



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia-JIJEL

Faculté des Sciences Exactes et Informatique

Département de chimie

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Chimie

Spécialité: Chimie des matériaux

Thème

Elaboration et étude des propriétés de l'acier de l'entreprise (AQS)

Présenté par: Rafik Hennous

Soutenu le : 07/07/2022 ,devant le jury composé :

M ^{me} . Naima Boutal	MCB	Université de Jijel	Présidente
M ^{me} . Souad Bensam	MAA	Université de Jijel	Examinatrice
Mr. Mosbah Ferkhi	Professeur	Université de Jijel	Encadreur
Mr. Okba Boughedda	Ingénieur	Algerian Qatari Steel	Co-encadreur

Année universitaire **2021/2022**

Remerciements

Avant tout, Je remercie 'Allah' le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Je souhaite tout d'abord remercier mon encadreur **Pr.Mosbah Ferkhi**. Et mon co-encadreur **Mr.Boughada Okba** , pour sa grande disponibilité, ses conseils avisés et son aide tout au long de cette mémoire.

Mes remerciements s'adressent également au **Ma. Souad Bensam** et **Ma. Naima Boutal** . membres de jury qui m' a honoré et a accepté d'assister à ma soutenance.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de chimie .

Mes sincères remerciements à mes collègues de travail, à toute l'équipe de four électrique(**EAF**), four à poche(**LF**) , **laboratoire** , **DRI** tout le personnel de l'aciérie électrique (**SMS**) et toute personne ayant contribué de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

A tous ma famille

A tous mes amis et mes collègues

Et

A tous ceux que j'aime

Rafik Hennous

Sommaire

Introduction générale	1
Références	3
ChapitreI : Description du Complexe Sidérurgique Bellara	
I .1. Introduction	3
I .2 Description du projet :	4
I.3. Unités principales du processus sidérurgique :	4
□ Unité de Réduction Directe (DRI) :	5
□ Deux Aciéries Électriques	6
□ Unité de laminage	6
I.4. Unités auxiliaires :	7
I.4.1. Unité de séparation d'air (ASU pour Air Separation Unit) :	7
I.4.2. Unité de production de chaux :	9
I.4.3. Unité de traitement des eaux industrielles :	10
I.5.Produits de l'entreprise :	11
Références	15
ChapitreII : Description du processus d'élaboration du l'acier	
Introduction:	16
II.2. Description du processus industriel	17
II.2.1. Unité de Réduction Directe :	18
II.2.1.1.Reformage :	19
II.2.1.2.Réduction :	20
II.2.1.3.Aspectsstœchiométriques:	22
II. 3.Procédé de métallisation élevée :	25
II.4. Aciérie électrique :	25
II.5.L'extraction des scories (déslaging) :	28
II.6. Four d'affinage en poche (LRF pour Ladle Refining Furnace) :	28
II.7. Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers :	32
II.8.La machine de coulée continuée (CCM pour Continuous Casting Machine) :	34
II.9. Laminage à chaud :	35
Références	37
ChapitreIII : Contrôle de qualité de la matière au cours de production d'acier	
III-1.Introduction :	38
III-2. Matière première :	40
III-3.Contrôle de qualité de la matière première arrivée :	40
III-3.1.Echantillonnage :	41
III-3.2.Tests physiques :	41

III-3.2.1.Humidité :	41
III-3.2.2Distribution de la granulométrie :	41
III-3.2.3 . Résistance au concassage (CCS pour compression crush strong) :	43
III-3.3.Analyses chimiques :	45
III-3.3.1.Titration :	45
III-3.3.2.Détermination des impuretés :	46
a-Détermination de SiO ₂ :	47
b-Détermination des autres impuretés :	47
c-Dureté totale (CaO et MgO) :	47
d)L'alumine (Al ₂ O ₃) :	48
III-4. Contrôle de qualité du fer produit par réduction directe (DRI) :	49
III-5.Contrôle de qualité et de quantité des gaze pendant et avant la réduction :	50
III-6. Les Analyses lors de la transformation du Fer réduit (DRI) en Acier :	52
III-7. Préparation mécaniques des éprouvettes :	53
III-8. Analyse par Spectrométrie à Emission Optique des éprouvettes :	54
III-9. Composition chimique de la nuance des billettes destiné à la fabrication de rond à béton et fil à machine.	57
III-10. Contrôle de qualité des biellettes produites :	58
III-11. Analyse par Spectrométrie à Emission Optique des biellettes produites :	59
III-12. Analyse micro et macro-structurale :	59
III-13. Analyses élémentaires (C, S, O, N):	60
III-14. Propriétés microstructurales :	63
III-15. Compositions chimiques :	63
III-16. Propriétés mécaniques :	63
III-17.Propriétés thermiques:	70
Références	71
Conclusion générale	72

Introduction Général

Introduction générale

Depuis des milliers d'années, l'utilisation du fer a été un facteur majeur du succès de nombreuses civilisations dans ce monde. Son utilisation a commencé avec le fer métallique dans les météorites et s'est accélérée avec la découverte de certaines roches, le contact avec le charbon de bois et la découverte de flammes à haute température, qui ont produit de petites quantités de ce matériau. Une fois contrôlé, un alliage de fer et de carbone connu plus tard sous le nom de fer forgé peut être créé. Ainsi commença la production de masse de fer, en particulier d'acier.

Initialement, l'industrie sidérurgique était limitée par l'utilisation de petits fours autonomes qui produisaient du fer mélangé avec des scories et d'autres impuretés. Mais avec la création de fours plus grands et plus efficaces qui fonctionnent à des températures élevées, du fer fondu est créé, ce qui facilite la séparation de la gangue du fer. Son utilisation a connu un essor fulgurant au XXe siècle. Avec les progrès technologiques et la découverte de nouveaux procédés de conversion du fer fondu en acier, la qualité s'est grandement améliorée. Ainsi, la soi-disant «réduction indirecte» ou fusion a été développée, en utilisant des hauts fourneaux pour produire du fer à partir de minerai de fer et divers autres réacteurs (foyer ouvert, four à oxygène basique, four à arc électrique), la production d'acier a également été augmentée.) pour la sidérurgie.

Malheureusement, cette industrie sidérurgique est un émetteur intensif de dioxyde de carbone (un gaz à effet de serre), où la production d'acier se fait en séparant le fer et l'oxygène du minerai de fer et nécessite une grande consommation d'énergie, dont la plupart provient de combustibles fossiles. Par conséquent, ce processus produit inévitablement une grande quantité de dioxyde de carbone, produisant 0,8 tonne de dioxyde de carbone Décerné pour la production d'une tonne d'acier à partir de minerai par le procédé conventionnel de haut-fourneau-convertisseur. L'industrie sidérurgique représente 31 % des émissions industrielles mondiales de CO₂, ce qui équivaut à 46 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre [1-2]. Face à ce constat, la sidérurgie mondiale a entrepris diverses actions de recherche et développement pour trouver de nouveaux procédés pouvant conduire à des réductions significatives de ces émissions de CO₂.

La voie dite du fer réduit direct (DRI), qui utilise du gaz naturel reformé ainsi qu'un recyclage du gaz récupéré avec H_2 et CO pour réduire les oxydes de fer, émet moins de CO_2 que les hauts-fourneaux classiques [3-4], qui sont actuellement, une technologie de pointe, en cours de développement et d'utilisation, fera l'objet de ces travaux dans le complexe sidérurgique Belara d'Algérie Qatar Steel Corporation (AQS), à 46 kilomètres de la ville de Jijel dans l'Est algérien.

Le but de ce travail est de décrire le procédé DRI du complexe AQS pour la production de l'acier de construction aux propriétés requises pour le marché international, et d'étudier les mécanismes microstructuraux et leurs conséquences qui interviennent lors de la déformation à froid de l'acier préalablement traité vis-à-vis à l'évolution des propriétés.

Dans cette étude une comparaison entre la composition chimique et les propriétés mécaniques de deux types de fer différents a été réalisée. Après une description détaillée sur le Complexe Sidérurgique de Bellara (Chapitre I), le Chapitre II est réservé à la description du processus d'élaboration du l'acier. Le dernier Chapitre (Chapitre III) permet de suivre les étapes de contrôle de qualité de la matière au cours de production de l'acier. Ce travail est clôturé par une conclusion générale.

Références

- [1]. Quader, M.A.; Ahmed, S.; Ghazilla, R.A.R.; Ahmed, S.; Dahari, M. A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 50, 594–614.
- [1]. van Ruijven, B.J.; van Vuuren, D.P.; Boskaljon, W.; Neelis, M.L.; Saygin, D.; Patel, M.K. Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resour. Conserv. Recycl.* 2016, 112, 15–36.
- [1]. Buergler, T.; Kofler, I. Direct reduction technology as a flexible tool to reduce the CO₂ intensity of iron and steelmaking. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte* 2017, 162, 14–19.
- [1]. Huitu, K.; Helle, M.; Helle, H.; Kekkonen, M.; Saxen, H. Optimization of Midrex Direct Reduced Iron Use in Ore-Based Steel making. *Steel Res. Int.* 2015, 86, 456–465.

Chapitre

**Description du Complexe Sidérurgique de
Bellara**

I.1. Introduction

La société algérienne qatarie steel (AQS) est une entreprise publique économique, une société mixte algéro-qatarie résultant d'un partenariat, née pour exécuter le nouveau complexe sidérurgique de Bellara. 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 d'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'AQS occupe une place importante dans la carte de l'industrie sidérurgique nationale et régionale.



Figure I-1. Vue au aérien du complexe de Bellara.[1].

SIDER et QATAR STEEL, les partenaires principaux d'AQS, sont des sociétés avec une longue Expérience dans le domaine de la sidérurgie, qui ont la responsabilité de gérer et opérer les deux grands complexes sidérurgiques de l'Algérie (Complexe d'El Hadjar Annaba) et du Qatar (Complexe MIC près de Doha) respectivement. La technologie implantée au Complexe MIC de Qatar Steel et celle de la Réduction Directe, similaire à la technologie retenue pour le Complexe de Bellara

I.2 Description du projet :

Réalisation en 2 phases d'une Usine Sidérurgique pour une capacité de quatre (04) millions de tonnes des produits sidérurgiques. Démarrage prévu de phase 01 en 2017 pour une production de deux (02) millions de tonnes de produits sidérurgiques par an (Ronds à Béton et fil machine) par la réalisation de :

- ♣ Une Unité de Réduction Directe de 2 500 000 tonnes de pré réduit à partir des Pellets importées.
- ♣ Deux Aciéries électriques pour la fabrication de 2 200 000 tonnes de billettes par an.
- ♣ Trois Laminoirs pour produire 1,5 MT de Ronds à Béton et 0,5 MT de fil machine.
- ♣ Une Unité de Gaz Industriels.
- ♣ Une Unité de Production de Chaux.
- ♣ Une Unité de Production d'Eau Industrielle.
- ♣ Un Poste Electrique Haute Tension.
- ♣ Les Installations de Manutention et Transport (Port et Site).
- ♣ Les Ateliers Centraux de Maintenance.
- ♣ Les Magasins de Stockage des Pièces de Rechange et des Ferro-alliages.
- ♣ Les Locaux Sociaux.

Actuellement la première phase (1) est totalement terminée.

La deuxième phase est la mise en marche de l'unité de la DRI cette année avec un programme d'investissement qui sera consacré à la production d'autres types d'aciers spéciaux utilisés dans de nombreuses industries amenant ainsi la capacité de production à plus de 4 millions de tonnes par an.

I.3. Unités principales du processus sidérurgique :

Le Complexe sidérurgique de Bellara est doté de la technologie la plus avancée au monde et comprend des unités de production respectueuses de l'environnement, qui garantissent une efficacité maximale de la production et une qualité des produits conforme aux normes internationales .les principales unités de production sont :

- **Unité de Réduction Directe (DRI) :**

La **Figure I-2** montre l'unité de réduction directe avec une capacité de production de 2.5 millions de tonnes par ans de fer réduit.

La réduction directe de l'oxyde de fer est obtenue par réaction chimique de l'hydrogène et du monoxyde de carbone avec l'oxyde de fer. Le préréduit est le fer métallique. Les aspects chimiques et thermiques du processus de réduction sont plus efficaces dans un réacteur de réduction à contre-courant avec une descente uniforme des solides et une montée des gaz, tel que l'arbre de réacteur MIDREX® (réacteur de réduction MIDREX)(dont on retire l'oxygène dans un four de réduction par des gaz de réduction tel-que CO et H₂).



Figure I-2.Unité de réduction directe.

- **Aciéries Électriques :**

(**Figure I-3**) composées de fours arc électrique de capacité totale de production 2 200 000 tonnes par an pour transformer l'acier brut au liquide et en billettes a des caractéristique physico-chimique bien déterminées.



Figure I-3.Aciérie électrique.

- **Unité de laminage :**

(Trois Laminaires) pour l'obtention des produits d'acier désigné à l'expédition soit sous forme lisse ou criblée .Capacité totale de production de 2 millions de tonnes par an de rond à béton et fil machine

I.4. Unités auxiliaires :

I.4.1. Unité de séparation d'air (ASU pour Air Séparation Unité) :

Le processus de séparation de l'air dans les gaz principaux qui composent l'air par le processus de distillation fractionnée, et le but du traitement de l'air est de se débarrasser des impuretés telles que la poussière et l'humidité. Puis les gaz sont introduits dans la distillation partielle colonne, où la température diminue progressivement jusqu'à ce que les composants commencent à se séparer sous la forme d'un liquide. Le gaz avec le point d'ébullition le plus élevé est d'abord liquéfié et séparé, et le processus se poursuit jusqu'à ce que tous les gaz constitutifs soient obtenus sous forme liquide, et le gaz liquéfié résultant les gaz se caractérisent par un haut degré de pureté. Dans ce processus, le dioxyde de carbone dans l'air doit être éliminé au préalable car il peut se solidifier et obstruer le système.

Il existe d'autres façons d'obtenir les composants de l'air séparément, par exemple, l'oxygène peut être obtenu par électrolyse de l'air, mais la plupart du temps, il est limité à la séparation d'un seul gaz des gaz composants, donc la distillation fractionnée est la plus simple.

Processus où plus d'un composant dans sa forme la plus pure et est le processus industriel le plus largement utilisé maintenant bien que d'autres processus aient été développés.



Figure I-4. Unité de séparation d'air.

