractaires dépend des conditions de travail ou des travaux qui nécessitent des performances adéquates.

Les principaux secteurs industriels utilisant des matériaux réfractaires sont :

- Industrie de Sidérurgie.
- Industrie de Métallurgie des non ferreux.
- Industrie de verrerie.
- Industrie du ciment et de la chaux.
- Industrie de Pétrochimie.
- Industrie de la chimie et Gazéification des Charbons.
- Fours Céramiques.
- Chaudières.
- Les réfractaires dans la technologie nucléaire.

I.9. Les modes principales de l'endommagement des réfractaires :

Durant leurs services les réfractaires sont principalement endommagés par :

- **Ecaillage** : L'écaillage est causé par des fissures parallèles au plan du matériau réfractaire. Elle est due à l'influence des cycles et des gradients thermiques, ou à la compression provoquée par la dilatation différente des différentes phases constitutives du réfractaire. [10] Cependant, la stabilité dimensionnelle et la résistance à l'écaillage sont les deux critères de

performance de la plupart des matériaux réfractaires. Pour résoudre ce problème, le réfractaire doit avoir :[10], [12]

- Un coefficient de dilatation thermique relativement faible.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une faible densité.
- Une bonne résistance thermomécanique.
- Une phase vitreuse réduite**.**

- **Corrosion :** La corrosion est l'usure de l'épaisseur et du volume des matériaux réfractaires. Elle est causée par la corrosion chimique ou la pénétration de fluides corrosifs dans les trous. Le couplage dégradation mécanique / corrosion comprend des mécanismes complexes d'endommagement réfractaire. Généralement, pour surmonter ce problème, les matériaux réfractaires doivent avoir un certain degré de compatibilité chimique. En d'autres termes, la phase de composition du matériau réfractaire ne réagit pas ou réagit très peu à une température relativement élevée. De même, une faible porosité réduira la perméabilité. [10]
- **Abrasion et érosion :** L'abrasion et l'érosion sont deux types de phénomènes d'abrasion à la surface des matériaux réfractaires, qui sont provoqués par l'abrasion ou l'impact de particules solides ou fluides qui entrent en contact avec lui pendant le mouvement. Pour rendre ces phénomènes résistants à l'usure, les matériaux réfractaires doivent avoir une très faible porosité, voire une porosité nulle, un module d'élasticité élevé, une bonne résistance à la corrosion, une bonne résistance mécanique et une dureté élevée. [12]

Chapitre II

Réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.R.F)

II.1. Réfractaires du four à arc (E.A.F) :

Pour transformer le minerai de fer en acier, il est nécessaire de passer par un four à arc ou la réduction direct du fer avec l'ajout de certains éléments chimiques (les additifs), cette opération nécessite des conditions bien précises et une puissance remarquable.

Cette méthode est plus efficace que celle de haut fourneau qui transforme le minerai en fonte tout d'abord puis passer par un convertisseur pour éliminer l'excès du carbone puisobtenir l'acier.

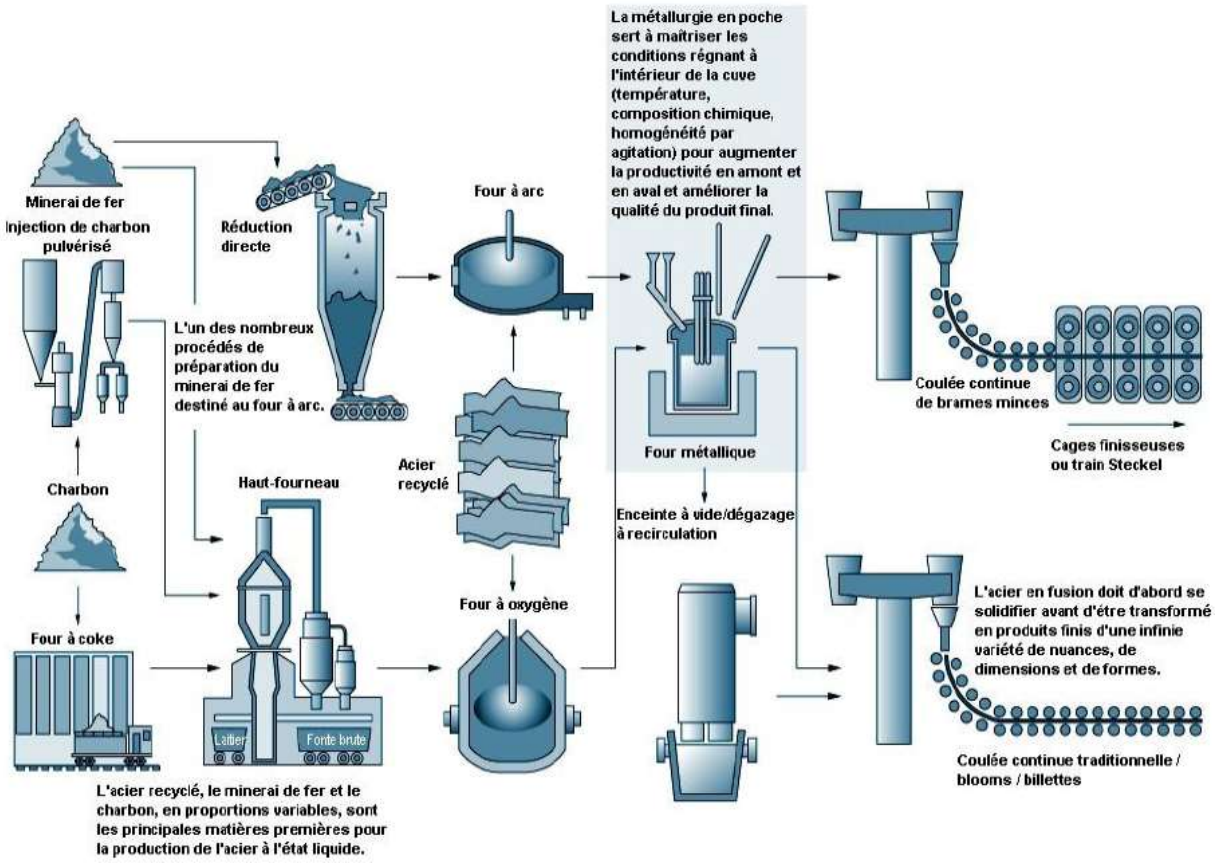


Figure II.1: Schéma général du processus d'obtention de l'acier.

II.1.1. Four à arc électrique :

Un four à arc électrique est utilisé dans la production d'acier pour fondre des ferrailles d'acier. Un arc électrique se forme entre la charge et les électrodes. La chaleur engendrée par l'arc fait fondre les ferrailles. Le four à arc électrique lui- même est divisé en trois sections (cuve inférieure, cuve supérieure et toit) et peut être basculé de manière hydraulique. La cuve inférieure, la cuve supérieure et le toit sont revêtus intérieurement de matériaux réfractaires. Les faces externes des cuves et le toit sont fabriqués en acier et normalement refroidis par l'eau.

Juste à côté du four à arc électrique se trouve le transformateur. C'est un transformateur de puissance qui est normalement refroidi à l'huile et protégé par sa propre enveloppe. L'installation

comprend également un groupe hydraulique pour le mouvement des électrodes et le levage du toit, un système d'eau de refroidissement, un système d'air comprimé, une installation d'aspiration des gaz de processus et un chariot de transport de poche.

Le four à arc électrique (E.A.F) est constitué d'un foyer cylindrique ou ovale à axe vertical, fermé en bas par un chapeau en tôle concave, où est placée la semelle réfractaire, et en haut par un couvercle nommé « roof ».

L'arc électrique est conçu pour produire de l'acier liquide avec une utilisation intensive de l'énergie électrique. L'alimentation électrique dans le four permet la fusion de la charge métallique, représentée par différents matériaux ferreux (ferraille d'acier, fer massif ou fondu, fer réduit direct, etc.).

II.1.2. Procédé de fusion par l'EAF :

Dans le four à arc, l'énergie électrique est transférée à la charge de ferraille à fondre puis au bain de métal fondu au moyen d'électrodes. Les fours à arc direct ont une alimentation en courant alternatif et ils sont triphasés, c'est-à-dire avec trois électrodes. A l'intérieur, l'arc se stabilise entre l'extrémité de l'électrode et la charge métallique, dont la fusion est principalement réalisée par les effets du rayonnement de l'arc.

L'échauffement du métal est dû à la transmission de chaleur par convection, conduction et rayonnement dans le point chaud de l'amorçage de l'arc électrique.

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

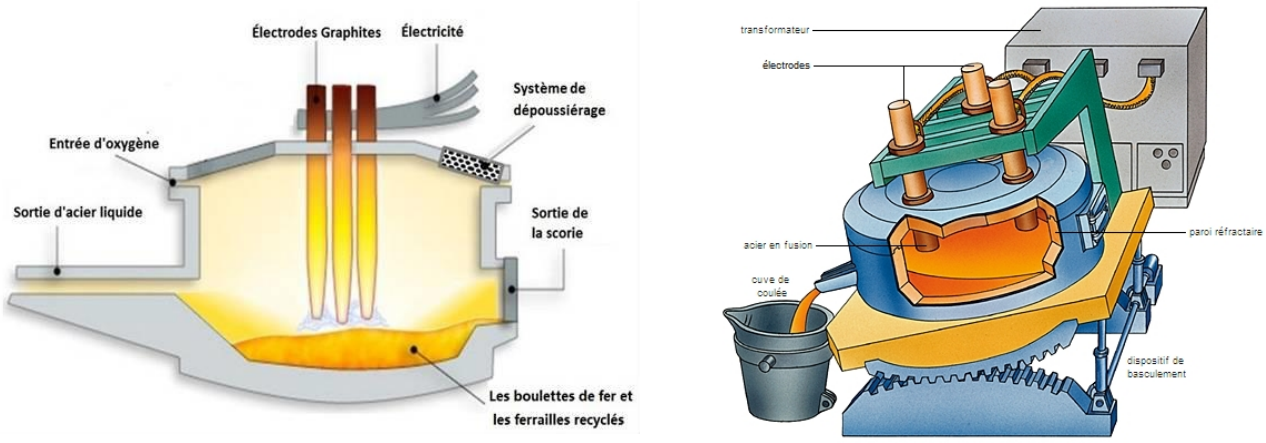


Figure II.2: Schéma du procédé de l'EAF.

II.1.3. Portée du projet d'AQS Bellara- Jijel :

Le projet prévoit la fourniture de 2 aciers électriques pour la production annuelle de 2,15 Million ton/an de barres d'armature et de fil machine déformé. Chaque atelier de fusion est équipé d'EAF, LRF et CCM.

Figure II.3: Photographie d'EAF de l'aciérie 01.

II.1.3.1. Géométrie du four à arc électrique (EAF) :

Le Tableau II.1 résume la géométrie de l'EAF :

Tableau II.1: Géométrie d'EAF.

Diamètre de la coquille inférieure (mm) (diamètre intérieur des plaques d'acier)	**7000**
Épaisseur réfractaire inférieure (mm)	**700**
Épaisseur réfractaire de la paroi (mm)	**561**
Acier taraudé (ton)	**130**
Volume (m^3)	**220**
Capacité (ton)	**160**

II.1.3.2. L'énergie du système EAF :

Le Tableau II.2 résume l'énergie du système d'EAF

Tableau II.2: L'énergie du système d'EAF.

Alimentation électrique	**AC**
Transformateur (MVA)	**130+ 20%**
Courant de conception du système secondaire (KA)	**81**
Diamètre d'électrode (mm)	**710**

Diamètre du cercle d'électrode (mm)	**1450**
Température (°C)	**1700**
Qualité des électrodes à utiliser	**Haute densité**

II.1.4. Le réfractaire de l'EAF :

Les profils réfractaires de l'EAF sont présentés sur les figures (Figure II.4, Figure II.5 et Figure II.6)

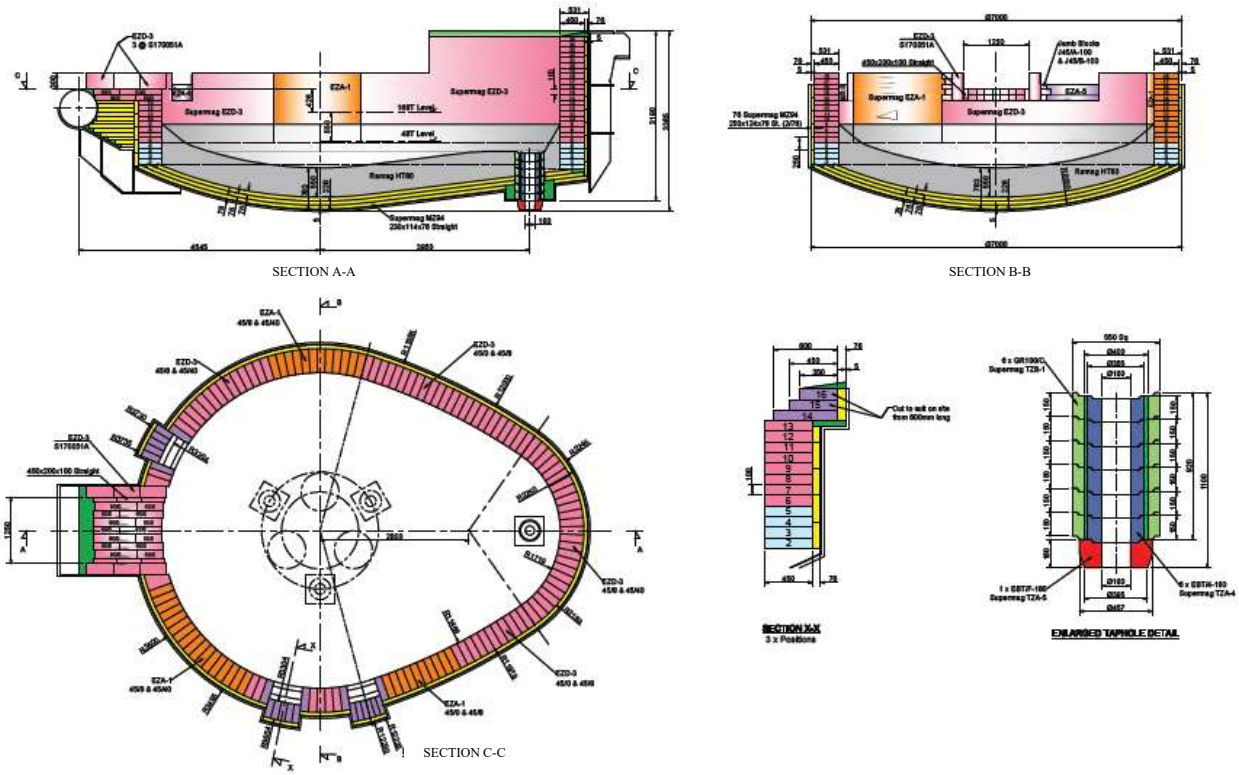


Figure II.4 : Le profil réfractaire en différentes sections (A-A) (B-B) (C-C).

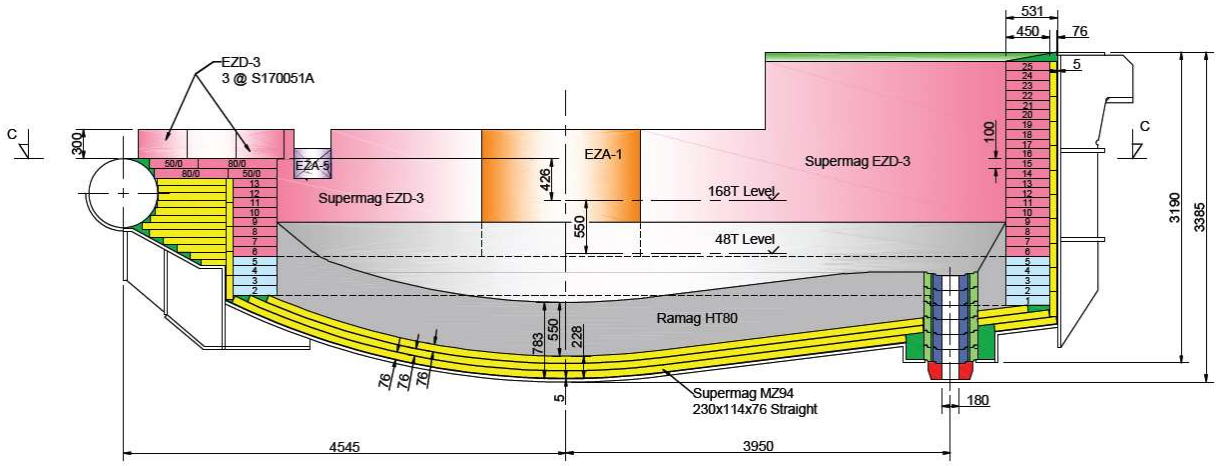


Figure II.5: Profil du réfractaire du four (vu A/A).

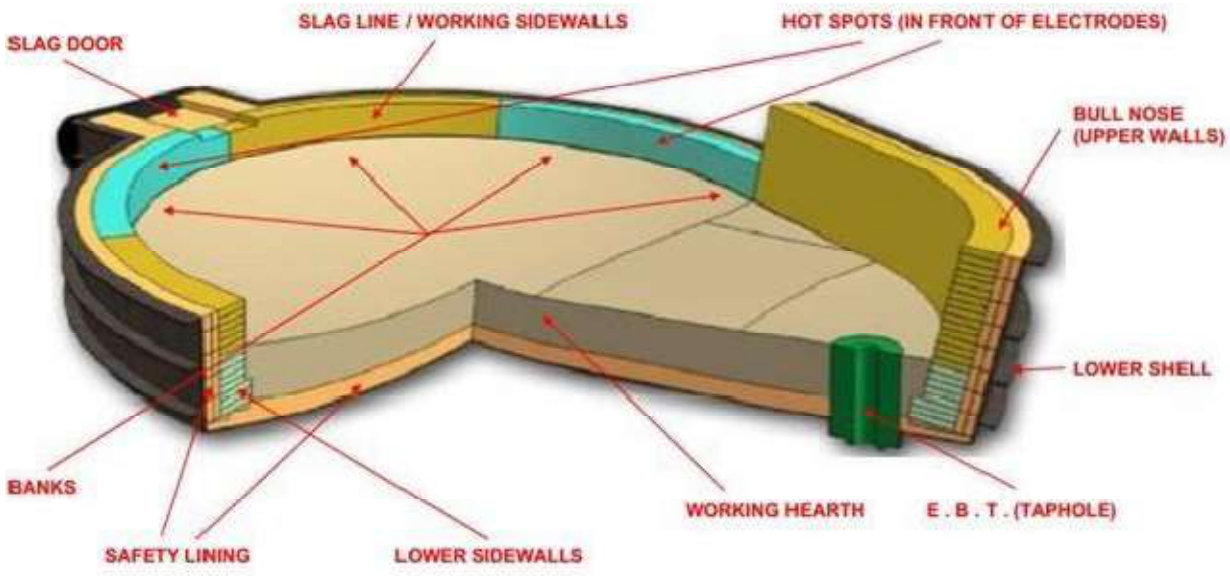


Figure II.6: Réfractaire de la sole et de côté d'EAF.

II.2. Réfractaires du four à poche (LRF) :

Les premiers fours à poche ont été construits au milieu des années 1960 par ASEA en Suède. Dans le procédé ASEA-SKF, la poche était déposée dans une chambre comportant deux couvercles, l'un pour le traitement sous vide et l'autre avec trois électrodes pour le chauffage.

Une autre méthode introduite dans les années 1960 était le procédé Finkl-Mohr, qui ne comportait qu'un seul couvercle, étanche au vide, à travers lequel les électrodes étaient insérées. La construction était techniquement exigeante avec des entrées d'électrodes étanches au vide. Ce type de technologie était généralement appelé VAD. Elle s'est modérément répandue bien que le chauffage sous pression atmosphérique soit plus commun.[13]

II.2.1. Procédé de fusion par LRF :

Après avoir été soutiré de la BOF ou du EAF, l'acier fondu produit par les procédés primaires peut subir un affinage supplémentaire pour éliminer les impuretés supplémentaires restant dans l'acier, ou ajouter des éléments associés pour obtenir la composition chimique et la qualité de produit requises. Ce processus d'affinage est appelé opération secondaire d'élaboration de l'acier, affinage secondaire ou affinage en poche parce qu'il est réalisé dans la poche de transfert. Le processus d'affinage secondaire est courant pour produire de l'acier de haute qualité. Les fonctions importantes du processus de raffinage secondaire sont la désulfuration finale, le dégazage de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène, l'élimination des impuretés et la décarburation finale (pour les aciers à très faible teneur en carbone). En fonction de la qualité requise, la plupart de l'acier fondu produit dans les processus BOF et EAF passe par une partie ou la totalité des processus d'affinage mentionnés ci-dessus.

Les fours à poche ressemblent à des versions plus petites des fours EAF, avec trois électrodes en graphite reliées à un transformateur à arc utilisé pour chauffer l'acier. Au fond du four à poche, il y a généralement une canalisation par laquelle on peut injecter du gaz argon pour remuer et homogénéiser l'acier fondu dans le four. En injectant des agents de désulfuration (tels que Ca, Mg, CaSi, CaC_2) par une lance, la concentration de soufre dans l'acier peut être abaissée à 0,0002 %. L'ajout de silicium et d'aluminium pendant la désoxydation forme de la silice (SiO2) et de l'alumine (Al_2O_3). Ces oxydes sont ensuite absorbés par les scories générées par le processus de raffinage. En outre, pour ajuster précisément la composition chimique de l'acier afin de produire différentes qualités d'acier, les éléments d'alliage souhaités sont ajoutés à l'acier fondu par le biais d'une trémie d'alliage qui est reliée au four à poche. Les fours à poche fonctionnent également comme une unité de stockage de l'acier avant le début des opérations de coulée.

Au cours de l'affinage en poche, des laitiers sont générées par l'ajout de fondants dans la poche, pour fondre et se combiner à tout report de laitier de four dans le but d'absorber les produits de désoxydation (inclusions), d'isoler la chaleur et de protéger les revêtements réfractaires de la poche. Étant donné que l'étape de raffinage en poche implique généralement l'ajout de différents fondants, les propriétés de ces scories synthétiques sont très différentes de celles des laitiers de four.[14]

II.2.2. Géométrie du four à poche (LRF) :

Le tableau II.3 résume la géométrie de LRF

Tableau II.3 : Géométrie de LRF.

Diamètre de la coquille inférieure (mm) (diamètre intérieur des plaques d'acier)	**3400**
Épaisseur réfractaire inférieure (mm)	**300**
Épaisseur réfractaire de la paroi (mm)	**250**
Acier taraudé (ton)	**120**
Volume (m^3)	**150**
Capacité (ton)	**130**

II.2.3. L'énergie du système LRF :

Le tableau II.4 résume l'énergie du système de LRF

Tableau II.4 : L'énergie du système de LRF.