Dans le processus de séparation de l'air, un ou tous les principaux gaz qui composent l'air sont extraits, et les trois principaux composants sont l'azote (78,1 %), l'oxygène (20,9 %) et (0,9 %), les gaz résiduels dans l'air sont à l'état de traces et sont généralement non récupérés.

Dans les très Grandes Unités Air (ASU) le néon, le xénon et le krypton sont récupérés en petites quantités, la séparation cryogénique de l'air utilise différents points de condensation ou d'ébullition des composants de l'air pour permettre la séparation par distillation aux températures cryogéniques et à la pression atmosphérique les principaux composants d'air ont les points de condensation ou d'ébullition suivants :

- Azote -196°C
- Oxygène -183°C
- Argon -186°C

Puisque l'air est un simple mélange, la liquéfaction et la distillation de l'air fournissent un processus pour la séparation réussie de l'azote, de l'oxygène et de l'argon.

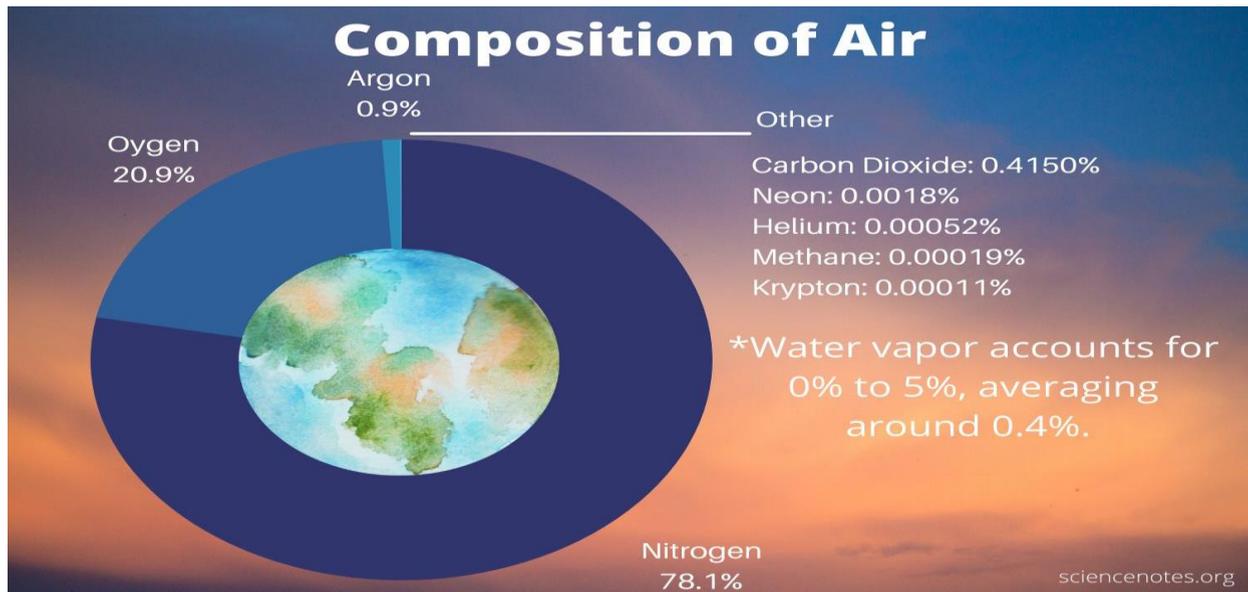


Figure I-5. Composition d'air[3].

I.4.2. Unité de production de chaux :

La chaux est produite en calcinant le carbonate de calcium (ou de magnésium) à températures supérieures à 800 °C et causer la décarbonatation de la matière première pour produire de l'oxyde de calcium (CaO ou chaux vive). La chaux est ensuite maintenue à des températures comprises entre 1200 °C et 1300 °C, pour ajuster la réactivité. La chaux légèrement calcinée est la plus réactive et communément employée en sidérurgie. L'équipement de calcination est constitué de batteries de fours droits équipés de filtres.



La chaux dolomitique vive est produite à partir de gisements de calcaire dolomitique de qualité supérieure, c'est-à-dire du calcaire contenant entre 40 et 44 % de carbonate de magnésium (MgCO₃).





Figure I-6. Unité de production de chaux.

I.4.3. Unité de traitement des eaux industrielles :

Le système de traitement des eaux industrielles du complexe est composé des stations de traitement suivantes :

- une station spécifique de conditionnement et traitement des eaux de refroidissement pour chacune des unités du processus sidérurgique (réduction directe, aciérie et laminage) reliées à une station finale centralisée de traitement, pour l'ajustement final de la composition.
- Les stations sont conçues et disposant de technologies d'épuration nécessaires pour que la composition de l'effluent final soit strictement conforme aux valeurs limites applicables.
- Le complexe a une capacité pleine et autonome de traitement de tous le types d'eaux usées générées et d'obtenir le niveau de qualité d'eau finale conforme aux réglementations environnementales applicables.



Figure I-7.Unité de traitement des eaux industrielles.

I.5.Produits de l'entreprise :

L'AQS commercialisé une large gamme de produits sidérurgiques acier en quantité et en qualité, à des prix attractifs et une fiabilité supérieure conforme aux exigences clients, aux exigences normatives et aux exigences légales et réglementaires. Ses produits sont fabriqués avec une technologie de pointe entièrement automatisée, avec une grande capacité de production et de stockage de produits finis de différentes dimensions.

➤ **Billette**

La billette est un produit semi-fini de section $150 \times 150 \text{ mm}^2$ et de longueur de 12 m de l'industrie métallurgique, notamment de la sidérurgie. Obtenus par le processus de coulée continue destiné à la fabrication de rond à béton, de fil machine et la fabrication se base sur le principe du laminage à chaud.

➤ **Fil machine**

Fil machine de section ronde de diamètre variant entre de 5.5 mm à 14 mm de haute qualité. Le fil machine rond et lisse est obtenu par laminage à chaud conformément à la norme Algérienne NA 8634 et selon les normes internationales. Avec une Capacité de production de 500 000 tonnes/an.

➤ **Rond à béton**

Produit laminé à chaud en acier d'usage multiple pour la construction haute adhérence, soudable de nuance RB 500. Le produit rond à béton soudable produit par l'AQS est conforme aux exigences de l'arrêté interministériel du 8 Mars 1997, à la norme NA8634(2015) et à l'ISO 6935-2 (2015). Avec une gamme large de diamètres : 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32, 40 mm et une Capacité de production de 1 500 000 tonnes/an,

Les figures I-8 et I-9 et I-10 et I-11 et I-12 représentent les différents produits fabriqués par L'entreprise.



Figure I-8. Rond à béton

Figure I-9. Fil à machine

Figure I-10. Billettes

➤ **DRI (Les préproduits) :**

Les préproduits (DRI : Direct Reduced Iron) (**Figure I-11**) issus de la réduction partielle du minerai de fer par des gaz riches en CO ou H₂, ne contiennent aucun résiduel et constituent pour le four à arc une source importante d'approvisionnement en fer non pollué. Caractérisés par leur degré de métallisation, leur teneur en carbone et en gangue, les préproduits se présentent généralement sous forme de billes de diamètre inférieur à 20 mm Pour permettre leur transport et

stockage les pré-réduits peuvent être compactés à chaud sous forme de briquettes (HBI : Hot Briqueted Iron).

L'utilisation des pré-réduits ne nécessite pas une adaptation particulière des fours à arc.



Figure I-11: DRI[3].

➤ **Chaux vive et dolomitiques :**

La chaux calcique vive est fabriquée à partir d'excellents gisements de pierre calcaire (**Figure I-12**) à haute teneur en calcium qui contient moins de 5 % de carbonate de magnésium. L'oxyde de calcium (CaO), mieux connu sous le nom de chaux ou de chaux vive, est un composé chimique couramment utilisé. Il s'agit d'un solide blanc, alcalin et cristallin.

Les produits de chaux vive dolomitique ont plusieurs usages, notamment leur utilisation comme fondant et conditionneur de laitier dans la fabrication de l'acier, les applications environnementales et le traitement des eaux usées.



Figure I-12: La Chaux[3].

Références

- [1]. Documentation interne de l'entreprise, Algerian Qatari Steel.
- [2]. Site officiel de l'entreprise <https://aqs.dz>.
- [3]. <https://www.almrsl.com/post/1138603>.
- [4]. [separation-of-components-of-air-is-possible-by-class-7-chemistry-cbse](#).
- [5]. [graymont/fr/produits/chaux-vive/chaux-dolomitique-vive](#).

Chapitre II

Description du processus d'élaboration de l'acier

Introduction:

Le fer est fabriqué en éliminant l'oxygène et les autres impuretés du minerai de fer. Lorsque le fer est combiné avec du carbone, de l'acier recyclé et de petites quantités d'autres éléments, il devient de l'acier.

L'acier est un alliage de fer et de carbone contenant moins de 2 % de carbone et 1 % de manganèse et de petites quantités de silicium, de phosphore, de soufre et d'oxygène.

L'acier est le matériau d'ingénierie et de construction le plus important au monde. Il est utilisé dans tous les aspects de nos vies ; dans les voitures et les produits de construction, les réfrigérateurs et les machines à laver, les cargos et les scalpels chirurgicaux.

Aujourd'hui, presque tous les sous-produits formés lors de la fabrication de l'acier sont utilisés dans de nouveaux produits. Cette approche minimise la quantité de déchets envoyés à la décharge, réduit les émissions et préserve les matières premières.

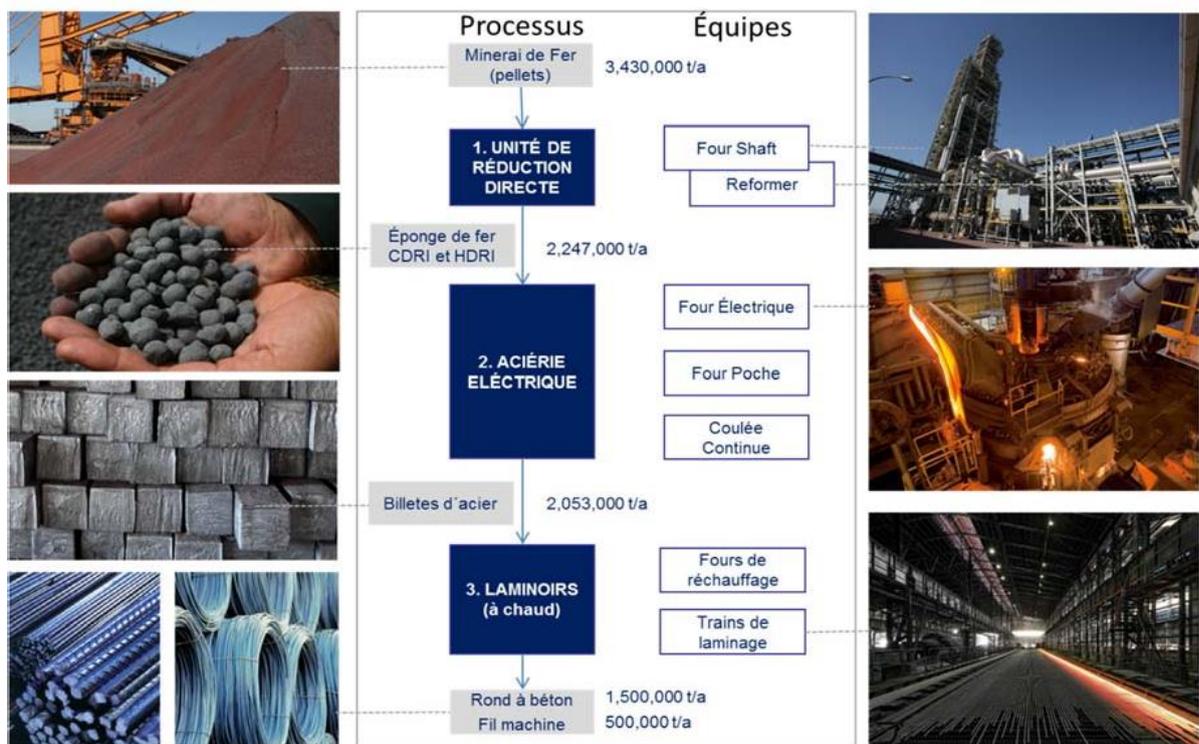


Figure II-1. Étapes technologiques et bilan matière(Phase1)

Les pellets de minerai seront importés, transportés par navire, déchargés et stockés au Port industriel de Djendjen, au niveau de la concession d'AQS dédiée à cet effet avant son transfert par voie ferrée au Site de Bellara en raison de 3,5 millions de tonnes par an pendant la première phase et 7 millions de tonnes au total en Phase 2

II.2. Description du processus industriel

Le processus technologique industriel pour la fabrication de produits sidérurgiques se développe en 3 étapes :

- Seulement dans la première étape (Réduction Directe) il y a une transformation chimique intense de la matière première (le Fer combiné avec l'oxygène et en état d'oxydation III passe au fer métallique en état d'oxydation 0).
- La 2ème étape au niveau de l'aciérie électrique le fer métallique est transformé en acier en le chauffant au point de fusion et l'ajoute des éléments d'addition.
- La 3^{ème} étape dans laminoirs, Le Fer métallique subit une transformation principalement physique (**Figure II-2**). Parmi les procédés DRI, les fours à cuve représentent plus de 82 % de la production mondiale de fer DRI. Les deux principaux procédés étant MIDREX (65%), comme le montre la (**Figure II-3**) et HYL-ENERGIRON (17%).