Alimentation électrique	**AC**
Transformateur (MVA)	20.4
Courant de conception du système secondaire (KA)	41
Diamètre d'électrode (mm)	400
Diamètre du cercle d'électrode (mm)	500
Température (°C)	1640
Qualité des électrodes à utiliser	**Haute densité**

II.2.4. Le réfractaire de LRF :

Les profils réfractaires de LRF sont présentés sur les figures (Figure II.7, Figure II.8 et Figure II.9)

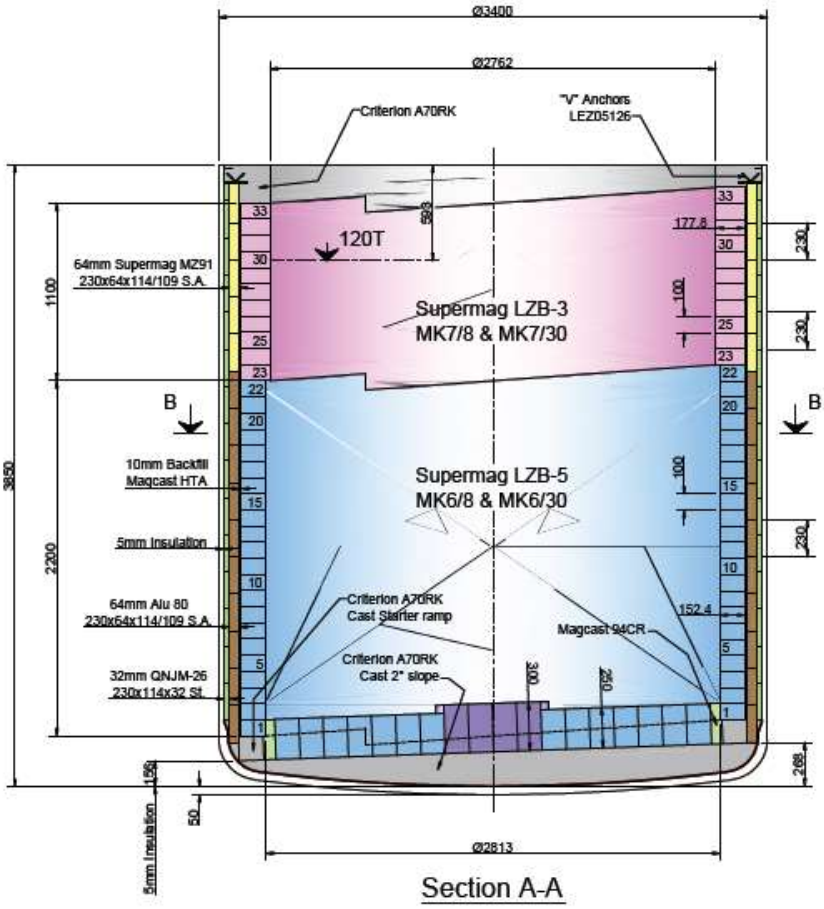


Figure II.7 : Profil du réfractaire du four LRF (vu A/A).

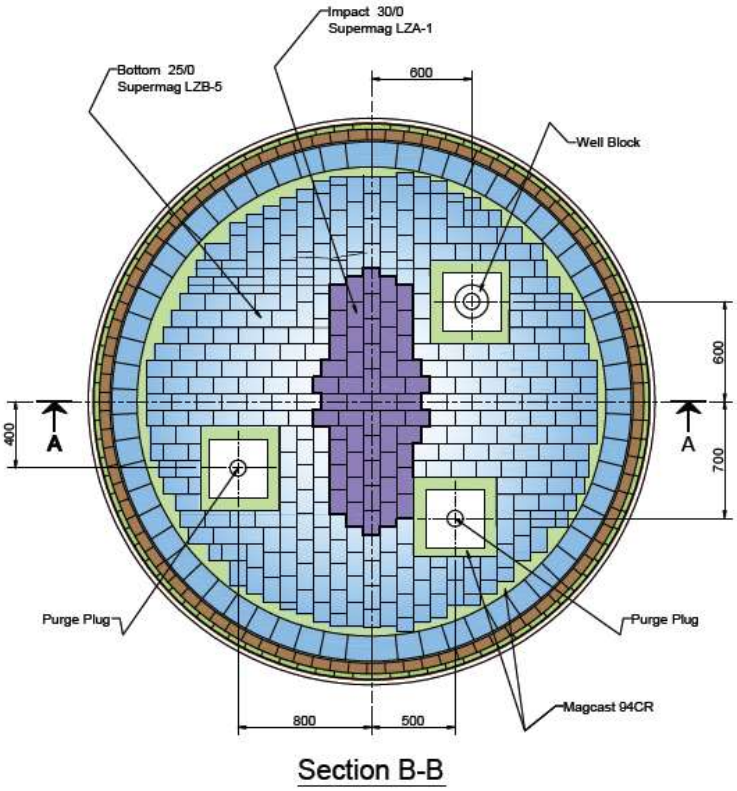


Figure II.8 : Profil du réfractaire du four LRF (vu B/B).

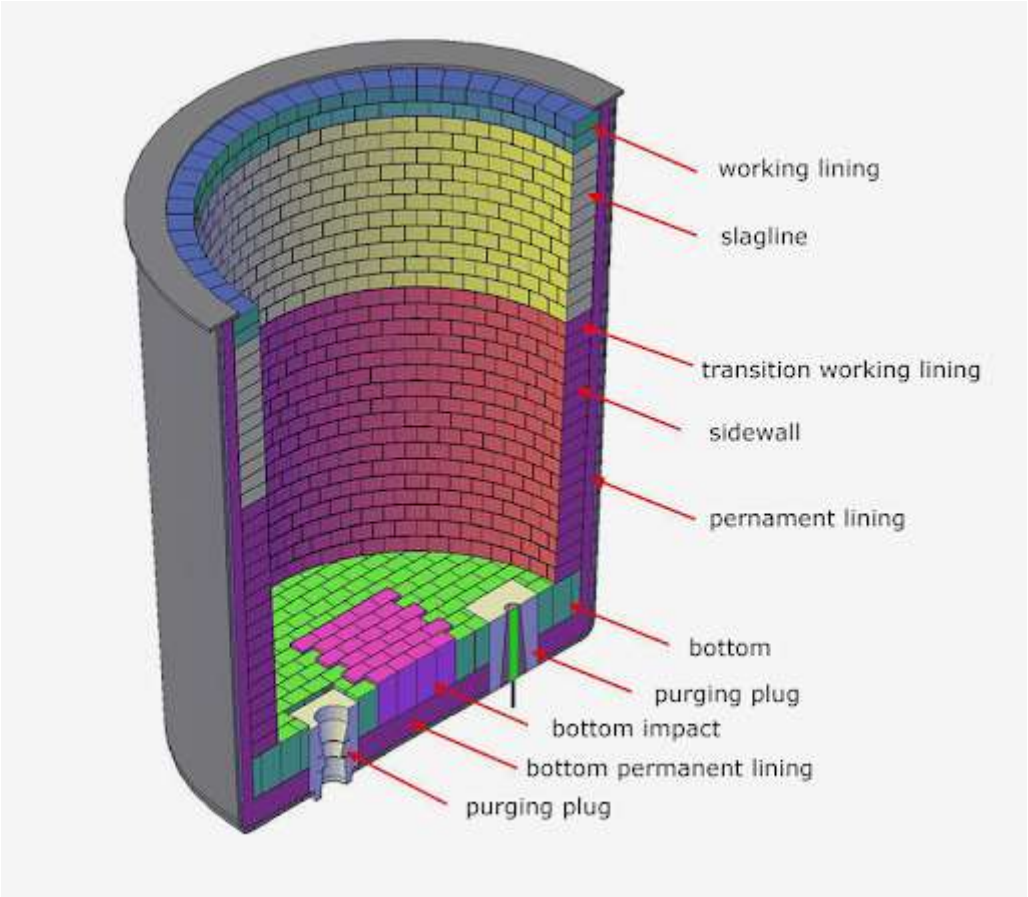


Figure II.9 : Réfractaire de la sole et de côté d'LRF.

Partie expérimentale

Chapitre III

Caractérisation des réfractaires du four à arc (E.A.F) et du four à poche (L.R.F)

III.1. Observations d'échantillon de brique réfractaireusée :

Pour mieux comprendre le mécanisme de dégradation des matériaux réfractaires, nous étudions attentivement l'endommagement de différentes qualités de matériaux réfractaires.

Pour cette raison, Après démontage et observation du revêtement réfractaire du four, les fragments réfractaires ont été récupérés avec l'aide de la station technique de l'aciérie.

Les échantillonsdes réfractaires récupérés à l'aciérie SMS, présente plusieurs zones endommagéesremarquables et nous avons constaté :

Figure III.1: Photographie d'une brique réfractaire après utilisation.

La surface supérieure du matériau réfractaire est très irrégulière, corrodée et imprégnée de laitier. On observe des microfissures très denses parallèles et moins dense perpendiculaires à la face chaude dans les premiers millimètres de profondeur, et cela provoqué par le choc thermique. A quelques centimètres de la surface, il y a des fissures parallèles à la surface chaude et des pores remplis de métal. La zone près de la fissure est corrodée. En fin, un réseau épars de macrofissures se forme dans l'épaisseur restante du réfractaire.Certaines sont remplies de métal liquide.

III.2. Synthèse sur la dégradation :

On rappelle que les sollicitations de dégradation des réfractaires sont à l'origine de trois volets : thermique, mécanique et chimique.

III.2.1. Les dégradations d'origine thermomécanique :

Des microfissures très denses parallèles à la surface chaude et quelques fissures verticales apparaissent dans les premiers millimètres de profondeur. Ces fissures sont principalement causées probablement par un choc thermique.

A quelques centimètres de profondeur apparaissent des macro-fissures parallèles à la face chaude qui serait initiées par les contraintes thermiques ou les changements de phase.

Résultats et discussions :

Les contraintes d'origine thermique et/ou le changement de volume provoqué par la transition de phase peut provoquer des fissures ou provoquer la propagation de fissures existantes. Ensuite, le laitier pénètre dans le matériau. Cela peut aider à propager ces fissures.

Ce type de dommages se produira à plusieurs reprises à chaque cycle, conduisant progressivement à l'usure des matériaux réfractaires.

III.2.2. Les dégradations d'origine chimique :

La corrosion est caractérisée avec deux effets principaux : d'une part, en pénétrant dans le matériau, elle va modifier ses propriétés mécaniques ; d'autre part, elle va également provoquer la dissolution du matériau et provoquer la perte du matériau. [15]

Résultats et discussions :

Pendant le traitement, les impuretés et les résidus contenus dans le bain d'acier remontent à la surface et forment les laitiers. Cette phase liquide à haute teneur en oxyde se dépose sur la paroi du four pendant la fusion et l'évacuation, et stagne pendant un certain temps avant d'être évacuée. Le laitier contient principalement des oxydes tels que l'alumine (Al_2O_3), la chaux (CaO) et les oxydes de silice (SiO_2), rappelons que les matériaux réfractaires sont principalement constitués d'alumine et d'oxyde de magnésium (Al_2O_3 et MgO). La porosité initiale du matériau réfractaire et les fissures en surface sont propices à la pénétration du laitier et du métal liquide dans la profondeur du matériau réfractaire. Le laitier réagit alors avec le matériau réfractaire.

Les spinelles du réfractaires vont capter des oxydes de fer et de manganèse contenus dans le laitier, alors que les $CaAl_{12}O_{19}$ (qui se forment autour des grains en l'absence de corrosion) vont alors aussi se former dans la matrice par réaction entre la chaux du laitier et l'alumine de la matrice.

Figure III.2: Photographie du réfractaire endommagé chimiquement par réaction du laitier.

III.2.3. L'érosion et l'usure :

L'érosion est un autre mode d'usure observée sur les réfractaires. Elle se manifeste par une perte de matière plus importante et parfois très localisée. La littérature distingue plusieurs types d'érosion : une érosion fragile, et une érosion ductile.

L'érosion fragile se caractérise par la formation d'un réseau de microfissures sous la zone d'impact près de la surface. Ces fissures deviennent dramatiques lorsqu'elles coalescent et débouchent à la surface, entraînant un écaillage de celle-ci. Ce phénomène est donc généralement responsable d'une perte de matière importante. [16]

L'érosion ductile se caractérise par la formation de cratères due à des déformations plastiques importantes très localisées à la surface liée à l'impact de particules solides. La perte de volume ainsi engendrée provient alors de l'extrusion du matériau cible par les particules d'impact, et de l'arrachage de matière. [16], [17]

Résultats et discussions :

Les différentes observations ont donc amené à considérer que l'érosion des briques réfractaires intervient de plusieurs façons : par érosion fragile suite au choc thermomécanique au tout début du remplissage alors que le matériau n'est qu'à 1000 - 1200°C ; puis par érosion ductile suite aux remous induits par le remplissage et les injections de gaz sur des temps plus longs lorsque la température en surface de briques réfractaires est plus élevée. Malgré l'hétérogénéité du matériau considéré dans cette étude, le mécanisme d'érosion privilégié n'est pas celui des matériaux hétérogènes. En effet, les transformations de phases prenant place dans le matériau avec la montée en température engendrent une « fusion » des grains avec la matrice, phénomène d'autant plus aggravé si l'on prend en considération la corrosion par les laitiers.

Figure III.3: Photographie présente l'usure du côté chaud.

III.3. Matériau du battage de paroi et du fond pour les applications EAF et LRF :

Les briques réfractaires utilisées pour les fours à arc (EAF) et four à poche (LRF) sont :

- Pour EAF : Supermag EZD-3, Supermag EZA-1 et Ramag HT80.
- Pour LRF : Supermag LZD-9, Supermag LZA-7 et Supermag LZE-3.

Le tableau suivant représente les caractéristiques des briques réfractaires utilisées pour le four à arc (EAF) et four à poche (LRF) :

Tableau III.1 : les caractéristiques des briques réfractaires utilisées pour le four à arc (EAF) et four à poche (LRF).

		Composition chimique (% en poids)					**Propriétés physiques**				
les fours	**Les briques réfractaires**	***SiO_2***	***Al_2O_3***	***Fe_2O_3***	***CaO***	***MgO***	Densité apparente (Kg/m^3)	Densité apparente, cuite à 1000°C (Kg/m^3)	Résistance à l'écrasement à froid (N/mm^2)	Résistance à l'écrasement à froid, cuite à 1000°C (N/mm^2)	Carbone retenu, cuite à 1000°C (%)
EAF	*Supermag EZD-3*	0.7	0.1	0.7	1.4	96.5	3040	2980	40	20	15.0
	Supermag EZA-1	0.6	0.1	0.6	1.6	97.2	3070	3010	55	30	15.0*
	Ramag HT80	0.9	0.5	4.0	14.1	80.0	/	/	/	/	/
LRF	*Supermag LZD-9*	0.7	0.1	0.7	1.4	96.5	3060	3000	55	25	12.0
	Supermag LZA-7	0.6	0.1	0.7	1.2	97.2	3000	2960	60	30	10.0
	Supermag LZE-3	3.9	75.2	1.3	0.7	15.7	3150	3110	75	50	5.0*

Chapitre IV

Méthodes d'analyse physico-chimiques

Pour avoir la composition chimique des briques réfractaire du LRF (les briques à base de MgO qui sont ont en contact direct avec le métal. Nous avons fait une étude comparative entre l'état initial et après l'endommagement de ce type des briques d'une part et l'influence du milieu agressif (laitier) sur ces briques d'autre part.

Pour faciliter cette tache nous avons proposé deux méthodes d'analyses chimiques différentes à savoir :

- La méthode classique : gravimétrie et titrimétrie.
- La méthode d'analyse par la fluorescence des rayons X en utilisant le spectromètre à XRF après la préparation de l'échantillon.

Pour ce faire, une série des essaies a été effectuée sur les briques réfractaires pour avoir une information générale sur la capacité de résistance aux différentes sollicitations : choc thermique et résistance mécanique.

IV.1. Présentation de la méthode classique :

Nous avons présenté la méthode d'analyse chimique pour déterminer les oxydes selon la méthode classique.

Les échantillons traités et analysés ont été prélevés soigneusement au niveau de site SMS.

Les analyses sont effectuées au sein du laboratoire de l'unité de DRI du complexe AQS.

Figure IV.1 : Section réfractaire au site SMS. **Figure IV.2 :** Laitier extracté au cours de fusion.

IV.1.1. Méthode gravimétrique :

IV.1.1.1. Principe :

Les méthodes gravimétriques sont basées sur des mesures directes de masse effectuées à l'aide de la balance analytique de haute précision. Elles se classent sous deux groupes principaux :

- Des méthodes par précipitation : l'analyste est convertie en un précipité très peu soluble qui ensuite filtré, lavé de ses impuretés et transformé en un produit de composition connue par un traitement thermique approprié. Ce produit est ensuite pesé.
- Des méthodes par volatilisation : l'analyste ou ses produits de décomposition sont volatilisés à une température appropriée. Le produit volatil est recueilli puis pesé et encore pesé la masse de l'échantillon.

IV.1.1.2. Echantillonnage et appareillage :

Le prélèvement des échantillons a été effectué avec le plus grand soin afin d'éviter tout erreur pouvant provenir de contamination ou de la pollution par produit étranger.

La prise d'échantillon est variable d'une part suivant l'état du brique (état initial/après l'endommagement) et d'autre part suivant la zone d'utilisation (au niveau du : EAF-LRF/ Zone de construction des fours). L'échantillon prélevé va subir toute une série d'opérations pour obtenir un échantillon présentatif ou s'effectueront touts les essais de laboratoire.

L'échantillon prélevé a subit le tamisage sur tamis vibreur avec un calibrage granulométrique de 80µm après un concassage et broyage de manière rendre la matière la plus fine possible pour les essais de laboratoire le concasseur et le broyeur sont montré dans la figure IV.3.

Figure IV.3 : Concasseur & broyeur.

IV.1.1.3. Mode opératoire :

Pour les analyses gravimétriques, on a utilisé une balance analytique avec une précision de 10^{-4}, cet appareil a été soigneusement étalonné et nettoyé avant chaque mesure.

Figure IV.4 : Balance analytique.

- **Préparation de la solution mère :**

- Dans un erlenmeyer et sous un bouilleur on introduit, une masse souhaitable de l'échantillon à analyser :
- Une attaque avec 21 ml HCl pour chaque gramme pour dissoudre l'échantillon
- Ajouter de $HClO_4$ jusqu'à le dégagement total des fumées puis 7 ml HNO_3 jusqu'à la dissolution totale de l'échantillon (voir Figure IV.5).
- Filtrer la solution dans un erlenmeyer en ajoutant l'eau chaude

A la fin de cette opération on obtient une solution aliquote et une masse de papier à filtrer riche en SiO_2 (Figure IV.6).

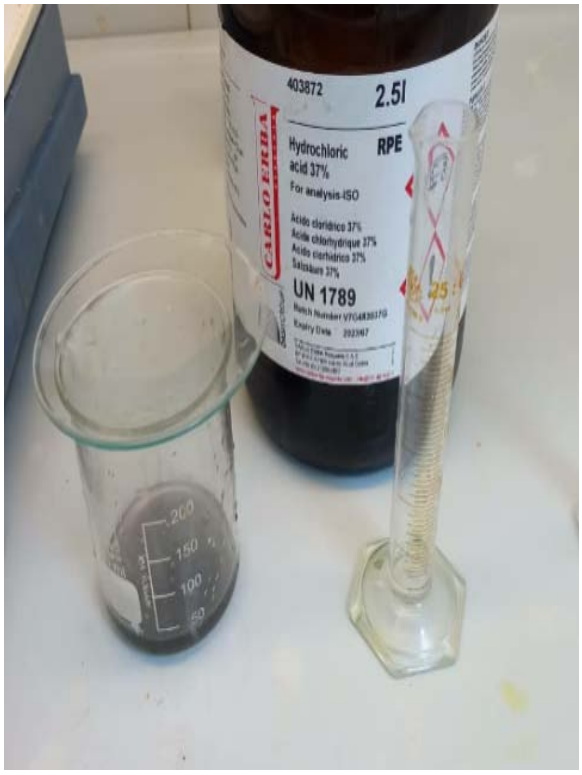


Figure IV.5 : Solution mère. **Figure IV.6 :** Solution mère après filtration.

- **Détermination de SiO_2 :**

Pour déterminer la concentration des oxydes de silicium (SiO_2), on va prendre un creuset en platine et faire mesurer son poids M1, placer le papier à filtrer dans le creuset et faire chauffer jusqu'à 105°C environ 1h, puis on va mettre ce creuset dans un dessiccateur (Figure IV.8) pour éliminer l'humidité après placer le dans un four à moufle à 900°C (Figure IV.7).

Figure IV.7 : Four à moufle. **Figure IV.8 :** Dessiccateur.

Apres la combustion totale on va mesurer la masse M2

- Ajouter 2 goute d'acide sulfurique H_2SO_4 dilué 1/9.
- Ajouter 10 goutes HF (40%) et chauffer jusqu'à le dégagement des fumées.
- Ajouter 10 gouttes HF (40%) et remettre dans le four à moufle à 900°C environ 9 min.
- Retirer lecreuset et rajouter 10 gouttes HF (40%) après le refroidissement puis remettre dans le four a moufle 900 °C environ 7 min.
- Retirer, refroidir et prendre la masse final M3.

- **Calcule :**

  %$SiO_{2\ insoluble}$ = (M2-M1) / (masse d'échantillon)*100

  %SiO_2= (M2-M3) / (masse d'échantillon)*100

➢ **Détermination de CaO / MgO :**

Pour réaliser cette opération on va utiliser la solution aliquote, donc on va préparer :

- 02 béchers et mettre 25 ml de la solution aliquote.
- Ajouter pour chaque un 2 g NH_4Cl, 10 ml NH_4OH et laisser jusqu'à la précipitation.
- Chauffer les solutions pour obtenir une matière visqueuse puis filtrer les solutions.

On va suivie cette opération pour le 1er bécher comme suite pour calculer le TH :

- Ajoutez 2 ml de tampon d'ammonium.
- Ajoutez 2 ml de Tri éthanol amine 99% (EBT) pour avoir une couleur rose.
- Titré la solution par EDTA (0.01M) jusqu'au avoir une couleur bleu.

Et avec le 2ème bécher pour calculer CaH :

- Ajoutez l'indicateur P&R.
- Ajoutez environ 20 ml NaOH (La couleur doit être rose).
- Titré la solution par EDTA (0.01M) jusqu'au avoir une couleur bleu.

- **Remarque :**

Chauffer la solution CaH jusqu'à la disparition de l'odeur de l'ammoniaque.

- **Calcule :**

  %CaO = CaH * EDTA molarité * $E_{q\ masse\ de\ CaO}$ * facteur / masse de l'échantillon.

  %MgO = (TH-CaH) * EDTA molarité * $E_{q\ masse\ de\ MgO}$ * facteur / masse de l'échantillon.

- **Remarque :**

❖ **CaH :** Lecture du volume de burette.

❖ **TH :** Lecture de volume TH - lecture de volume CaH.

❖ **Facteur :**

– CaO = 56.08

– MgO = 40.31

➢ **Déterminationde l'Al_2O_3 :**

Toujours on utilise la solution aliquote préparé précédemment.

– Prendre 25 ml puis ajouter 10 ml de la solution NaOH (20%) et chauffer cette solution jusqu'à 200°C par une plaque chauffante (Figure IV.9) pour précipiter les espèces chimiques.

Figure IV.9 : Plaque chauffante.

– Filtrer la solution en utilisant le papier filtre et une petite quantité d'eau chaude pour éclaircir la couleur.

– Ajouter de HCl jusqu'à que le pH doit être entre 4.5 et 5.5 (voir Figure IV.10).

Figure IV.10 : pH mètre.

- Ajouter 10 ml de l'acétate de sodium (50%) (vérifier le pH =5.5-6).
- Ajouter 10 ml de l'EDTA (0.01M).
- Titrer la solution obtenue comme suit :
  - ❖ 10 ml de EDTA (0.01M) et 3 goutes de Xylènol (indicateur coloré).
  - ❖ Ajouter le sulfate de zinc ($ZnSO_4$) jusqu'à avoir la couleur rose.

- **Calcule :**

%Al_2O_3 = (Blank – Br * M_{CuSO4} * $Eq_{masse\ Al2O3}$ * facteur * 100) / masse de l'échantillon

- **Remarque:**

– Le Blank est préparé comme suit :

- Prendre un bécher qui contient 10 ml EDTA (0.01 M).
- Ajouter 3 goutes de l'indicateur Xylènol.
- Titré par le sulfate de cuivre ($CuSO_4$) jusqu'à avoir une couleur rose, puis lire le volume de la burette.