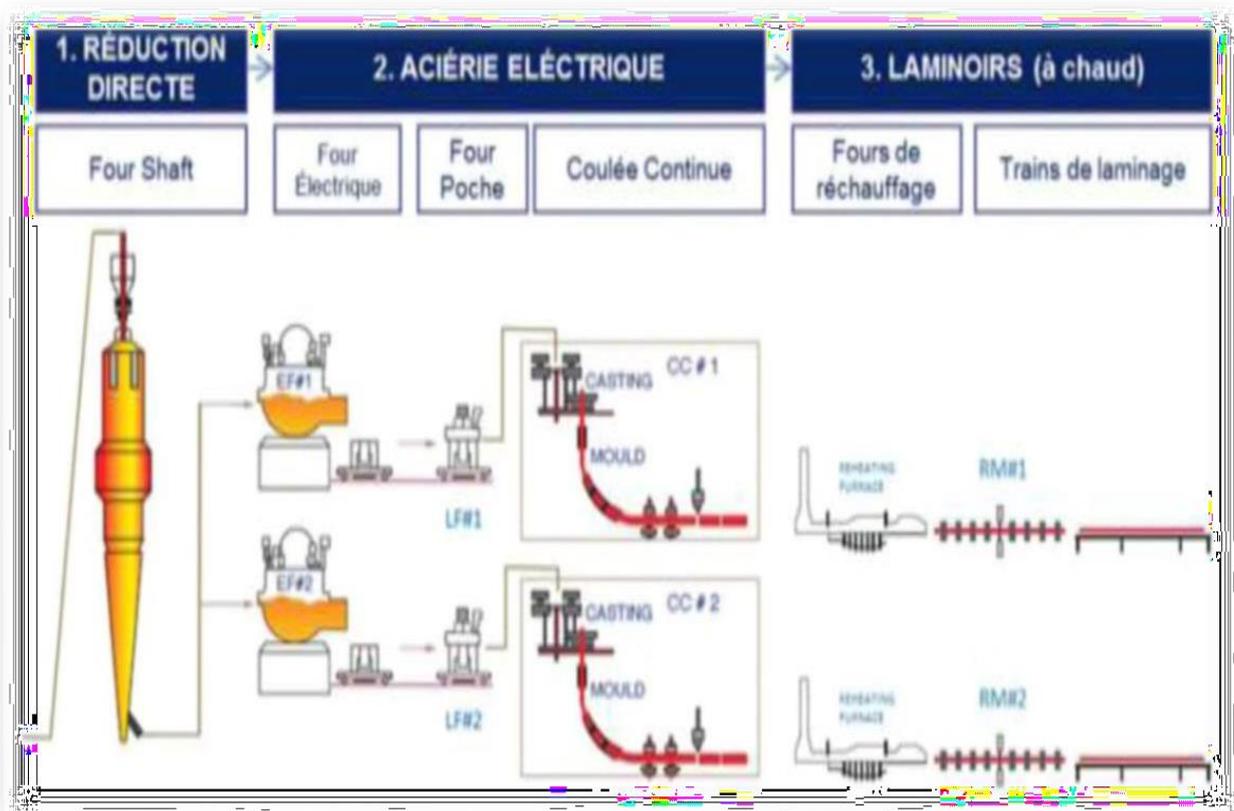


Figure II-2.Processus Industriel [2].

II.2.1. Unité de Réduction Directe :

Le procédé MIDREX installé à l'usine Bellara utilise le gaz naturel comme source de gaz réducteur et source d'énergie. Une installation de réduction directe de type MIDREX est composée de deux unités principales :

- Le four à cuve où le minerai de fer est réduit.
- Le reformeur qui génère le gaz de réduction envoyé dans le four à cuve (H_2 et CO).

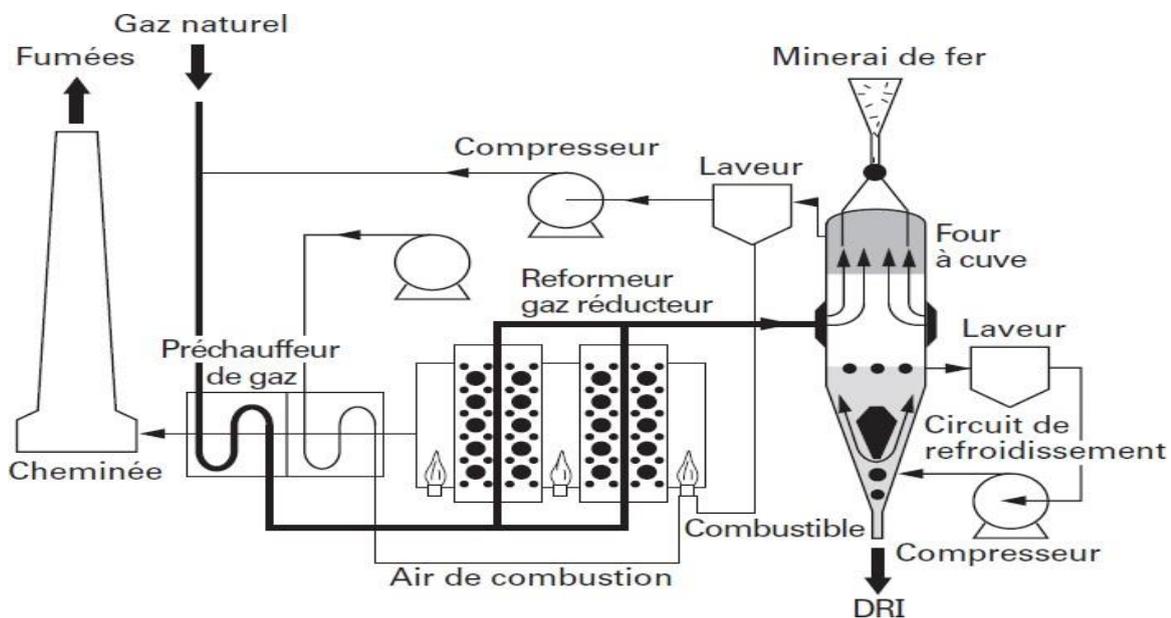


Figure II-3. Schéma du procédé MIDREX[3].

Le procédé de réduction directe MIDREX utilise un débit continu de gaz réducteurs pour extraire chimiquement l'oxygène des minerais de fer.

Les gaz réducteurs (l'hydrogène et le monoxyde de carbone) sont produits dans le reformeur et sont introduits dans le réacteur de réduction à des concentrations et température contrôlées.

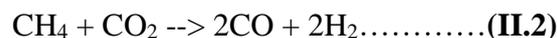
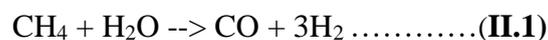
Le gaz réducteur s'écoulant à contre-courant dans le minerai descendant, les gaz réducteurs réchauffent, réduisent et carburent le minerai vers la composition désirée[3].

II.2.1.1.Reformage :



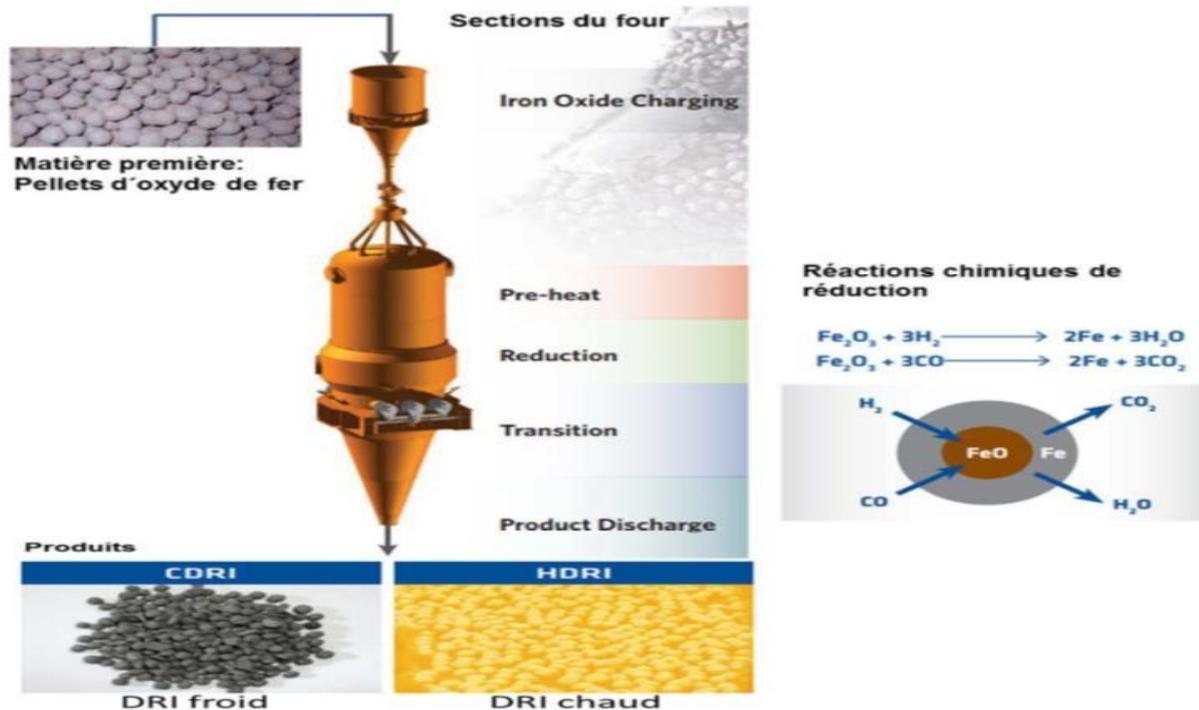
Figure II-4:Reformeur [3].

Le gaz réducteur utilisé dans le réacteur MIDREX est produit en faisant circuler à nouveau une partie des gaz de gueulard depuis le réacteur. Ces gaz sont d'abord nettoyés par le laveur de gaz de gueulard, puis comprimés et mélangés avec le gaz naturel et passés à travers des tubes chauds remplis de catalyseurs. Ces tubes sont réchauffés dans un réacteur revêtu de réfractaire appelé reformeur. Pour les procédés de réduction faisant usage de gaz naturels, le CO et H₂ nécessaires à la réduction sont tirés du gaz naturel reformé par vapeur (vapeur H₂O) ou du CO₂ à températures élevées. Le gaz naturel est principalement le CH₄ (méthane). Ce qui suit sont les réactions de reformage de base, chacune d'entre elles requiert une quantité considérable de chaleur et aboutit à une expansion volumétrique :



Les considérations par rapport à l'équilibre évitent que les réactions ci-dessus débouchent sur une conversion totale en CH₄. Quelques molécules de H₂O résiduelles et de CO₂ seront présentes dans le gaz reformé chaud et il est donc demandé d'éviter les problèmes de dépôt de carbone dans le catalyseur. Le reformage le plus efficace peut arriver à des taux de 95 % de CO et de H₂ et de plus de 5 % de CO₂ et de H₂O dans le gaz reformé chaud. Le reformage catalytique du gaz naturel est accompli en utilisant un catalyseur de nickel avec des températures allant de 900 à 1000 °C.

Le reformage provoque une augmentation d'environ 30,0 % du volume de gaz. Après être passé par la zone de réduction, ce gaz en excès est mélangé avec le gaz naturel et est utilisé avec les brûleurs du reformeur.[3].Ce qui suit est un bref exposé concernant certains des fondamentaux de la réduction directe des minerais de fer dans le processus Midrex.



II.2.1.2.Réduction :

Figure II-5. Procédé de réduction [3].

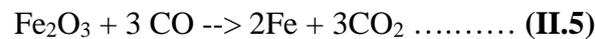
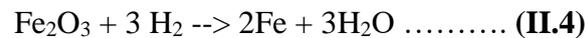
Les boulettes d'oxyde de fer utilisées pour la réduction directe contiennent environ 30,0 % d'oxygène en poids. En réduction directe, l'oxygène de l'oxyde de fer réagit avec le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H₂) à températures élevées résultant en du fer métallique, du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau. Les réduits du CO et de H₂ sont connus sous le nom de réducteurs. Les fers oxydés du CO et de H₂ sont connus sous le nom d'oxydants.

Le potentiel de réduction du gaz utilisé pour la réduction est lié au pourcentage de CO, plus le H₂ dans le gaz, divisé par le pourcentage de CO₂, plus le H₂ dans le gaz. Ceci est connu sous le nom de rapport réducteur-sur-oxydant du gaz, ou qualité du gaz, noté R dans l'équation suivante :

$$R = \frac{CO + H_2}{CO_2 + H_2O} \dots \dots \dots (II.3)$$

Pour réduire l'oxyde de fer en fer métallique, le rapport réducteur-suroxydant doit être supérieur à 2 (de préférence dans la fourchette de 10 à 12 pour un gaz de réduction chaud et frais). Pour atteindre la réduction la plus complète, le débit de gaz de réduction par unité de fer doit être suffisamment grand pour que le gaz réducteur quittant la zone de réduction du réacteur ait un rapport réducteur-sur-oxydant d'au moins 2,.

La partie supérieure du réacteur est appelée zone de réduction. Les réactions chimiques primaires se produisant dans la zone de réduction sont :



Les gaz réducteurs remontent, à contre-courant du minerai descendant, le réchauffent et le réduisent vers la métallisation désirée et lancent la carburation du préréduit. Quand le gaz monte vers la Stockline, le monoxyde de carbone et l'hydrogène sont convertis en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau, et en descendant dans le réacteur, la matière d'alimentation est réduite en fer métallique.

Le taux auquel ces réactions se produisent détermine le temps de résidence nécessaire pour métalliser le produit (généralement de 4 à 6 heures) et la taille d'équipement requise pour atteindre le taux de production cible.

Le temps de réaction dans la zone de réduction doit être suffisant pour réduire l'alimentation en oxyde de fer pour uniformiser les niveaux de métallisation à des niveaux supérieurs ou égaux à 92 %.

Les gaz réducteurs utilisés (gaz de gueulard) sortent par le haut du four à environ 350-450 °C. Le gaz de gueulard passe ensuite dans le laveur de gaz de gueulard, où les gaz sont refroidis et lavés de la poussière entraînée avant d'être recyclés dans le reformeur.

Le fer de réduction directe chaud (HDRI) sort du réacteur de réduction dans le refroidisseur de préréduit, où il est refroidi avant stockage dans les silos de préréduit comme fer de réduction directe froid, CDRI, ou bien il entre dans une chambre de décharge du préréduit pour être déchargé chaud (HDRI) et chargé vers le four électrique à arc.

Le DRI est un produit pyrophorique devant être manipulé avec précaution pour éviter tout contact avec l'eau et doit être stocké dans une atmosphère inerte pour éviter la combustion spontanée [3].