– Facteur = volume total de la solution aliquote (après avoir la couleur rose) / volume de l'échantillon

➢ **Détermination de PO_4 :**

Pour déterminer la concentration de PO_4, on va préparerdeux solutions A et B :

❖ **Solution A :**

Dans un bécher, Prendre 11.5g molybdène d'ammonium, 40.5g de NH_4OH et 27 ml eau déminéralisé

❖ **Solution B :**

Prendre 50 ml d'acide nitrique et 115 ml de l'eau déminéralisée.

On va confondre doucement les deux solutions A et B pour obtenir une solution (solution C) qu'on va traiter comme suit :

Laisser la solution 24h, puis filtrer cette dernière dans une fiole en utilisant double papier à filtrer et remplir jusqu'à 250 ml par l'eau déminéralisée.

Prendre 25 ml de la solution aliquote qui a été déjà préparé et ajouter 10 ml de NH_4OH (assurer la précipitation), filtré puis faire dissoudre les substances qui s'accrochent dans le papier à filtre par HNO_3 (voir Figure IV.11).

Verser la solution C dans la solution aliquote pour faire précipiter sous l'effet de température (50-60°C/2h), filtrer, laver par HNO3 (1%) et le nitrate d'ammonium (5%), dissoudre le précipité en ajoutant 25 ml de NaOH, ajouter le phénolphtaléine et titré par HCl 0.1N jusqu'à que la couleur doit être claire.

Figure IV.11 : La solution après filtration.

- **Calcule :**

%PO_4 = $\{(V_{NaOH} - V_{HCl}) * 1.34 / m_{échantillon} * 10\}$ * facteur

Facteur = 0.32

IV.1.2. Méthode titrimétrique :

IV.1.2.1. Principe :

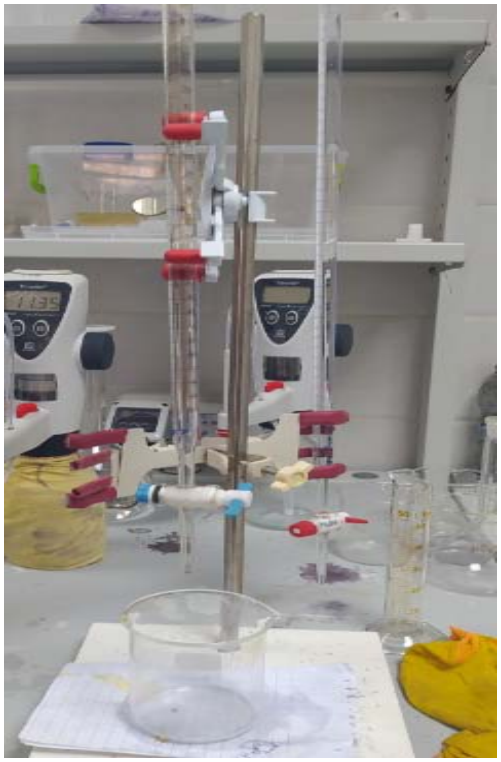
La titrimétrie est une technique de dosage utilisée en chimie analytique afin de déterminer la concentration ou l'activité d'une espèce chimique en solution.

Au cours d'une méthode titrimétrique, une réaction chimique stœchiométrique a lieu entre un composant de l'échantillon et le réactif standard avec une concentration bien connue.

La solution standard est ajoutée par étapes sous forme de petites quantités bien définies jusqu'à ce que la réaction avec l'analyste soit terminée. Le point final d'un tel titrage peut être contrôlé visuellement.

Finalement, la concentration de l'analyste dans l'échantillon peut être calculée en utilisant la quantité totale de réactif consommée, la concentration de la solution de réactif et la stœchiométrie de réaction.

Le point d'équivalence est le point du titrage ou la quantité (en moles) de réactif étalon est égale à la quantité d'analyste. La détermination du point d'équivalence repose sur le fait à qu'aux environs de ce point, la concentration des réactifs libres varies très rapidement. Ce changement peut être mis en évidence soit par des moyens chimiques (à l'aide d'un indicateur) soit par des moyens physico-chimiques (p.ex. par une mesure électrochimique, photométrique…etc.).



FigureIV.12 : équipement de base du processus de titrage.

IV.1.2.2. Échantillonnage et appareillage :

Comme la méthode précédente, on va ramener les échantillons à partir des différentes sections de production puis on va suivre les mêmes démarches de préparation de l'échantillon pour réduire sa granulométrie en utilisant le concasseur, broyeur et le tamis électrique. Aussi, un ensemble des équipements sont utilisés au cours d'analyse pour obtenir les résultats souhaitable comme : les béchers, fioles, plaque chauffante, papier filtre et aussi plusieurs réactifs pour assurer l'avancement du protocole de cette méthode d'analyse.

FigureIV.13 : Tamis électrique.

IV.1.2.3. Mode opératoire :

- **Détermination de FeO :**

Au cours de préparation de l'échantillon, on va assurer sa granulométrie (<160 µm), puis on doit appliquer la procédure suivante :

- Mettre 0.5g de bicarbonate de sodium avec 0.2 g de l'échantillon dans un erlenmeyer
- Préparer une solution de 20ml de HCl avec 15 gouttes de HF et versez soigneusement dans l'erlenmeyer.
- Chauffer la solution 30 min en utilisant la plaque chauffante.
- Retirer la solution et ajouter 10 ml d'acide borique (10%)
- Refroidir et remplir la solution jusqu'à 150ml par l'eau déminéralisé.
- Ajouter 35ml d'acide tampon et environ 7 gouttes d'indicateur coloré (BDS).
- Titrer par $K_2Cr_2O_7$.

- **Calcule :**

  %FeO = (lecture de volume de la burette * facteur * 1.29) / masse d'échantillon

  Facteur = 0.56

IV.2. Présentation des propriétés thermomécaniques des briques réfractaires :

IV.2.1. Résistance aux chocs thermiques :

Un matériau réfractaire est dit résistant aux chocs thermiques s'il ne subit pas de déformation ni fissuration lors d'une variation brusque de température. Cette propriété est liée aux valeurs des modules d'élasticité et de rigidité.

Expérience pour simuler l'effet de la température sur une brique réfractaireutilisée dans le four :

Par suite de variation brusque de température que la pièce peut subir en service, le gradient de température varie de la surface vers l'intérieur, ce qu'il en résulte des dilatations et des contractions inégales qui provoquent des tensions, qui si elles dépassent la résistance de la pièce, déterminent sa rupture (les fissures). L'essai est réalisé par refroidissement dans l'eau. Cet essai consiste à calculer combien de cycle mettre la pièce dans le four puis plonger dans l'eau froide. On doit suivre le mode opératoire suivant :

– Chauffer la pièce dans un four à une température jusqu'à 1100°C.

Figure IV.14 : Un morceau de brique réfractaire au cours du chauffage (en utilisant un four à moufle).

– La durée de chauffage 20 min.

– Plonger brusquement la pièce dans l'eau froide.

Figure IV.15 : Photographie lorsqu'on plonge l'échantillon dans l'eau froide.

On calcule les cycles de résistance aux chocs thermiques comme suit :

Chauffer la brique puis la plongée brusquement dans l'eau, si on aura aucune fissure donc on considère un cycle de résistance au choc thermique, l'opération se refaire au fur et à mesure on calcule le nombre des cycles jusqu'à la rupture.

Nous chercherons également la masse perdue par la pièce au cours de cette opération.

Figure IV.16 : brique à l'état initial

Figure IV.17 : cycle 01

Figure IV.18 : cycle 05

Figure IV.19 : cycle 10

Figure IV.20 : cycle 15

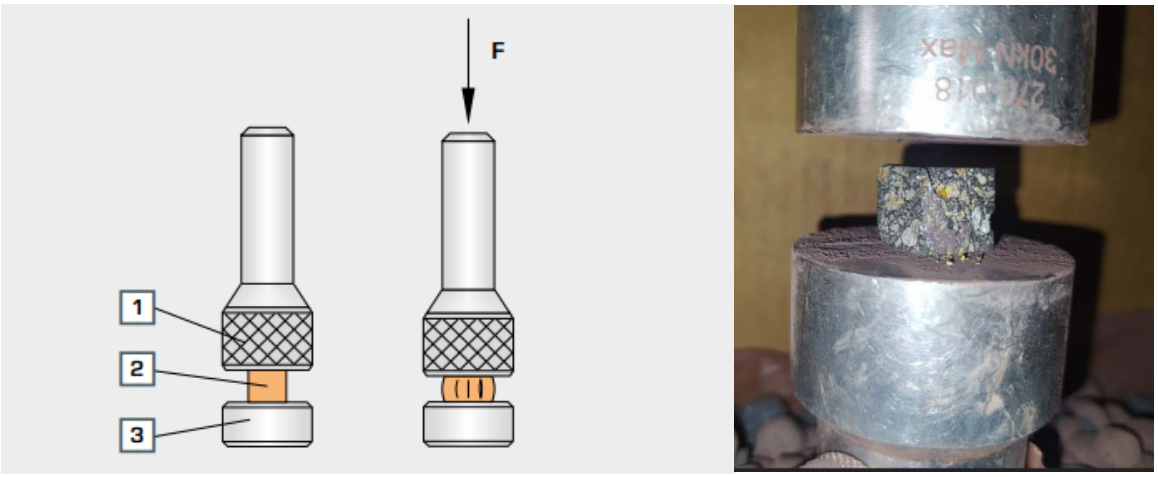
Figure IV.21 : cycle 20

IV.2.2. Résistance mécaniques :

La résistance à l'usure est la résistance des matériaux (brique réfractaire dans cet exemple) à l'abrasion en surface provoquée par l'action mécanique d'un solide.

Essai de compression :

Lors de ces essais, l'éprouvette normalisée de coupe transversale connue (15mm$^{3)}$ est soumise à une force de croissance faible dans la direction longitudinale jusqu'à la rupture. L'éprouvette présente un état de contrainte axiale, l'essai est montré dans la figure IV.22

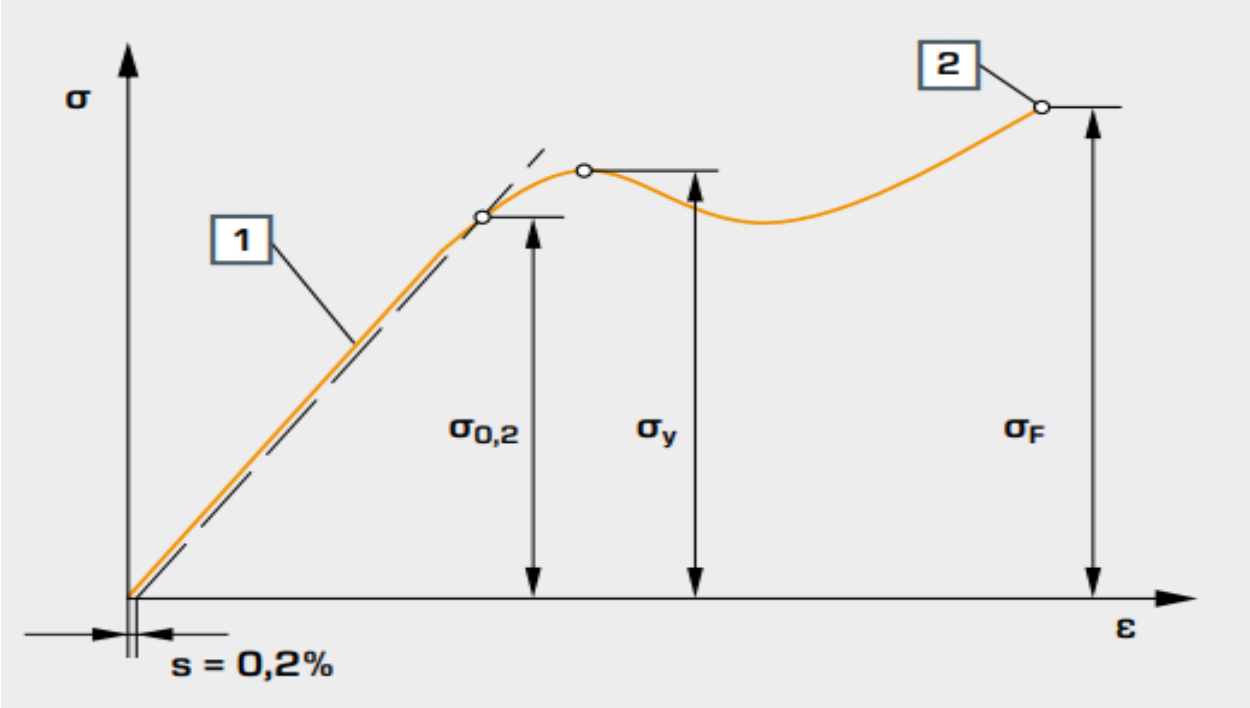


- 1 poinçon de compression.
- 2 éprouvettes.
- 3 plaques de compression.
- 4 forces d'essai.

Figure IV.22 : Procédure de l'essai d'écrasement.

Le diagramme force-trajectoire enregistré permet d'illustrer le rapport qui existe entre la contrainte et l'écrasement. Le diagramme contrainte-écrasement met très bien en évidence les

différences de comportement des matériaux, et fournit les valeurs caractéristiques de résistance à la compression, de limite d'écrasement à 0.2%, ainsi que de contrainte de fluage de compression.



σ contrainte, **ε** écrasement, **s** limite d'écrasement à 0,2%,

σ_y contrainte de fluage de compression,

σ_F résistance à la compression,

1 plage élastique,

2 ruptures

Figure IV.23 : Diagramme contrainte-écrasement.

- **Routine d'analyse :**

Ce teste consiste de préparer saignement un cube du brique réfractaire (15 $mm^{3)}$ pour faire mesurer sa résistance mécanique, en utilisant une machine de compression fort à deux colonne. Cette machine est piloté par un logiciel (Horizon) voir la figure IV.24, quand va nous lui fournissons les paramètres suivantes :

- Contrôle de vitesse.
- Mesure d'extension.
- Mesure de force.

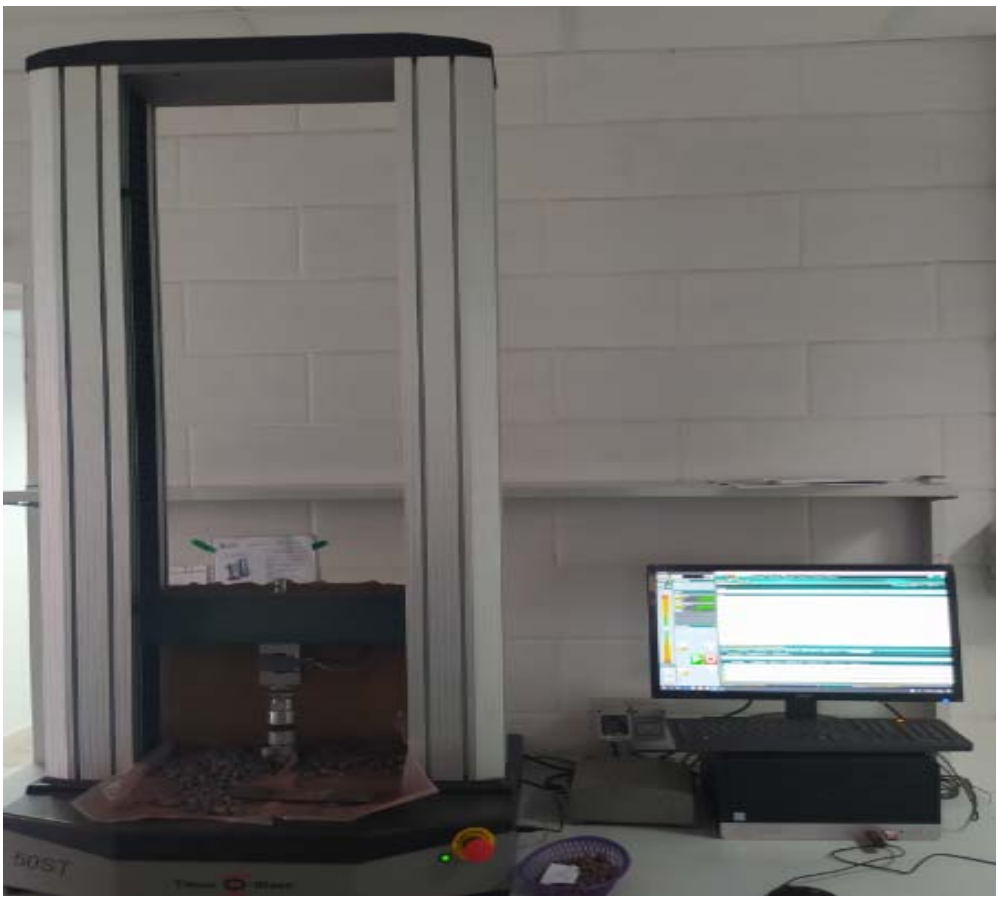


Figure IV.31 : Machine d'écrasement forte (CCS).

Chapitre V

Résultats et discussions

Il s'est avéré d'après des constatations pratiques que les durées de vie des revêtements des poches à aciers sont influencées par plusieurs facteurs, certains liés à la composition chimique et d'autre part à la qualité du travail de maçonnage des briques réfractaires.

Les facteurs liés aux conditions de travail peuvent être interprétés par l'élaboration de laitier agressif, Le processus d'approvisionnement des fours en déchets de ferraille et par des températures de versement élevées…..etc.

Les facteurs liés à l'agressivité des laitiers, les facteurs physiques de température et de contrainte mécanique font l'objet de notre présente étude. De ce fait, des études expérimentales ont été discutées au cours de cette partie, et ont pour but de connaitre les facteurs qui influent sur la durés de vie des matériaux réfractaires.

V.1. Composition chimique des matériaux étudiés :

On va expliquer une analyse chimique comparative entre l'état initial et après endommagement de brique réfractaire de poche d'acier et sa relation avec le milieu agressif (Laitier) voir Tableau V.1, dans ce cas nous utilisons la méthode classique (gravimétrique / titrimétrique) pour déterminer la concentration des oxydes acides et les oxydes basiques dans ces matières.

Notre résultats sont obtenu a partir de la moyenne de trois analyses par chaqu'une.

Tableau V.1 : L'évolution de la concentration des oxydes acides et les oxydes basiques (brique réfractaire / de laitier) de la section LRF.

% / Matériaux étudies	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	PO_4	FeO
Brique LZD-9 (fiche technique)	96.5	1.4	0.7	0.1	-	0.7
Réfractaire LRF (LZD-9)	97.2	1.2	0.6	0.1	-	0.7
Laitier (section LRF)	4.7	45.9	24	6.6	0.034	2.2
Réfractaire endommagé (LZD-9)	89.2	0.15	6.9	2.5	0.15	0.69

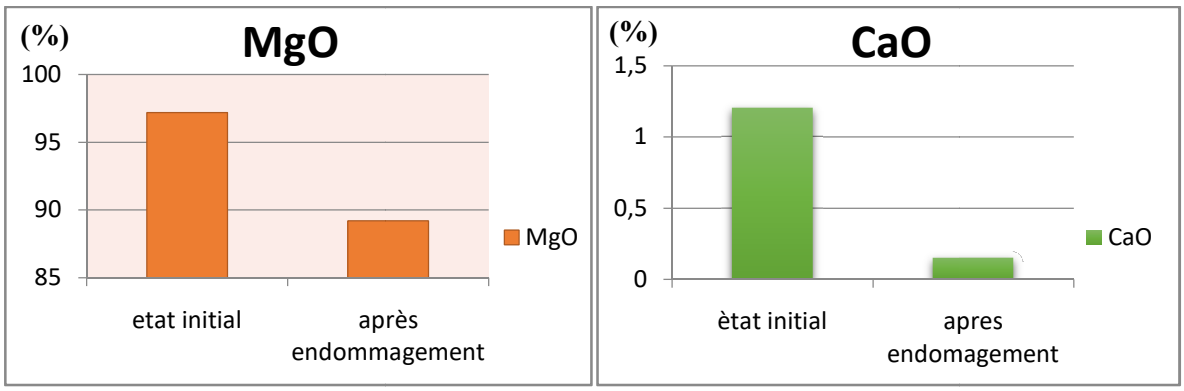


Figure V.1 : Histogramme d'évolution de la concentration des oxydes basiques.

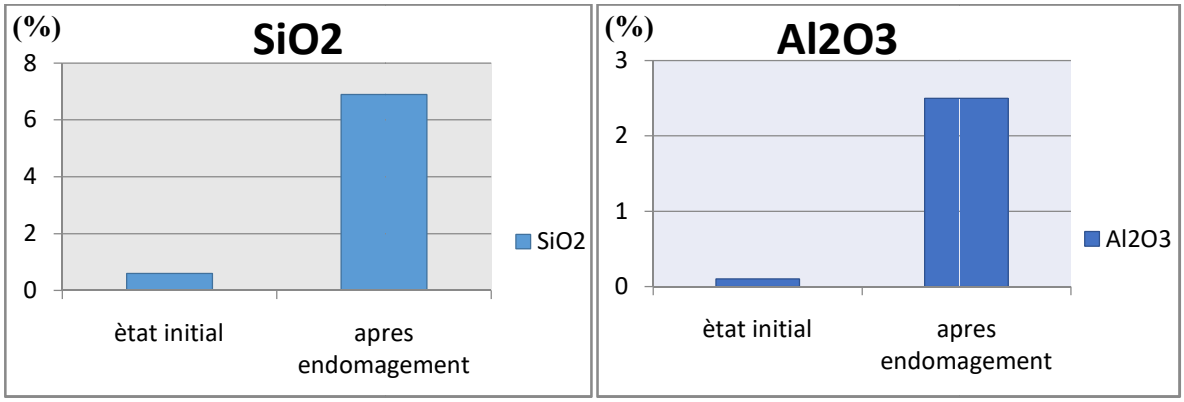


Figure V.2 : Histogramme d'évolution de la concentration des oxydes acides.

Résultats et discussions :

- Le laitier est généré dans le processus de fusion par l'ajout de chaux et l'effet de matériaux non métalliques qui contaminent généralement la ferraille, de plus le laitier contient toutes les productions solides générées par l'oxydation de certains métaux contenus dans la ferraille [Si, Al, Ti, Mn, etc.].
- Les caractéristiques du laitier sont essentielles au fonctionnement du four et ont une influence déterminante sur la qualité de l'acier et sur tout l'usure des réfractaires.
- En ce qui concerne les oxydes acides, le plus important est le dioxyde de silicium. les oxydes de phosphore, l'aluminium et le titane ont une influence mineure sur la basicité. La basicité est identifiée par un indice pour exprimer la prévalence du caractère acide ou basique selon des formules plus ou moins complexes qui tiennent compte de la quantité et du caractère basique des constituants du laitier.
- La basicité du laitier est donnée par la relation suivante :

Basicité$=\frac{\sum oxidesbasiques}{\sum oxidesacides}=\frac{CaO+MgO}{SiO2+Al2O3}$**=[2_2.5] valeur idéal.**

- L'oxyde de calcium (CaO) est l'élément principal qui marque la basicité du laitier par ces caractéristiques hautement basiques. Il existe d'autres composants de base qui contribuent également à la basicité et aux caractéristiques physiques du laitier, par exemple : MnO, MgO.

Donc la basicité d'après l'expérience sera :

Basicité$=\frac{4.7+45.9}{24+6.6}=$**1.65**

- La basicité expérimentale est inférieure de la valeur idéalecela nous donne une information sur l'influence des oxydes acides sur la dégradation des briques réfractaires (attaque chimique), comme les briques réfractaires sont de nature basique (97% MgO).
- nous avons remarqué que ily a un changement logique de composition chimique au niveau du brique réfractaire (état initial) sous l'effet de laitier. Donc, ily a une augmentation des oxydes acides dans la composition chimique des briques et d'un autre côté, ily a une diminution des oxydes basiques dans la composition chimique de ce dernier.cela, nous permet de donner une information sur l'agressivité du laitier sur les matériaux réfractaires.

V.2. Effet de température sur la dégradation des briques réfractaires :

D'après l'expérience qui a été réalisée précédemment, nous remarquons que la brique réfractaire perd 1kg pendant 20 cycles (masse initiale=3 kg).