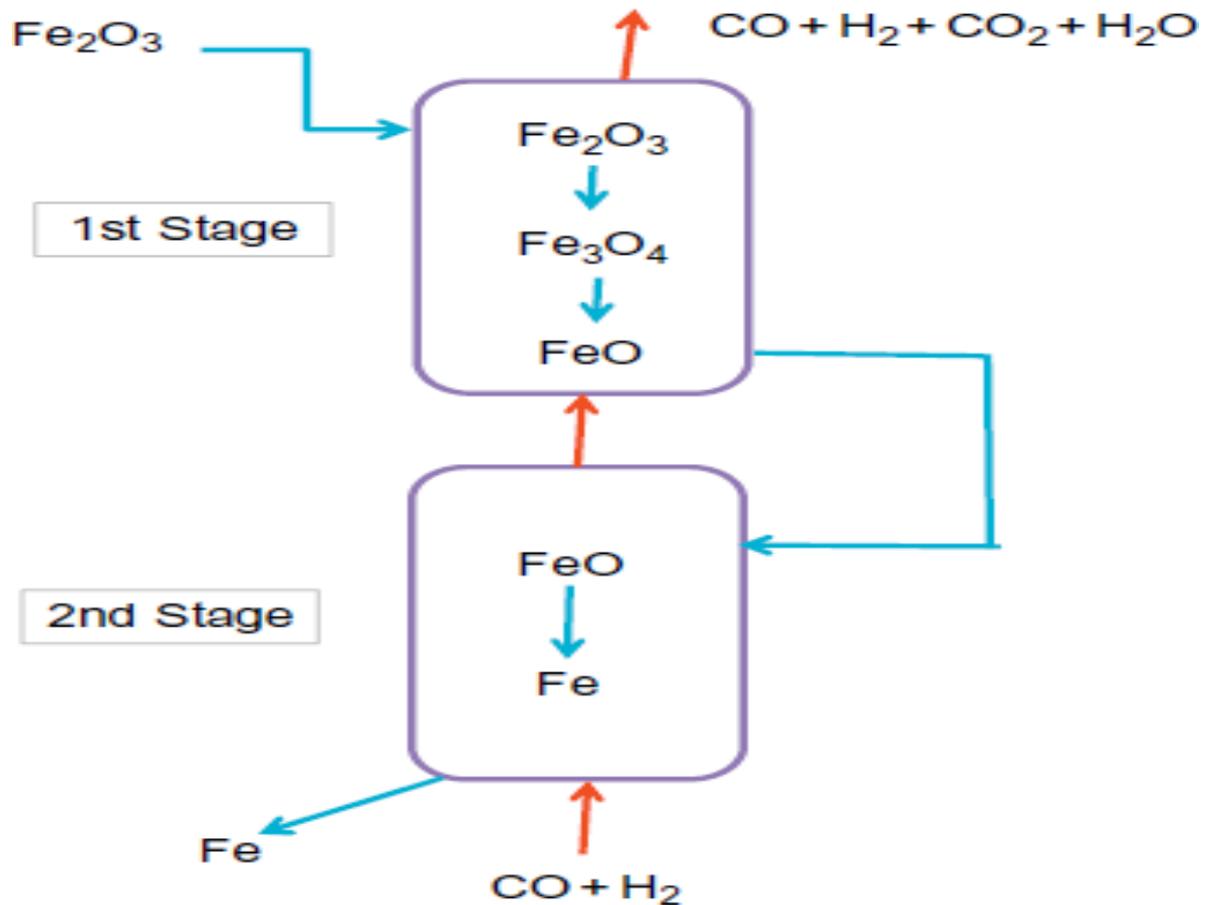


Figure II-6.Processus théorique de réductionnelle fluidisée deux étapes [6].

II.2.1.3.Aspects stœchiométriques:

La (**Figure II. 6**), représente le processus théorique de réductionnelle fluidisée deux étapes. Les aspects stœchiométriques des réactions chimiques correspondantes, qui vont donner les besoins théoriques de tous les réactifs et ,notamment, des agents réducteurs. Les minerais et fondants ne contiennent, en général, le fer que sous forme d'hématite Fe_2O_3 ou de magnétite Fe_3O_4 ; FeO est, en général, combiné en carbonate ou silicates (**Tableau II-2**).

Tableau II-1.Principaux oxydes de fer[4].

Oxyde	Composition (%/t)	Oxygène contenu (t/t de fer)
Fe ₂ O ₃	Fe : 69,94 O : 30,06	0,430
Fe ₃ O ₄	Fe : 72,36 O : 27,64	0,382
FeO	Fe : 77,73 O : 22,27	0,286

Tableau II-2.Données stœchiométriques sur la réduction des minerais de fer par les gaz [4].

Réaction considérée	Besoin stœchiométrique (1)	
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{H}_2\text{O}$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	3/2 mole de H ₂ (3 g) { 0,053 7 t de H ₂ soit 602 Nm ³
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{H}_2 \rightarrow 3 \text{Fe} + 4 \text{H}_2\text{O}$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	4/3 mole de H ₂ (2,666 g) { 0,048 t de H ₂ soit 535 Nm ³
$\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	1 mole de H ₂ (2 g) { 0,036 t de H ₂ soit 401 Nm ³
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	3/2 mole de CO (42 g) { 0,752 t de CO soit 602 Nm ³
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{CO} \rightarrow 3 \text{Fe} + 4 \text{CO}_2$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	4/3 mole de CO (37,333 g) { 0,668 t de CO soit 535 Nm ³
$\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	1 mole de CO (28 g) { 0,501 t de CO soit 401 Nm ³

(1) 1 normomètre cube (Nm³) de gaz correspondant à 1 m³ de gaz mesuré dans les conditions normales de pression (1,013 bar) et de température (0 °C).

Les réactions, très élémentaires, sont indiquées aux **Tableaux II-2 et II-3** ; elles montrent combien il faut de réducteur pour réduire le minerai de fer. La réduction n'est, en général, pas complète, ce qui fait que l'on parle de préréduction et l'on définit souvent :

Tableau II-3.Données stœchiométriques sur la réduction des minerais de fer par les gaz [4]

Réaction considérée	Besoin stœchiométrique	
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{C} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	3/2 mole d'atome de C (18 g) 0,322 t de C
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4 \text{C} \rightarrow 3 \text{Fe} + 4 \text{CO}$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	4/3 mole d'atome de C (16 g) 0,286 t de C
$\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	1 mole d'atome de C (12 g) 0,215 t de C
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3/2 \text{C} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3/2 \text{CO}_2$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	3/4 mole d'atome de C (9 g) 0,161 t de C
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2 \text{C} \rightarrow 3 \text{Fe} + 2 \text{CO}_2$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	2/3 mole d'atome de C (8 g) 0,143 t de C
$\text{FeO} + 1/2 \text{C} \rightarrow \text{Fe} + 1/2 \text{CO}_2$	Pour 1 mole d'atome de Fe (55,85 g) Pour 1 t de Fe	1/2 mole d'atome de C (6 g) 0,107 5 t de C

II. 3. Procédé de métallisation élevée :

Le procédé MIDREX est un procédé intrinsèquement de haute métallisation à cause :

- Du contre-courant du gaz réducteur et de l'oxyde dans le réacteur de réduction.
- D'un temps de résidence de la charge du réacteur de 4 à 6 heures dans la zone de réduction.
- Du gaz réducteurs de la distribution uniforme.
- De la descente uniforme de la charge dans la zone de réduction.

Une métallisation plus faible, un combustible réduit et une consommation d'énergie réduite, si requise, sont obtenus en augmentant le taux de production relatif du gaz réducteur vers la conduite circulaire du réacteur[3].

II.4. Aciérie électrique :

L'aciérie électrique est un outil de production d'acier liquide à partir du DRI produit sur le site. A ces DRI s'ajouteront une part de ferraille, à minimiser, compte tenu de la faible ressource du pays et de leur teneur résiduelle. La conception de cette unité se caractérise par un stockage de DRI, un parc à ferraille et de ferro alliages, deux fours de fusion, des poches de coulée, deux fours poche, deux installations de traitement en poche et une coulée continue de billettes.

Le four de fusion est constitué d'une cuve d'acier garnie de réfractaires et l'énergie nécessaire à la fusion des sources de fer (DRI) est fournie sous forme d'énergie électrique aux moyens d'arcs qui jaillissent entre plusieurs électrodes de graphite et la charge métallique. La charge subit une fusion sous l'effet d'un arc électrique. Le métal liquide est oxydé (affinage oxydant) par rajout d'oxygène gazeux au moyen de lances introduites dans le métal liquide.

La scorie oxydée est ensuite éliminée par surverse, par légère inclinaison du creuset du four. Après cette élimination, le contenu du four est prêt à passer à la phase ultérieure : l'affinage réducteur.

Le métal liquide est alors transféré (vidange) dans une poche, lui-même transféré vers la zone d'affinage réducteur par un chariot roulant. Le deuxième affinage a pour objet d'amener la composition de l'acier aux spécifications souhaitées par le client. La poche utilisée a les mêmes propriétés que celle utilisée pour la fusion initiale mais n'est pas refroidie par eau.



Figure II-7 : Four à arc électrique (EAF) [3].

L'affinage permet l'extraction du phosphore, de l'aluminium, du silicium, du manganèse et du carbone de l'acier liquide vers les scories par un processus d'oxydation. Il se fait grâce à l'apport d'oxygène dans le bain laide du système d'injection avec, et permet également d'obtenir le taux de carbone désiré.

- **Déphosphoration :**

La déphosphoration est une opération métallurgique classique qui permet d'abaisser la teneur en phosphore afin d'éviter la formation de criques internes à l'acier.

- Le phosphore dans tous les cas est un élément nuisible aux propriétés mécaniques de l'acier. Il provoque un défaut appelé couramment « fragilité à froid » et à un moindre degré le défaut de fragilité à chaud.
- les conditions les plus optimales pour la déphosphoration de l'acier sont :

- ✚ Une basicité élevée
- ✚ Une teneur optimale de FeO ($\frac{CaO}{FeO} = 3$)
- ✚ Une basse température (l'oxydation du phosphore est très exothermique)

- **Décarburation :**

La décarburation ou affinage est, comme son nom l'indique, une opération métallurgique qui consiste à éliminer une partie du carbone contenu dans l'acier liquide. Elle n'est possible que dans les fours à arcs l'opération d'affinage ne se limite pas seulement à l'élimination d'une partie du carbone, mais en provoquant le travail du bain, elle améliore considérablement les caractéristiques des aciers. La réaction de base est l'oxydation du carbone dissous par l'oxygène, celui-ci étant apporté soit : sous forme gazeuse, soit sous forme d'oxydes métalliques (FeO par exemple).

Le phosphore et le soufre sont des éléments qui posent plus de problème car ses capacités à rester dans les scories est fortement dépendante de la température, de la basicité et du taux de FeO de la scorie. L'extraction du soufre est très difficile à ce stade car les conditions sont trop oxydantes si la teneur en soufre du bain est trop importante. L'acier devra subir une autre étape d'affinage (Affinage en poche : **Fig. II. 8**).

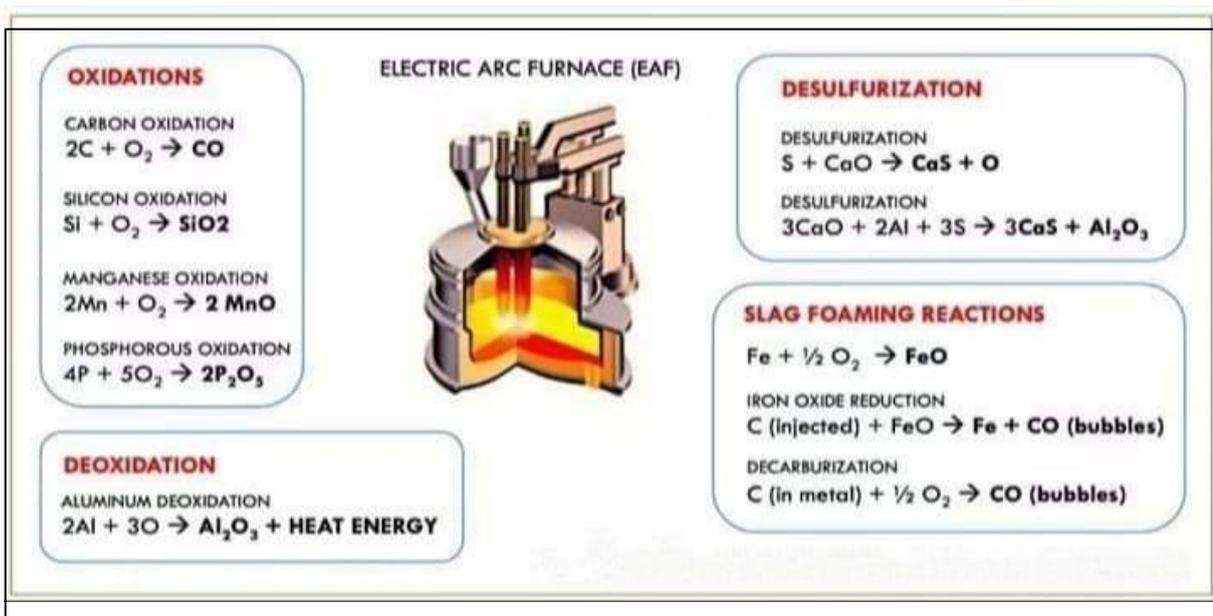


Figure II-8. Réaction chimique lors de l'affinage [5].

II.5.L'extraction des scories (déslaging) :

Durant cette étape, on injecte du carbone dans la scorie pour réduire le FeO restant et permettre la formation de mousse. Le laitier et les scories sont retirés par basculement du four en arrière.



Figure II-9.Pot des cories[3].

II.6. Four d'affinage en poche (LRF pour Ladle Refining Furnace) :

Le four d'affinage en poche est installé dans l'aciérie électrique dans le but d'élaborer des aciers de hautes qualités. Ces dernières années, on a beaucoup parlé de l'efficacité du Ladle Refining Furnace (LRF) dans la production d'acier de construction. En fait, bien qu'il ne s'agisse en aucun cas d'une nouvelle technologie, elle a récemment trouvé plus de faveur auprès des fabricants d'acier, comme l'AQS, qui ont adopté ce procédé de LRF avec plus d'enthousiasme. Les raisons de la popularité croissante du four de raffinage de poche sont liées au procédé de fabrication. En effet, une fois que l'acier est fabriqué dans le four à arc, il est transféré dans la poche pour un affinage supplémentaire, un ajustement chimique, des modifications d'inclusion, etc. Tous ces traitements sont effectués à la poche. De la chaleur supplémentaire est nécessaire pour effectuer ces opérations. La poche est donc munie d'une source de chaleur qui chauffe le métal liquide et compense les pertes thermiques. Ainsi, le four dans lequel la qualité de l'acier liquide est améliorée par affinage et chauffage est appelé four d'affinage en poche. Dans le domaine de « Procédés de Métallurgie », l'affinage de l'acier en poche est également appelé « Métallurgie secondaire ».

Le soufre (S) et le phosphore (P) sont deux éléments cruciaux de l'acier dont les proportions doivent

être contrôlées pour fabriquer un acier de haute qualité. Ces deux éléments s'ils sont présents dans des proportions plus élevées, réduisent la ductilité de l'acier et créent des inclusions. Avec l'aide de LRF, l'acier est affiné en termes de S et P. De plus, le traitement LRF aide à faire flotter les inclusions dans l'acier et à éliminer les gaz dissous. L'acier liquide est brassé dans la poche par bullage pour amorcée les réactions, en réalise ainsi en même temps l'homogénéisation de la température et le contrôle de la composition chimique. Toutes ces opérations permettent de produire des barres d'aciers de meilleure qualité qui sont principalement nécessaires pour les projets d'infrastructure à grande échelle.



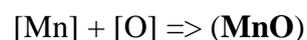
Figure II-10.Four d'affinage en poche[3].

Le processus d'acier affiné LRF est efficace pour fabriquer de l'acier de qualité supérieure via :

- Désulfuration de l'acier,
 - Élimination des inclusions d'oxyde pour rendre l'acier plus propre,
 - Homogénéisation de la température ainsi que de la composition de l'acier en fusion par agitation douce,
 - Dégazage de l'acier par purge de gaz inerte pour atteindre une faible teneur en gaz (oxygène, azote et hydrogène),
 - Économie sur la consommation de ferro-alliages grâce à une meilleure récupération et au maintien de la composition dans une plage étroite,
 - Améliorer l'affinement des grains dans la microstructure,
 - Augmentation de la productivité car le four de fusion se vide plus tôt à basse température,
 - Agir comme un tampon en maintenant l'acier en fusion pour le séquençage entre le four et la coulée continue.
- **Désoxydation**

La désoxydation de l'acier commence pendant l'addition d'alliage lors de la coulée. Le but de la désoxydation est l'obtention d'un acier calmé (acier pauvre en O_2) de façon à éviter la formation de défaut (soufflures), Pendant la solidification de l'acier.

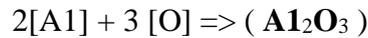
Le carbone a une affinité chimique à l'oxygène plus élevée que celle de manganèse, donc le manganèse ne peut pas désoxyder l'acier liquide au four à arc électrique, seulement avec la diminution de la température de l'acier la capacité désoxydante du manganèse augmente, c'est pour cela que lors de la solidification de l'acier, le manganèse peut désoxyder l'acier. La réaction de désoxydation par manganèse est :



Le silicium est utilisé pour la désoxydation de tout l'acier suite à sa grande affinité chimique à l'oxygène. La réaction de désoxydation par Si est :

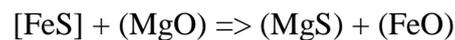
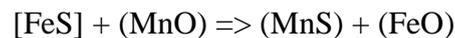
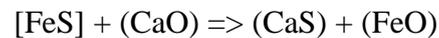


L'aluminium est un fort désoxydant, permet de calmer l'acier complètement et d'éviter l'oxydation du carbone pendant la solidification de l'acier. La réaction de désoxydation par aluminium est :



- **Désulfuration**

La désulfuration est effectuée selon les réactions chimiques suivantes :



La réaction de base est la première, c'est-à-dire que la chaux est le désulfurant le plus efficace. Les conditions optimales de désulfuration sont les suivantes :

- 1- Une température élevée et un laitier basique (riche en CaO).
- 2- Un milieu réducteur (teneur en FeO dans le laitier basse).

Les meilleures conditions sont données pour la désulfuration de l'acier dans le four poche. On y trouve, outre le laitier basique avec faible teneur en FeO en MnO le contact des phases intimes acier/laitier déjà décrit également des températures de processus relativement élevées.

L'efficacité de la désulfuration est encore augmentée par l'utilisation de mélanges de désulfurant spéciaux (peux Sulfex, Desulfat).

II.7. Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers :

- **Carbone(C) :**

Le carbone est un élément essentiel pour durcir l'acier. Le domaine des aciers est limité à moins de 2 %. Au-delà de 0.6 % de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par de hauts niveaux de dureté et qui correspond au domaine des aciers de travail à froid des aciers à coupe rapide. L'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à une réduction des domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

- **Silicium (Si):**

De même que le carbone, l'élément silicium est toujours présent dans les aciers industriels. Il forme facilement des solutions solides avec le fer, aux états delta, gamma ou alpha et aussi avec la cémentite, en diminuant la solubilité de celle-ci. Alors qu'il est surtout présent à l'état de solution solide dans la ferrite, il y en a une petite proportion sous forme combinée, c'est la silice SiO_2 , formant dans le métal des inclusions non métalliques. De nombreux aciers calmés sont partiellement désoxydés par le ferro-silicium, désoxydant puissant, qui en éliminant largement les gaz et les oxydes, et en empêchant la formation de bulles gazeuses dans le métal qui se solidifie dans la lingotière ou dans le moule, donne du métal sain, exempt de soufflures. Le silicium améliore la résistance de l'acier aux températures élevées. Les pellicules d'oxyde superficiel formées les premières sont adhérentes et inertes et elles empêchent rapidement une oxydation ultérieure. Certains des aciers à haute teneur en chrome résistant à la chaleur contiennent de 1 à 3% de silicium.

- **Manganèse :**

Le Manganèse assure le comportement des aciers à outils, une influence analogue à celle du nickel. Il se trouve, en général, présent comme élément résiduel à des teneurs comprises entre 0,3 et 0,5 %. Certains aciers à outils contiennent jusqu'à 2 % de manganèse pour des problèmes de trempabilité et, jusqu'à 1 % de cet élément lorsqu'ils sont désulfurés.

Le manganèse est présent dans les aciers, en partie sous forme d'impuretés résiduelles, en partie comme résultat d'une désoxydation.

Une partie du manganèse constitue un élément d'addition intentionnelle pour contrebalancer la mauvaise influence du sulfure de fer, en produisant du sulfure de manganèse relativement moins nocif.

Le manganèse améliore les propriétés mécaniques et les possibilités de travail à chaud. En tant que désoxydant, le manganèse a une très grande efficacité et il est employé pour obtenir de l'acier sain, sans défaut interne, tels que les soufflures.

- **Phosphore (P) :**

Bien qu'il augmente la résistance à la traction de l'acier et améliore l'usinabilité, il est généralement considéré comme une impureté indésirable à cause de son effet fragilisant. L'effet de l'élément phosphore aura divers effets sur l'acier en fonction de la concentration. La quantité maximale de phosphore dans l'acier de qualité supérieure est entre 0,03 et 0,05 %.

- **Soufre (S) :**

Le soufre est normalement considéré comme une impureté et a un effet sur les propriétés d'impact lorsqu'un acier est riche en soufre et faible en manganèse. Le soufre améliore l'usinabilité mais diminue la ductilité transversale et ténacité aux chocs entaillés et a peu d'effets sur les propriétés mécaniques longitudinales.

- **Cuivre (Cu) :**

Le plus souvent trouvé comme agent résiduel dans les aciers, le cuivre est également ajouté pour produire des propriétés de durcissement, précipitation et augmenter la résistance à la corrosion.

- **Nickel (Ni) :**

Le nickel a un comportement semblable au manganèse. Son intérêt fondamental est qu'il abaisse notablement la température des points critiques. Les points critiques Ac3 et Ac1 sont, tous les deux, abaissés d'environ 10°C pour chaque 1% de nickel ajouté. Cet abaissement est beaucoup plus grand au refroidissement qu'à l'échauffement. La séparation de la ferrite et la formation de la perlite se trouvant ainsi retardées, l'effet sur la structure est semblable à celui que produirait une augmentation de la vitesse de refroidissement dans un acier ordinaire au carbone.

Le nickel n'a qu'un effet modéré sur la trempabilité des aciers. En abaissant la température des points critiques et la vitesse critique du refroidissement, il permet une plus grande latitude dans les conditions du traitement thermique. On peut abaisser la température de trempe, en réduisant ainsi les possibilités de décarburation superficielle et de déformation.

II.8. La machine de coulée continuée (CCM pour Continuous Casting Machine) :

La coulée continue est l'étape de solidification de l'acier liquide, Le principe de cette technique est de couler l'acier liquide dans une lingotière en cuivre de section carrée. Le métal commence à former une peau solide du côté des parois de la lingotière, violemment refroidie à l'eau. Le métal à

la sortie de la lingotière est tiré vers le bas par un jeu de rouleaux, il s'achève par se solidifier. a la base de l'installation, on extrait une barre solide, carrée qui est découpée en tronçon pour une longueur souhaitée .

L'aval de la machine peut être organisé différemment selon la nature, le format, les exigences de qualité de surface des produits coulés :

- Ateliers de parachèvement (scarfing ou meulage) pour une partie de la production.
- Refroidissement contrôlé sous capots pour certaines nuances sensibles à la tapure.

Enfournement chaud directement dans le four de réchauffage du laminoir pour maximiser les économies d'énergie et régulariser les flux de production

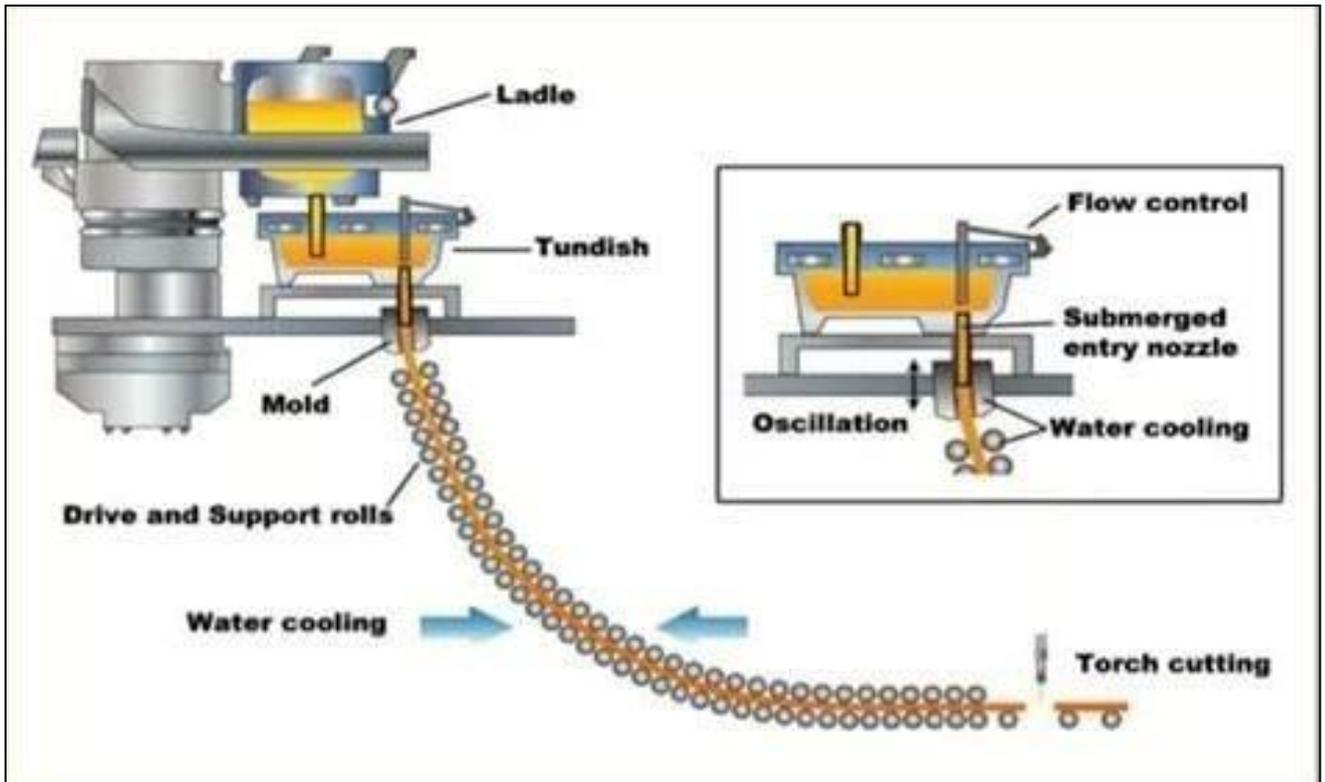


Figure II-11. Schématisation de la machine de coulée continuée [5]

II.9. Laminage à chaud :

Le processus de laminage à chaud comprend le réchauffage billettes, le laminage et les opérations de formage. Dans le laminage à chaud, la taille, la forme et les propriétés métallurgiques des billettes de métal sont modifiées par la compression répétée du métal chaud (la gamme des températures de travail est comprise entre 1 050 et 1 300 °C) entre des rouleaux à entraînement électrique. La production sur laminoirs à chaud comprend en général les étapes suivantes : conditionnement de la matière première (dècriquage, meulage), chauffage à la température de laminage, décalaminage, laminage (ébauchage comprenant une réduction de la largeur, laminage aux dimensions et propriétés finales) et finissage (ébarbage, refendage et découpage)



Figure II-12.Etapes représentant les produits finaux [3].

Références

- [1]. Hamzeh Hamadeh. Modélisation mathématique détaillée du procédé de réduction directe du minerai de fer. Matériaux. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT
- [2]. cite officiel de l'entreprise <https://aqs.dz>.
- [3]. Documentation interne de l'entreprise, Algerian Qatari Steel.
- [4]. J.Astier,Réduction directe,Réf: M7580v4,Techniques de l'Ingénieur(2005).
- [5]. <https://www.facebook.com/metallurgist007/posts/1471041613055491>
- [6]. Battle,T.,Srivastava,U.,Kopfle,J.,Hunter,R.,&McClelland,J.(2014).Thedirectreductionofiron. In Treatiseonprocess metallurgy(pp.89-176).Elsevie

Chapitre III

**Contrôle de qualité de la matière au cours de
production d'acier**

III-1. Introduction :

L'acier d'armature est l'un des éléments de base du processus de construction car il préserve la cohésion et la cohésion du bâtiment. Le renforcement est divisé en deux types principaux, ainsi que deux attaches ou outils du même minerai d'acier qui sont utilisés pour relier les brochettes de ce fer. Nous aborderons dans cette rubrique les types de barres d'armature et leur degré de résistance.