Tableau V.2: évolution de perte de masse des briques réfractaires sous l'effet de température.

Nbr de cycle	**01**	**05**	**10**	**15**	**20**
Masse perdue (g)	**50**	**150**	**350**	**600**	**10000**

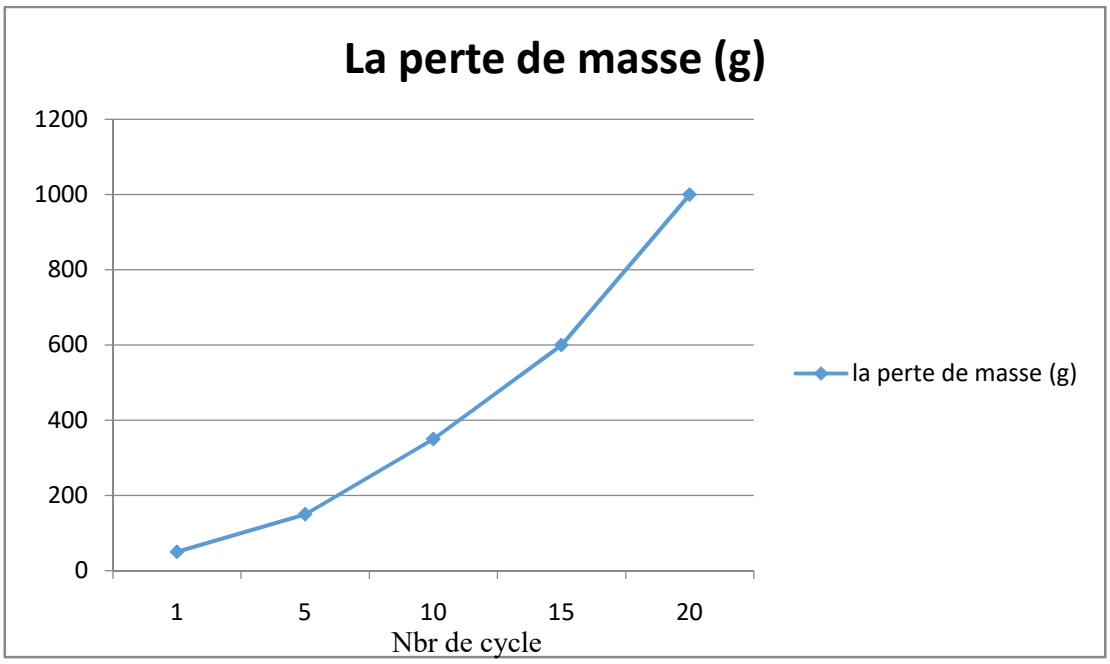


Figure V.3 : Variation de perte de masse de la brique réfractaires LZD-9 sous l'effet de température.

Résultats discussion :

L'usure d'une brique réfractaire est bien définie dans la figure V.3 et la perte de masse par rapport au nombre de cycle. On constate que la perte de masse d'une brique réfractaire est augmentée au cours d'avancement de nombre de cycle. Donc, il y a une vitesse d'usure parrapport au nombre de cycle (nombre de coulée).

Vitesse d'usure = la perte de masse / nombre de cycle.

Vitesse d'usure 1 = 50/1 = 50 g/cycle

Vitesse d'usure 2 = 150/5 = 30 g/cycle

Vitesse d'usure 3 = 350/10 = 35 g/cycle

Vitesse d'usure 4 = 600/15 = 40 g/cycle

Vitesse d'usure 5 = 1000/20 = 50 g/cycle

La vitesse moyenne d'usure : 41 g/cycle

V.3. Résistance des briques réfractaires aux contraintes mécaniques :

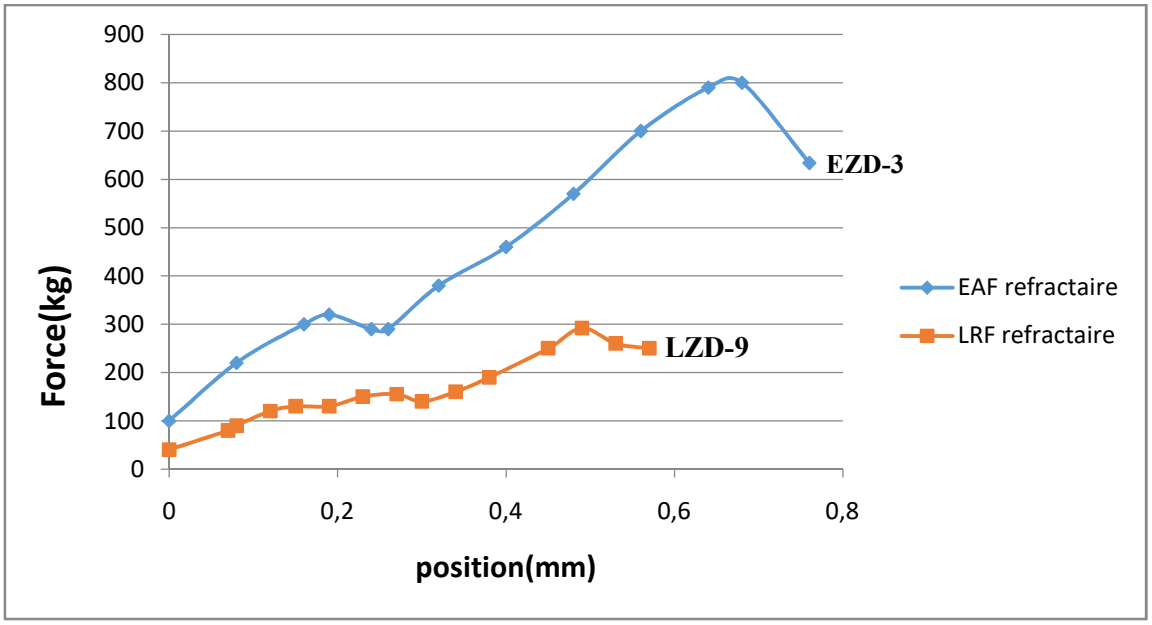


Figure V.4 : Variation de la résistance a la compresion de EZD-9 et EZD-3.

Résultats et discussion :

- Les paniers à ferrailles sont utilisés pour le transfert entre le parc à ferrailles et l'aire de chargement du four à arc électriques (EAF), par contre le matériau versé dans la poche acier est sous forme liquide. Donc, ces charges ont chuté du haute vers le bas de manière agressif, cela produite une contrainte mécanique sur les briques réfractaires.
- La valeur de la contrainte appliquée sur les briquesd'EAF (634 KN) est plus grande que celle de la valeur de la contrainte appliquée sur les briques de LRF (236 KN). cela nous a donné une information sur la charge citée précédemment.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette étude nous a permis d'étudier le phénomène de dégradation des briques réfractaires basiques à base de MgO (LZD-9 et EZD-3) utilisant des analyses appropriées notamment analyses physico-chimiques, mécaniques et thermiques (résistance au choc thermique).

Le choix d'une brique réfractaire pour le revêtement du four à arc et four à poche doit prendre en considération la dégradation des briques réfractaires. Dans ce contexte nous avons effectué ce travail expérimental au sein du complexe Algerian Qatari Steel « AQS » Bellara, El-Milia-Jijel afin de maitriser le phénomène de dégradation des briques réfractaires basiques à base de MgO qui sont en contact direct avec le métal.

Le travail présenté dans ce mémoire permet de tirer les conclusions suivantes :

- La dégradation des briques est causée par des chocs thermiques ce qu'il résulte la transition de phase et par conséquent produite la propagation des fissures.
- La dégradation des briques à l'origine chimique traduit par l'interaction avec le laitier de four à poche conduisant la corrosion des briques basiques causée par l'attaque chimique.
- L'analyse chimique par la méthode classique a révélé que les oxydes du laitier peuvent réagir avec les briques basiques comme montrer visuellement à la surface des briques endommagées.
- Le calcul de la basicité expérimentale permet de donner une informationde l'influence des oxydes acides sur la dégradation des briques réfractaires.
- L'usure d'une brique réfractaire est liée avec le nombre de cycle et la perte de masse, par conséquent la résistance au choc thermique est en relation directe avec le four à poche.

Perspectives

Le travail expérimental qui a été réalisé a permis d'apporter quelques renseignements sur le phénomène de dégradation des briques réfractaires basiques, cependant ils ont soulevé quelques points intéressants à effectuer au futur travail à savoir : nous proposons :

- Une analyse plus approfondie par XRF, DRX et MEB
- Afin d'améliorer la résistance au choc thermique pour les briques basiques à base de MgO qui sont sensibles aux chocs thermiques, il serait intéressant, de l'intégration d'autre oxydes ou matières dans leur composition comme l'ajout de chromite et/ou des autre matières.
- Elaboration des briques réfractaires basiques qui peuvent répondre aux exigences de l'industrie sidérurgique :

Notre souhait est que cette démarche expérimentale et scientifique, contribue au développement des briques réfractaires basiquesaux futurs travaux.

Références bibliographiques

[1] **A. Nishikawa**, *Technology of Monolithic Refractories*, Plibrico Japan Company Limited, Tokyo, 1984, 598 p.

[2] **W.E.Lee, R.E.Moore**, Evolution of in situ refractories in the 20th century, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 81, N° 6, 1385–1410, 1998.

[3] **R. Sarkar**, *Refractory Technology Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1e Ed, Boca Raton, 2016, 314 p.

[4] **Site Web:** https://www.ispatguru.com/refractories-and-classification-of-refractories/

[5] **J. Poirier**, Les céramiques réfractaires de l'élaboration aux propriétés d'emploi, *Verre céramique & Composite*, Vol.1, N°2, 28-42, 2011.

[6] **B. Collignon,** *Séchage de bétons réfractaires : expérimentation, modélisationet influence d'un ajout de fibres polymère*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

[7] **A. El Bakkali**, *Contribution à l'étude de la corrosion des réfractaires à base de SiC dans les cuves d'électrolyse de l'aluminium*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2009.

[8] **M.G. Kakroudi,** *Comportement thermomécanique en traction debétons réfractaires : influence de la nature des agrégats et de l'histoire thermique*. Thèsede doctorat, Université de Limoges, 2007.

[9] **J.M. Haussonne, C. Carry, P. Bowen, J. Barton,** *Céramiques et Verres : principes et technique d'élaboration, Traité des matériaux*, Tome 16, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1e Ed, 2005, 828 p.

[10] **F. Kreith,** *Mechanical Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, 1999, 2091 p.

[11] **M. Karakus, R.E. Moore,** Cathodoluminescence (CL) Microscopy Application to Refractories and Slags, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 1, N°1, 11-29, 2002.

[12] **C.A. Schacht,** *Refractories Handbook*, CRC Press, 1e Ed, Ohio, 2004, 520 p.

[13] **S. Seetharaman,** *Treatise on Process Metallurgy Volume 3: Industrial Processes*. Elsevier, 2014, 1810 p.

[14] **G.C. Wang,** *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, Woodhead Publishing, 1e Ed, 2016, 442 p.

[15] **E. Arfan,** *Tenue thermomécanique des dalles d'impact des poches a acier en céramiques réfractaires*, Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, 2009.

[16] **I.M. Hutchings, R.E. Winter,** Particle erosion of ductile metals: A mechanism of material removal, *Wear*, Vol. 27, N° 1, 121-128, 1974.

[17] **V. Heuer, G. Walter, I.M. Hutchings,** High temperature erosion of fibrous ceramic components by solid particle impact, *Wear*, Vol. 233-235, 257-262, 1999.

Annexe

1 Présentation de méthode de caractérisation par XRF :

Le spectromètre exploite comme source d'excitation un tube à rayon X (source radioactive contrôlée) émettant des rayons X. L'environnement du tube à rayon X et sa zone de travail sont entièrement confinés et pourvus de toutes les sécurités qui s'imposent. Ces éléments sont entièrement pilotés et contrôlés par un ordinateur.

L'utilisation a la responsabilité de prendra toutes les précautions nécessaires relatives à la nature des échantillons.