1- Renfort en acier à haute résistance :

Les armatures en acier à haute résistance sont divisées en deux types, ou plus précisément, en deux nuances comme suit :

a) Barre d'armature à haute résistance (60) :

Ce type d'armature en acier est très solide, et pour cette raison, il est généralement utilisé dans l'érection de bâtiments géants et lourds, car il convient parfaitement au béton solide dont la résistance ne dépasse pas 200 kg / cm^2 , ce type d'acier à béton est connu sous le nom commun « acier 60 » en référence à sa résistance à la traction qui est estimée à 60 kg par mm^2 . En fer renforcé 60, ses brochettes sont dentelées, et ses inconvénients sont qu'il ne peut être formé qu'une seule fois.

b) Barre d'armature à haute résistance (52) :

Un autre type de renfort en acier à haute résistance qui peut être utilisé à de nombreuses fins de construction, comme dans l'exemple précédent, ce type de fer tire son nom du degré de sa résistance, ce qui signifie que le degré de résistance de ce fer est estimé à 52 kg par mm^2 .



Figure III-1. Rond à béton

2- Barre d'armature en acier lisse :

C'est le type le plus faible parmi les différents types d'acier d'armature, ainsi que le type le plus exploité, car sa faiblesse par rapport aux deux autres types n'est pas considérée comme un défaut. Le fer lisse est utilisé dans la construction de bâtiments moyens dont la résistance à la compression ne dépasse pas 180 kg par cm² après 28 jours de coulage du béton.

Ce type de renfort en acier est malléable et vendu en rouleaux hélicoïdaux, en treillis renforcés ou en brochettes soudées préfabriquées.



Figure III-2. Fil à machine.

III-2. Matière première :

Les matières premières essentielles dans l'industrie de fer réduite sont les oxydes de fer sous forme de géométrique pellets (également appelées boulettes) après avoir subir une opération d'agglomération afin d'éliminer les impuretés tel-que le phosphore, soufre et l'alumine. Les pellets se présentent sous la forme de sphères de 8 à 18 mm de diamètre. Leur fabrication combine des procédés chimiques et thermiques pour enrichir le minerai en fer jusqu'à 67 %-72 % de fer, et lui donner les caractéristiques chimiques et mécaniques voulues.

L'oxyde de fer doit être contrôlé qualitativement pour assurer le bon déroulement de l'étape de la réduction directe dans le four.

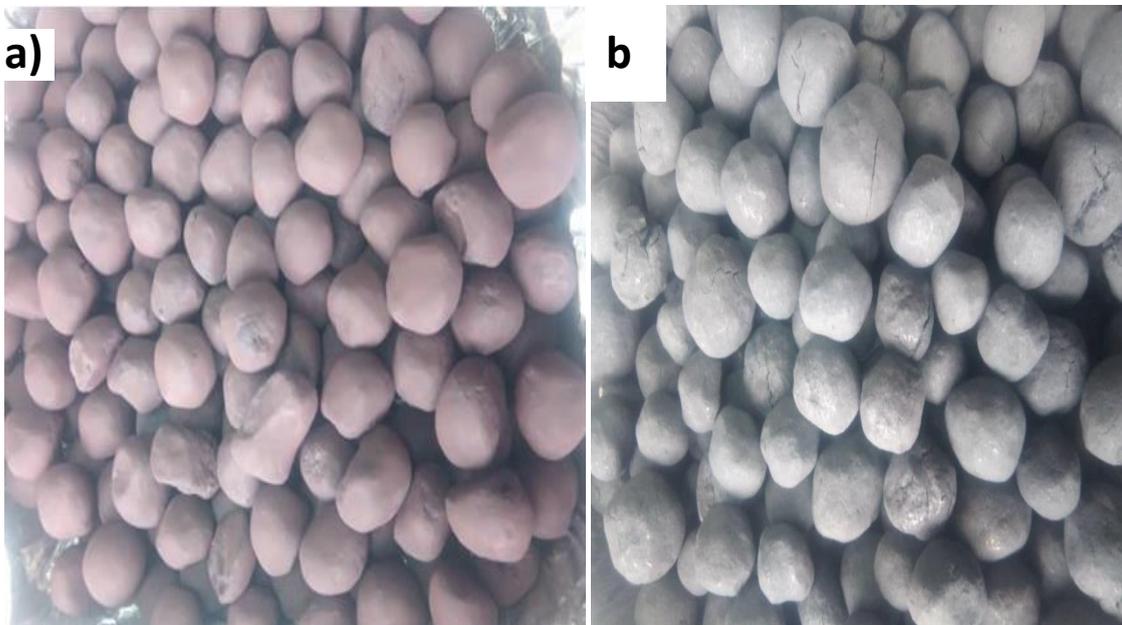


Figure III-3. a) Pellets d'oxyde de fer avant réduction et **b)** après réduction (DRI).

- Au moment de déchargement de (Fe_2O_3), les opérateurs de contrôle qualité commencent leur travail avec l'opération d'échantillonnage en suivant des méthodes bien définies.

III-3. Contrôle de qualité de la matière première arrivée :

La matière première arrive au lieu de stockage final à Bellara depuis le port de Djen-Djen de Jijel après avoir été déchargée du transporteur maritime. Cette matière première est actuellement transportée par camion, en attendant l'ouverture prochaine de la voie ferrée. Au déchargement, les opérateurs de contrôle qualité suivent une méthode bien définie pour

commencer les opérations d'échantillonnage.

III-3.1.Echantillonnage :

Il s'agit d'une opération effectuée dans la zone de stockage à chaque arrivée de la matière première pour vérifier que ces propriétés et leur composition répondent aux spécifications établies. Avant d'acheter ce matériel sur le marché international.

III-3.2.Tests physiques :

Les tests physiques ont été réalisés sur un échantillon global afin de déterminer les spécifications de l'oxyde de fer qui sera utilisé dans la réduction :

III-3.2.1.Humidité :

Ce test est effectué pour déterminer la teneur en eau de la matière première .Pour évaporer l'eau, une méthode de séchage doit être utilisée. Pour ce faire, un échantillon initial de 2 kilogrammes de l'échantillon global est prélevé, et il est placé dans un congélateur à 105,2 °C pendant 4 heures pour assurer l'élimination de l'eau absorbée par le matériau initial .Après refroidissement, on appuie à nouveau sur la masse de l'échantillon final et la note M2.Par conséquent, la formule suivante est utilisée pour calculer l'humidité :

$$(M1 - M2/M1)*100, \text{ Humidité (pourcentage)}$$

Le matériau initial testé dans notre étude avait une teneur moyenne en humidité de 2,2 %.

III-3.2.2Distribution de la granulométrie :

Pour éviter l'étouffement du four, la granulométrie de l'oxyde de fer doit être connue et déterminée en pourcentage suivant la norme ISO 4701:2019 (Iron ores and direct reduced iron- Determination of size distribution by sieving). Selon cette norme, la distribution de la granulométrie de la matière première doit satisfaire les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III -1 : spécification physico-chimique exigés sur la matière première.

Granulométrie (mm)	%	CCS Kg/Pellet	Porosité %	densité T/m ³	Humidité %	T.I. %	A.I. %
+16.0	7,39	298	24,35	2,33	1,09	96,7	2,93
+12.5	58,80						
+9.5	31,24						
+6.35	2,04						
+3.35	0,12						
-3.35	0,43						
<16.0et>9.5	90,04						

TI : teneur en % des pellets.

AI : teneur en % des poudres.

Ces deux grandeurs représentent la teneur en % de la résistance à la compression. Ce test est réalisé sur une machine Tambler, les pellets d'oxyde rentrent dans la machine et subissent 200 cycle de compression et les granulés qui n'ont pas été cassés représentent TI et les pellets transformés en poudre représentent AI.

La matière première doit passer donc à travers un tamiseur automatique vibrant (**Figure III-4**) constitué de plusieurs tamis avec différents diamètres allant de 19,5 mm jusqu'au moins de 3,3 mm. Les gros grains de plus de 19,5 mm vont rester au premier tamis et ainsi de suite.

**Figure III-4** . Tamisage automatique vibrant.

Afin de calculer la distribution granulométrique des granulés, 2 kg de granulés ont été placés sur un tamis de 19,5 mm. Les résultats de tamisage des granulés de la matière première obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III-2 : résultat de tamisage

Granulométrie (mm)	+19,0	+16,0	+12,5	+9,50	+6,30	+3,30	-3,30	<16.0 et>9.5
%	0	9	58,51	31,50	0,75	0,03	0,2	90,01

La distribution de la granulométrie de la matière première testé est conforme à la norme ISO 4701:2019 avec **90,01 %** de particules possédant une taille granulométrique entre **16 et 9,5 mm** en accord avec la norme (**90,04 %**).

III-3.2.3 . Résistance au concassage (CCS pour compression crush strong) :

Pour assurer une bonne résistance au concassage et suivant la norme **ISO4700**, au moins 60 pellets par échantillon global de la matière première avec des tailles allant de 9,5 à 16 mm sont testés. L'opération consiste à appliquer une force progressive à travers une presse hydraulique et de mesurer la résistance en Kg/pellet

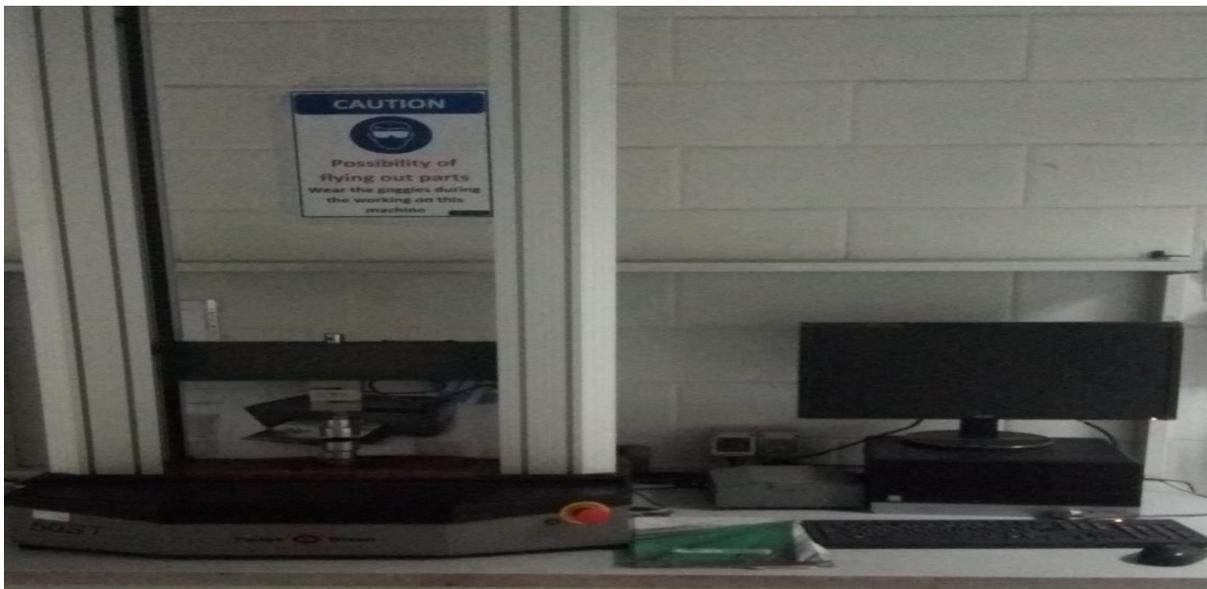


Figure III-5.Machine de compression.

Tableau III-3: Résultat de résistances au concassage.+9,5<diamètre <12,5 mm.

N°	CCS Kg/ Pellet	N°	CCS Kg/Pellet	N°	CCS Kg/Pellet	N°	CCS Kg/ Pelle t	N°	CCS Kg/Pellet	Moyenne Kg/ Pellet
1	261	13	234	25	154	37	344	49	227	308,22
2	260	14	133	26	340	38	298	50	371	
3	299	15	250	27	345	39	219	51	338	
4	327	16	289	28	388	40	282	52	253	
5	426	17	367	29	388	41	451	53	150	
6	298	18	372	30	312	42	288	54	387	
7	293	19	432	31	363	43	295	55	293	
8	447	20	351	32	301	44	407	56	291	
9	179	21	263	33	314	45	200	57	280	
10	151	22	511	34	322	46	295	58	372	
11	161	23	240	35	294	47	342	59	188	
12	337	24	216	36	554	48	243	60	237	

- Cette analyse permet d'éviter le phénomène d'étouffement dans le four et la formation du bloque(casting),
- Les pellets d'oxyde ayant la résistance supérieure à **250kg/pellet** sont conformes selon le processus de réduction.

Il faut noter que le processus de réduction de l'oxyde de fer exige une bonne qualité de la matière première. Ces résultats sont importants pour régler les paramètres donnés au système DCS, et qui seront changés selon la composition chimique donnée par l'ingénieur qualité.

Ces paramètres de processeurs de réduction sont:

- Température de réduction
- Flux des gazes réducteurs
- Flux des gazes de refroidissement.
- Vitesse de chargement et déchargement de la matière

III-3.3. Analyses chimiques :

Les analyses chimiques de la matière première et du fer réduit s'effectuent au niveau du laboratoire de réduction direct par l'utilisation d'une méthode qualitative par le bombardement d'un échantillon par des rayons fluorescence X (FRX) et aussi par l'utilisation des méthodes chimiques tel que la titration (réaction d'oxydant-réduction) et la méthode gravimétrique basé sur des réactions complexe de précipitation des éléments indésirables.

III-3.3.1. Titration :

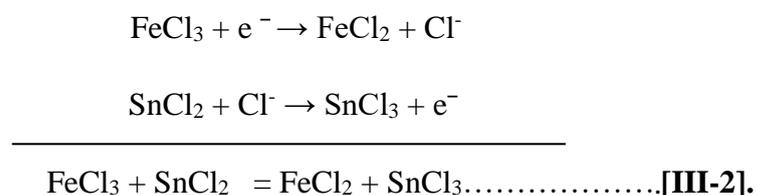
L'échantillon destiné à l'analyse qualitatif doit être préparé selon les normes internationales, la préparation se fait en trois étapes nécessaire (séchage, concassage, broyage et tamisage) afin d'obtenir de fines particules de taille inférieure à 180 μm afin d'assurer la qualité des résultats en adéquation au exigence de la norme ISO 2957-1/ ISO 2957-2. Selon les exigences de la norme la masse de l'échantillon doit être bien déterminé selon l'élément désirer.

Pour déterminé la teneur en fer dans l'échantillon pris de la matière première, l'échantillon doit être dissous dans un acide (acide chlorhydrique ou acide sulfurique) dans un bécher sur une plaque chauffante avec une température entre 80 et 100°C maximum afin d'éviter l'évaporation de l'eau.



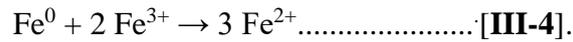
Cette solution obtenue est mélangée avec une solution de chlorure d'étain. Une réaction d'oxydoréduction est produite.

On observe un changement de couleur avec l'obtention d'une solution incolore attestant la réduction totale du Fe (+III) en Fe (+II) selon la réaction suivante :

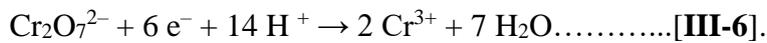


C'est une réaction exothermique, la solution est refroidie rapidement afin d'éviter la réaction réversible.

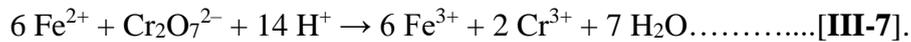
Afin de déterminer le degré de métallisation M, un échantillon de fer réduit (DRI) est ajouté dans un Erlenmeyer avec une solution de chlorure de fer de concentration connue, puis on laisse la solution sous agitation pendant 45 min afin de dissoudre le fer métallique.



La détermination de la teneur en fer se fait par la méthode de titration par une solution de dichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) d'une normalité connue. Le point d'équivalence est obtenu avec le changement de la couleur verte au violet. Ce volume est utilisé pour déterminer la concentration du fer dans la solution et bien sûr remonté à la masse de fer dans notre échantillon. Les réactions électrochimiques mise en jeu lors de cette réaction de dosage sont :



Et l'équation-bilan de la réaction du dosage s'écrit :



Dans le cas du fer métallique ($\text{Fe} (0)$), on utilise le même procédé de titration de la solution obtenue après dissolution avec du FeCl_3 .

III-3.3.2. Détermination des impuretés :

Les impuretés (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO) sont l'ensemble des éléments chimiques indésirable qui sont présent dans la matière première. Le protocole suivi pour déterminer le pourcentage massique de ces éléments est le suivant :

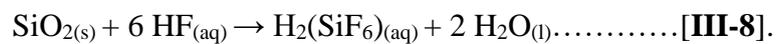
La première étape est la dissolution de la matière première dans des acides afin de précipiter les impuretés tel que SiO_2 et la solution récupéré est analysée afin de déterminer la composition des autres impuretés.

Pour réaliser cela, nous dissolvant l'échantillon dans l'acide chlorhydrique 37%. L'échantillon est placé dans un bécher, après rinçage des parois intérieurs du bécher avec de l'eau distillé, on ajout une quantité suffisante d'acide. La dissolution est réalisée sur une plaque chauffante à une température entre 70-90 °C, puis on ajoute de l'acide nitrique pour assurer le dégagement de l'acide nitreux (NO_x) pendant quelques minutes. Pour assurer le dégagement de toutes les acides libres présent dans la solution, on doit ajouter de l'acide perchlorique de formule HClO_4 . Le dégagement des gaz est total lorsqu'on observe une fumée blanche. La solution obtenue est filtrée dans une membrane.

a-Détermination de SiO₂ :

Le précipité récupéré après filtration membranaire contient de la silice (SiO₂) ainsi que d'autres oxydes tels que : Cr₂O₃, TiO₂. Afin de déterminer la teneur en silice, ce précipité est transféré dans un creuset en platine puis placé dans un four à moufle à 900° pendant 7 min. Le creuset est transféré au dessiccateur pour le conserver et éviter l'absorption de l'humidité.

La masse totale du creuset avec le précipité est notée (M1). Le creuset est transféré vers une plaque chauffante où on ajoute de l'acide sulfurique (H₂SO₄) et fluorhydrique (HF). L'acide fluorhydrique est l'un des rares liquides connus capables de dissoudre la silice (SiO₂) selon l'équation chimique suivante :



Le produit en fin d'expérience est transféré de nouveau dans un four à moufle pour compléter l'élimination du silicium. La masse totale du creuset avec le précipité après sortie du four est notée (M2). La teneur en % de SiO₂ présent dans notre échantillon est calculée selon la formule suivante :

$$\text{SiO}_2 (\%) = \frac{M1 - M2}{M0} \dots \dots \dots [\text{III-9}].$$

Avec M0 est la masse initiale de l'échantillon .

Cette méthode gravimétrique est une partie de la norme ISO2598-1-1992 qui spécifie deux méthodes gravimétriques pour la détermination de la teneur en SiO₂ des minerais de fer.

b-Détermination des autres impuretés :

La première étape était de dissoudre la matière première dans des acides, la solution récupérée après filtration est utilisée pour déterminer la teneur des autres impuretés.

On prélève des aliquotes de 25 mL de cette solution mère pour déterminer la teneur de chaque élément chimique. Les aliquotes sont le résultat de la distribution d'un volume initial en plusieurs parties égales.

En quelques mots, c'est un échantillon qui représente les caractéristiques du reste .Par exemple, dans une solution, vous prenez une aliquote de 10 M₁ qui représente 100 mL de la solution qu'on a préparée, en termes de caractéristiques telles que la concentration.

c-Dureté totale (CaO et MgO) :

Elle est due uniquement aux ions calcium et magnésium. La dureté se détermine par un dosage complexométrique par l'EDTA. On ajoute à deux aliquotes de l'Ammonium et le chlorure

d'ammonium et on augmente la température de la plaque chauffante à 70°-90° pendant 20 min afin de former un précipité.

Après précipitation, les deux solutions sont filtrées et encore porté au une température de 100 °C pour évaporer l'ammoniaque. Après refroidissement, les deux solutions sont titrées par une solution d'EDTA en utilisant des indicateurs spécifiques et la couleur change du rouge vers le bleu .La teneur en % de CaO et MgO est déterminée selon les équations suivantes :

$$\text{CaO (\%)} = (V_{\text{EDTA}} \times \text{Normalité} \times M_{\text{equi}} / M_{\text{échantillon}}) \times \text{facteur}$$

$$\text{MgO (\%)} = (V_{\text{TH}} - V_{\text{EDTA}}) * N \times M_{\text{equi}} / M_{\text{échantillon}} \times \text{facteur}$$

Avec :

TH: volume totale

M_{equi1} : poids d'équivalent de CaO

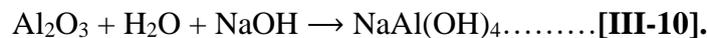
M_{equi2} : poids d'équivalent de MgO

$M_{\text{échantillon}}$: poids d'échantillon utilisé.

d) L'alumine (Al_2O_3) :

De la même manière, une solution de 25ml est placée dans un bécher sur une plaque chauffante, on ajoute une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH, 50%) afin de former un précipité. La solution finale est filtrée dans une membrane afin de récupérer le précipité.

Le pH de la solution doit être 5 à 6.



La solution est chauffée jusqu'évaporation, après en ajoute indicateur coloré (Orange de xylénol et la solution est titrée avec une solution de sulfate de zinc (0.01 N).

Pour calculer le pourcentage d' Al_2O_3 , on utilise la formule suivante :

$$\text{Al}_2\text{O}_3 (\%) = (\text{Blanc} - V_{\text{ZnSO}_4}) \times N \times M_{\text{equi}} / M \times \text{facteur}$$

Avec : Blanc : Solution étalon.

M_{equi} : poids d'équivalent d' Al_2O_3 .

$M_{\text{échantillon}}$: poids d'échantillon utilisé.

On prépare deux solutions A et B. la solution A est préparée à partir d'une solution de molybdène d'ammonium dilué dans l'ammoniaque et l'eau distillée. La solution B est préparée à partir de la dilution de l'acide nitrique dans l'eau distillé avec la proportion suivante 1/2.3. On mélange les solutions et on laisse le mélange précipité pendant 24h.

On prend le papier filtre de de la solution titré lors de la détermination de la dureté totale et on le dissout dans l'acide nitrique et le mélange des solutions A et B.

On chauffe la solution pendant 2 h et on passe la solution à travers un filtre d'une membrane. La membrane doit être rincé avec l'acide nitrique (1/100) et une solution de nitrate d'ammonium (20%) jusqu'au pH environ 7.

On récupère le résidu du filtre avec une solution de NaOH (0,1N), après on titre la solution avec HCl (0,1N). La teneur en P est calculée en utilisant les formules suivantes :

$$\text{PO}_4 (\%) = (V_{\text{NaOH}} - V_{\text{HCl}}) \times 1,34 / M \times 10$$

M : la masse molaire de PO_4 .

$$\text{P \%} = \text{Résultat} \times 0,321$$

Les résultats d'analyse des impuretés de la matière première utilisant la méthode chimique de titrage et la méthode gravimétrique sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-4 : Résultats d'analyse des impuretés des pellets.

Eléments	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	P	FeO	CaO+ MgO
Teneur en %	1,47	0,59	0,74	0,022	0,003	0,047	0,01	0,76

III-4. Contrôle de qualité du fer produit par réduction directe (DRI) :

En utilisant la matière première avec les propriétés physico-chimiques mentionnées précédemment, on a obtenu un produit du fer réduit (DRI) présentant un degré de métallisation de 94,71 % (**Tableau IV-5**) attestant une qualité du produit selon les normes internationales.

Dans ce tableau, on observe que les valeurs du degré de métallisation des premiers tests sont plus faibles que le reste des tests. Cela confirme l'intervention de l'équipe de production en ajustant les paramètres de productions durant le début de la production afin d'améliorer ce degré de métallisation

ce qui est fait à partir du 4 test réalisé sur le fer réduit produit.

Ces tests sont réalisés sur une production de 24 heures et un degré de métallisation entre 94%-95% est obtenu.

Tableau III-5: Résultats d'analyse du fer réduit produit.

N° Test	Carbone %	Sulfure %	Fer total %	Fer métallique %	Métallisation %
1	2,45	0,002	91,02	86,24	94,75
2	2,36	0,001	91,18	86,02	94,34
3	2,31	0,001	90,85	84,80	93,34
4	2,54	0,001	91,58	87,39	95,42
5	2,58	0,001	91,41	87,21	95,41
6	2,31	0,001	91,57	87,27	95,30
7	2,13	0,001	91,52	86,54	94,56
8	1,94	0,001	91,26	87,53	95,91
9	2,26	0,001	90,79	86,77	95,57
10	1,88	0,001	91,75	87,66	95,54
11	1,99	0,001	91,14	86,70	95,13
12	2,21	0,001	91,47	86,74	94,83
Moyenne	2,22	0,001	91,26	86,44	94,71

Les résultats d'analyse des impuretés réalisés sur le fer obtenu après réduction utilisant la méthode chimique de titrage et la méthode gravimétrique sont représentés dans le tableau ci-dessous. La teneur en impuretés reste dans les limites exigées par les normes de qualités :

Tableau III-6: Résultats d'analyse des impuretés contient la matière réduite (DRI).

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P
Teneur en%	3,15	1,20	0,98	0,15	0,04

III-5. Contrôle de qualité et de quantité des gazes pendant et avant la réduction :

Pour faire cette opération, on a utilisé l'appareil de chromatographie en phase gazeuse (CPG).

- **Définition :**

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une technique de séparation applicable aux composés gazeux ou susceptible d'être volatilisés par élévation de température sans 300) ;

les constituants peuvent différer par décomposition (dont la masse moléculaire M leur nature et leur volatilité. La séparation exige des quantités de l'ordre de mg seulement ; parfois même de μ g et/ou micron (μ).

On distingue selon la phase stationnaire :

- Chromatographie de partage : La chromatographie gaz-liquide : la phase stationnaire est un liquide immobilisé sur un support solide par imprégnation ou par greffage.
- Chromatographie d'adsorption : La chromatographie gaz-solide : la phase stationnaire est un solide poreux, réservé à l'analyse de mélanges de gaz ou de liquides à bas points d'ébullition.
- **Principe de la technique :**

En CPG la phase mobile est un gaz, ce fluide traverse une colonne renfermant des granulés poreux qui constitue la phase stationnaire. Lorsque un échantillon à analyser est injecté et vaporisé ; ces constituants sont entraînés à des vitesses inégales par la phase mobile, à la sortie de la colonne se trouve un détecteur relié à un enregistreur.



Figure III-6: Chromatographie en phase gazeuse (CPG).

- Les résultats qui se trouvent par l'analyse du gaz processus sont :

Tableau III-7 : l'analyse du gaz processus par CPG.

Les composés	H ₂	N ₂	CH ₄	CO
Concentration (mole%)	41.0017	12.2429	4.6212	22.3081

- On remarque que les gaz le plus exigeants dans le four de réduction sont H₂ et CO.

III-6. Les Analyses lors de la transformation du Fer réduit (DRI) en Acier :

Dans la nouvelle technologique de fabrication du produit acier basé sur le four à arc électrique, la fusion de fer réduit se fait en deux étapes :

Après chargement de la ferraille dans le four, le technicien commence à injecté le gaz naturel afin d'allumé une flamme chalumeaux en présence de l'oxygène.

Dans la deuxième étape, On charge la matière première par des convoyeurs.

Après décarbonatation et oxydation des éléments indésirables tels que le phosphore, l'aluminium, ...etc, on ajoute la chaux vive (CaO) et la chaux dolomitique (CaO et MgO) afin de protéger les produits réfractaires

du four et de former les scories.



Les scories sont des sous-produits solides, des mélanges d'oxydes divers, qui surnagent sur le métal en fusion, ou s'en détachent lors de leur mise en œuvre à haute température.

Dans le cas particulier de la métallurgie du fer, les scories pauvres en fer sont appelées laitier. La composition chimique de l'acier doit être contrôlée au cour du procédé de la fusion pour ajuster la composition chimique selon la norme internationale appliquée. Les analyses sont réalisées au niveau de laboratoire central de l'aciérie électrique (SMS) par l'application de la méthode qualitative dans un spectromètre. Cette analyse permis de déterminer la composition chimique d'un échantillon

métallique. Cette analyse se déroule selon plusieurs étapes allant de la réception des échantillons jusqu'à l'analyse de ces échantillons.