Le spectromètre est un instrument de mesure qui sert à l'analyse élémentaire de matériaux solide et liquide. Ces matériaux doivent être réparés sous la forme d'un échantillon convenable pour sa manipulation et son insertion dans l'instrument.

1.1 Domaines d'application

L'instrument est utilisé pour l'analyse élémentaire non destructive d'échantillons solides et liquides pour les principaux et mineures constituants.

Constituants mineurs. Au fil des années, WDXRF est devenu une technique standard pour l'analyse de routine des échantillons métallurgiques et minéraux. Les alliages ferreux et non ferreux, le ciment et les matériaux géologiques sont quelques-uns des domaines industriels les plus courants dans lesquels XRF est utilisé pour le contrôle de la qualité et le contrôle des processus.

L'instrument permet de mesurer jusqu'à 86 éléments dans une plage allant de Be (Z 5) à Am (Z 95), sauf pour les gaz rares (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) et Ac.

1.2 Principe :

L'analyse spectrochimique aux rayons X est basée sur le fait que les éléments chimiques émettent des rayonnements caractéristiques, également appelés spectres de raies, lorsqu'ils sont soumis à une excitation appropriée. Rayonnement à haute énergie d'un tube à rayons X provoque les radiations caractéristiques.

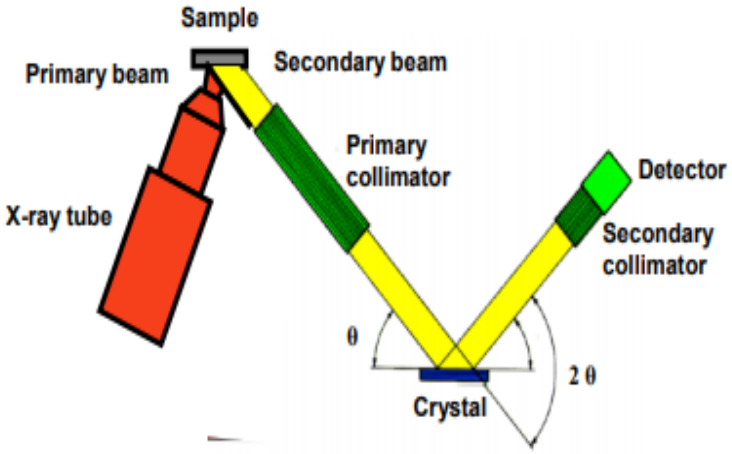


Figure 1 : Schéma fonctionnel pour la caractérisation par XRF.

L'échantillon est excité par un faisceau de rayons X provenant du tube à rayons X. Les spectres de rayons X émis par l'échantillon sont dispersés dans des longueurs d'onde discrètes à l'aide d'un dispositif de dispersion (un cristal), qui produit un spectre lignes liées aux éléments présents dans l'échantillon mesuré. Ces lignes sont ensuite détectées à l'aide d'un gaz compteur proportionnel ou à scintillation. Le cristal et le détecteur sont couplés par une relation thêta-deux thêta à satisfaire la loi de Bragg :

$n\lambda = 2d \sin\theta$.

n = ordre de diffraction.

d= espacement inter planaire du plan cristallin utilisé (Angströms).

θ = angle de Bragg ou angle de diffraction (degrés).

λ = longueur d'onde de la raie spectrale (Angströms).

1.3 Préparation des prises d'essais pour le passage à l'appareil :

Pour la réalisation de cet essai on a besoin de suivre les étapes suivantes :

1.3.1 Concassage et broyage des échantillons :

On récupère des échantillons quand va analyser (briques réfractaire / laitier) puis on le découpe pour bien ajuster la quantité nécessaire, ensuite on a effectué un concassage suivi d'un broyage entre chaque opération fait un criblage pour sélectionner les grains de granulométrie très fine :

Figure 2 : échantillon concassé et broyé.

1.3.2 Calcination pour déterminer la perte d'allumage :

On utilise un creuset céramique de masse 1, On va mettre 2 g d'échantillon (l'ensemble creuset + échantillon = masse 2), Puis on réalise la calcination à une température de 1050 C° pendant une heure dans un four à moufle, puis on conserve l'échantillon et le creuset en céramique 10 min dans un dessiccateur et enfin à nouveau on pèse le creuset en céramique avec l'échantillon calciné (masse 3).

On calcule la perte au feu utilisant la formule suivante :

$$PF\% = \frac{poid\ 2 - poid\ 3}{poid\ 2 - poid\ 1} * 100$$

$$PF\% = \frac{69-68.7}{69-67} * 100 = 15$$

Figure 3 : Creuset contenant l'échantillon sous forme poudre.

1.3.3 Mise en forme de l'échantillon :

Au cours de cette opération on va peser un mélange :

- 1 g d'échantillon calciné dans un creuset en céramique.
- (4+4) g de (LiTB + LiMB), + 0,02 LiI dans un autre creuset en céramique.

Il est très important de bien mélangé l'échantillon et le mélange (LiTB + LiMB+ LiI). On ne doit pas verser l'échantillon dans le récipient du mélange (LiTB + LiMB+ LiI). En même temps, on verse une petite quantité du mélange (LiTB + LiMB+ LiI) dans le récipient de l'échantillon et on mélange l'ensemble. Ensuite on verse un peu plus du mélange (LiTB + LiMB+ LiI) et on les mélange, on répète cette opération plusieurs fois. On transfère très soigneusement le mélange total du creuset en céramique au creuset en platine.

Figure 4 : Creuset en platine destiné à opération de fusion.

On place le creuset en platine sur la machine à fusion (voir figure 5) et on la démarre après avoir effectué le réglage : alimentation, temps de fusion, temps d'agitation, temps de refroidissement …etc.

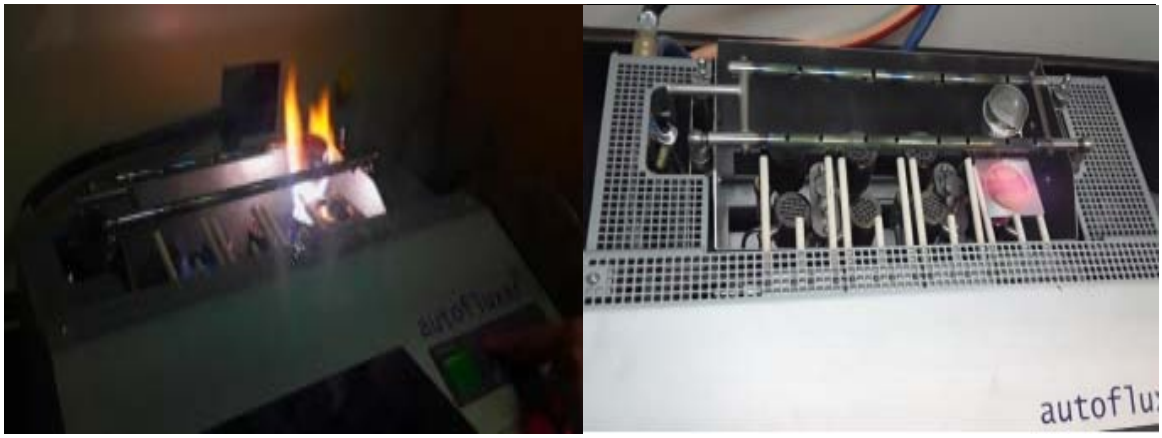


Figure 5 : Machine à fusion.

En fin on récupère l’échantillon après refroidissement.

Figure 6 : Forme finale de l’échantillon (à base de MgO).

- **Remarque :**

Nous pouvons constater que les pierres sont homogènes sans bulles d’air et sans fissures. L’échantillon est donc prêt à être analysé par le spectromètre à XRF.

1.3.4 Analyse :

L'analyse de concentration est la tâche la plus fréquemment utilisée dans le contrôle de processus.

Une analyse quantitative n'est possible que si une méthode a été créée et si l'instrument a été calibré pour la qualité à analyser.

Figure 7 : Spectromètre à XRF.

Résumé

Le travail expérimental que nous avons effectué au sein du complexe sidérurgique Algerian Qatari Steel « AQS » a pour objectif d'étudier le phénomène de dégradation des briques réfractaires basiques à base de MgO, qui sont en contact direct avec le métal. Sachant que ces briques sont utilisées pour le revêtement du four à arc électrique ainsi pour du four à poche. Pour bien maitriser ce phénomène nécessite à effectuer des analyses appropriées notamment analyses physico-chimiques, mécaniques et thermiques (résistance au choc thermique).

La phase la plus importante dans cette étude est le mécanisme d'interaction brique réfractaire – laitier de four à poche, car le mécanisme indiqué détermine le comportement des briques à l'origine chimique (attaque chimique). Notre étude nous a permis de conclure que :

- La dégradation des briques est causée par la résistance aux chocs thermiques ce qu'il résulte la transition de phase et par conséquent produite la propagation des fissures.
- La dégradation des briques à l'origine chimique traduit par l'interaction avec le laitier de four à arc conduisant la corrosion des briques basiques causée par l'attaque chimique.
- L'usure d'une brique réfractaire est liée avec le nombre de cycle et la perte de masse, par conséquent la résistance au choc thermique est en relation directe avec le four à poche.

Mots clés : Dégradation, Briques réfractaires, Four à arc, Four à poche, Résistance au choc thermique, Attaque chimique, Laitier de four à poche.

Abstract

The experimental work we carried out in the Algerian Qatari Steel «AQS» complex aims to study the degradation phenomenon of basic refractory bricks based on MgO, which are in direct contact with the metal. Knowing that these bricks are used for the coating of the electric arc furnace as well as for ladle furnace. To properly control this phenomenon requires appropriate analyses including physico-chemical, mechanical and thermal analyses (thermal shock resistance).

The most important phase in this study is the refractory brick-ladle slag interaction mechanism, as the indicated mechanism determines the behaviour of bricks with chemical origin (chemical attack). Our study concluded that:

- The degradation of the bricks is caused by the thermal shock resistance resulting in the phase transition and therefore produced the crack propagation.
- The degradation of bricks of chemical origin is due to the interaction with the arc furnace slag leading to the corrosion of the basic bricks caused by the chemical attack.
- The wear of a refractory brick is related to the number of cycles and the loss of mass, therefore the thermal shock resistance is directly related to the ladle furnace.

Keywords: Degradation, Refractory bricks, Arc furnace, Ladle furnace, Thermal shock resistance, Chemical attack, Pocket furnace slag.

الملخص

يهدف العمل التجريبي الذي قمنا به في مجمع "AQS"(الشركة الجزائرية القطرية للصلب) إلى دراسة ظاهرة التحلل المتمثلة في الطوب الحراري (MgO)، وهو على اتصال مباشر بالمعدن المنصهر. مع العلم أن هذه الطوب يستخدم لبناء فرن القوس الكهربائي وكذلك الفرن الجيب. إن السيطرة السليمة على هذه الظاهرة تتطلب إجراء التحليلات المناسبة بما في ذلك التحليلات الفيزيائية، الكيميائية، الميكانيكية والحرارية (مقاومة الصدمات الحرارية).

وتتلخص المرحلة الأكثر أهمية في هذه الدراسة في آلية تفاعل الخبث مع الطوب الحراري لفرن الجيب، حيث تحدد الآلية المشار إليها سلوك الطوب ذو الأصل الكيميائي (الهجوم الكيميائي). ولخصت دراستنا إلى أن:

- يحدث تحلل الطوب بسبب مقاومة الصدمة الحرارية التي تؤدي إلى انتقال الطور وبالتالي ينتج عنها انتشار الشقوق.
- يعزى تحلل الطوب الكيميائي إلى التفاعل مع خبث فرن القوس الكهربائي الذي يؤدي إلى تآكل الطوب الأساسي الناجم عن الهجوم الكيميائي.
- يرتبط تأكل الطوب الحراري بعدد الدورات وفقدان الكتلة، وبالتالي فإن مقاومة الصدمة الحرارية ترتبط مباشرة بفرن الجيب.

كلمات البحث: التحلل، الطوب الحراري، فرن القوس الكهربائي، فرن الجيب، مقاومة الصدمة الحرارية، الهجوم الكيميائي، خبث فرن الجيب.