III-7. Préparation mécaniques des éprouvettes :

La préparation des échantillons pour obtenir la composition chimique nécessite un polissage mécanique, L'échantillon est soumis à un processus de lissage à l'aide du papier abrasif d'oxyde de zirconium de différente granulométrie dans une machine de polissage (**Figure III-7**) afin de se débarrasser des impuretés à la surface de l'échantillon (**Figure. III.8**).



Figure III-7: Machine de polissage.



Figure III-8: La forme d'échantillon **a)** avant le polissage et **b)** après le polissage.

III-8. Analyse par Spectrométrie à Emission Optique des éprouvettes :

La composition chimique de l'acier doit être contrôlée au cours du procédé de fusion afin d'ajuster la composition chimique selon la norme internationale appliquée. La composition chimique des éprouvettes préparées sont analysées en utilisant un spectromètre d'émission optique.

La Spectrométrie à Emission Optique (OES en Anglais) consiste à appliquer de l'énergie électrique sous la forme d'un arc (dans l'air) ou d'étincelle (sous argon) générée entre une électrode et un échantillon de métal, les atomes vaporisés étant alors amenés à un état de haute énergie dans un « plasma de décharge ».

Ces atomes et ions excités dans le plasma de décharge créent un spectre d'émission spécifique à chaque élément. Ainsi, un seul élément génère de nombreuses lignes spectrales d'émission caractéristiques. Les longueurs d'onde émises sont caractéristiques de l'élément chimique. Par conséquent, on peut dire que la lumière générée par la décharge est une combinaison des raies spectrales générées par les éléments présents dans l'échantillon [1].

Cette lumière est diffractée pour extraire le spectre d'émission des éléments. L'intensité de chaque spectre d'émission dépend de la concentration de l'élément dans l'échantillon. Les détecteurs (tubes photomultiplicateurs et/ou capteurs CCD) mesurent l'intensité du spectre de chaque élément afin d'effectuer une analyse quantitative de ceux-ci. Le calcul de la concentration de chaque élément est basé sur la comparaison des résultats avec un ensemble d'échantillons d'étalonnage précédemment mesurés. (Calibrations) Chaque élément dispose de nombreuses courbes de calibration spécifiques à chaque matrice (base Fe, Cu, Al,..etc..) et aux domaines de concentrations mesurées.

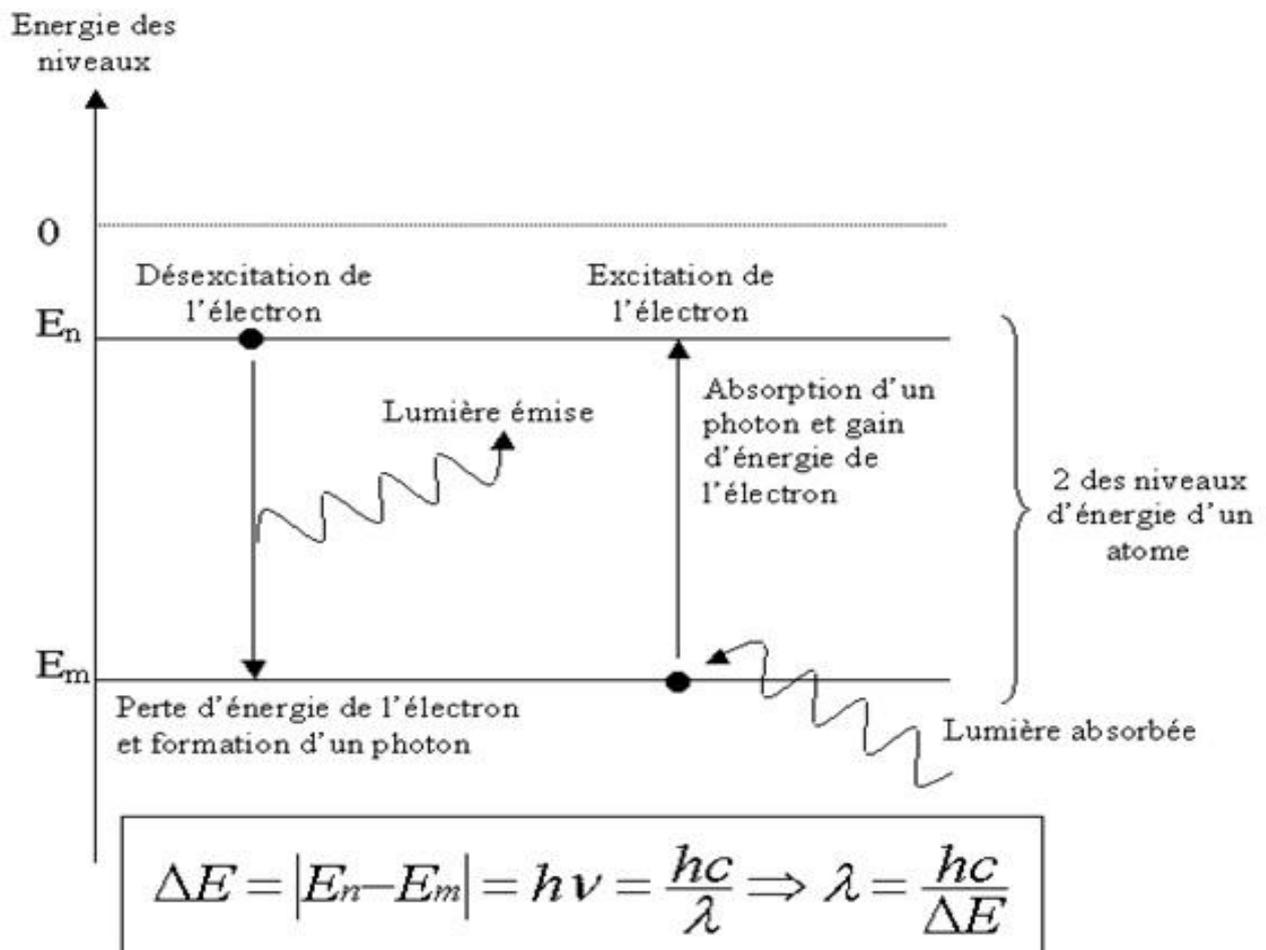


Figure III-9: principe de fonctionnement du spectromètre optique

Le spectromètre d'émission optique a trois parties essentielles :

- **Partie d'excitation** : permis de chauffer et exciter les atomes de l'échantillon
- **Partie d'analyse** : les ondes électromagnétiques émis par l'échantillon doivent être capté par des photo-tubes chaque un par sa longueur d'onde sous forme intensité.
- **Partie de détection** : Traitement des données afin de convertir les informations en concentration



Figure III-10.a) Spectromètre d'émission optique, b) placement d'échantillon dans le spectromètre.

Tableau III -8 : Analyse chimique de l'éprouvette du four à arc électrique (E500).

Eléments	C	S	P	Mn	Si	Cu	Cr
Teneur en %	0,19	0,012	0,014	0,023	0,07	0,007	0,015

Tableau III-9 : Analyse chimique de l'éprouvette du four à arc électrique (C₈D₂)

Eléments	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Mo(%)	Cr(%)
Teneur en %	0.05	0.020	0.04	0.08	0.010	0.05	0.003	0.014

Selon les résultats obtenus, l'affinité de l'acier au four est ajustée par l'addition des additifs de type ferro-alliages tels que le SiMn, FeSiMn et le charbon dans le but de régler la composition chimique de l'acier avec celle de la nuance désirée. Les opérateurs de production continuent cette vérification de la composition chimique à partir des échantillons envoyés au laboratoire d'analyse SMS.

Tableau III-10: Analyse chimique de l'éprouvette du four d'affinage à poche(LRF) E500

Eléments	C	S	P	Mn	Si	Cu	Mo	Cr	N(ppm)
Teneur en %	0,243	0,009	0,013	0,621	0,213	0,004	0,001	0,016	94

Tableau III-11: Analyse chimique de l'éprouvette du four d'affinage à poche (LRF)C₈D₂

Eléments	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Mo(%)	Cr(%)	N(ppm)
Teneur en %	0.084	0.45	0.154	0.008	0.009	0.05	0.003	0.012	67

Les résultats d'analyse chimique obtenus de l'éprouvette du four d'affinage à poche sont envoyés à l'ingénieur de production afin d'ajuster cette composition à travers des additifs pour respecter la norme internationale. Une fois que la composition est conforme et validé par le laboratoire d'analyse, l'acier liquide en fusion du four d'affinage à poche est transféré vers la dernière étape de coulage et de refroidissement pour fabriquer les billettes.

III-9. Composition chimique de la nuance des billettes destinée à la fabrication de rond à béton et fil à machine.

Les Billette destinée à la fabrication de rond a biton sont du grade (MS-fe500) référence (ISO6935-2/2019)

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \leq 0.5\%$$

Tableau III-12: Composition chimique de la nuance des billette E500.

Elément	C %	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Cu%	Pb%	Mn/S	Ceq	N,ppm
Min	0.23	0.15	0.55	/	/	/	/	/	20	0.35	/
Max	0.27	0.30	0.65	0.045	0.045	0.005	0.30	0.05	90	0.50	120
Aim	0.20	0.20	0.90	<0.025	<0.025	<0.005	/	/	<60	0.40	<90

Tableau III-13 : Composition chimique de la nuance des billette C₈D₂

Elément	C %	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Cu%	Pb%	Ceq	N,ppm
Min	0.07	/	0.30	/	/	/	/	/	0.35	/
Max	0.10	0.30	0.50	0.020	0.025	0.005	0.15	0.005	0.23	70
Aim	0.09	0.20	0.40	<0.020	<0.025	<0.005	<0.10	<0.005	0.16	<50

III-10. Contrôle de qualité des biellettes produites :

Le protocole de suivi de la qualité des biellettes est le suivant :

- Un échantillon de dimension 10x10cm est coupé de la barre de billette produite.
- Préparation de l'échantillon dans la polisseuse mécanique pour l'analyse chimique et microstructurale.

III-11. Analyse par Spectrométrie à Emission Optique des bielles produites :

Les échantillons sont utilisés pour déterminer les traces de carbone, soufre et des gaz (O₂, N₂) par des analyseurs élémentaires.

Analyse spectrale est réalisé par un spectromètre d'émission optique comme nous l'avons déjà fait pour les éprouvettes.

Tableau III-14: Analyse chimique de la billette. E500.

Eléments	C	S	P	Mn	Si	Cu	Mo	Cr	N(ppm)
Teneur en %	0,243	0,009	0,013	0,573	0,198	0,004	0,001	0,018	99

Tableau III-15: Analyse chimique de la billette. C₈D₂

Eléments	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Mo(%)	Cr(%)	N(ppm)
Teneur en %	0.085	0.43	0.144	0.009	0.007	0.05	0.003	0.014	68

D'après les résultats les Tableaux de la billette et on comparaison avec ceux d'analyse chimique de l'éprouvette du four d'affinage à poche, une légère différence dans la composition est obtenue et qui est dû à l'étape de refroidissement sous air de l'acier liquide lors de la coulée (augmentation de la teneur en azote de 94 à 99 ppm).

On note également une légère diminution du Mn et du Si due au procédé d'oxydation (réaction d'alliage avec l'oxygène).

III-12. Analyse micro et macro-structurelle :

La surface lisse de l'échantillon déjà préparer dans la machine de polissage automatique est lavée et nettoyée par l'acétone afin d'éliminer toute résidu rester coller sur cette surface de travail. Puis, on plonge cette échantillon dans un bain d'acide chlorhydrique très concentré (37%) à une température de 80°C pendant 30 min.



Figure III-11. Photo de la macrostructure de la billette après le bain d'acide.

La billette après le test avec l'acide présente une structure en colonnes grossière gris, parallèle et allongé formé par une croissance unidirectionnelle pendant la solidification.

III-13. Analyses élémentaires (C, S, O, N):

Une analyse élémentaire est réalisée sur les échantillons d'éprouvette en utilisant deux appareils d'analyse :

ELTRA CS-800 afin de déterminer la teneur en Carbone et Soufre, et **ELTRA ON 900** pour déterminer la teneur en Oxygène et l'Azote [2].

- **Principe de Fonctionnement**

Dans le four à induction, l'échantillon est fondu dans une atmosphère d'oxygène pur, ce qui fait réagir le soufre avec le dioxyde de soufre (SO_2) et le carbone avec un mélange de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO_2).

Les gaz de combustion passent à travers un filtre à poussière et un absorbeur d'humidité pour être purifiés.

Dans l'étape suivante, le dioxyde de soufre est détecté dans des cellules infrarouges. Dans les cellules infrarouges CS-i, des cellules de différentes sensibilités (haute/basse) peuvent être adaptées en fonction des besoins de l'utilisateur.

La mesure du soufre est suivie de l'oxydation du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone et du dioxyde de soufre en trioxyde de soufre.

Le gaz SO_3 est éliminé avec de la laine de cellulose ; la teneur en carbone est détectée par des cellules infrarouges qui peuvent être personnalisées. L'analyseur ELEMENTRAC CS-i peut être équipé de 4 cellules infrarouges indépendantes au maximum.

Avant l'analyse dans le CS-800, l'échantillon doit être préparé en le plaçant dans une perceuse (**Figure IV-12**) afin d'obtenir des flocons de fer. Les flocons de fer obtenus sont pesés dans un creuset en céramique et on ajoute des accélérateurs de réaction (tungstène, fer) afin de satisfaire les normes en vigueur dans le système de qualité internationale.



Figure III-12:Perçage de l'échantillon.

L'analyse de l'échantillon dépend du processus de combustion en présence d'oxygène très pur (> 99.995%) dans le four à une température de 1600 °C, le CO_2 et le SO_2 résultant de la combustion de l'échantillon passe à travers un filtre pour éliminer l'humidité et la poussière. Ces gaz résultants sont dirigés vers les deux cellules infrarouges afin de déterminer la concentration de C et S. Les réactions de combustion au cours de ce procédé sont :

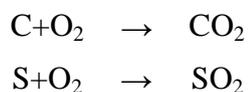




Tableau III-13 : Analyseur de carbone soufre : ELTRA CS 800.

Pour l'analyse élémentaire Oxygène/Azote, l'échantillon est coupé avec une dimension de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ par une machine de découpe. L'échantillon est introduit dans le four à une température de $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. L'oxygène réagit avec le carbone de creuset (creuset de graphite) et le nitrogène est détecté directement par une cellule de conductivité thermique. Les résultats sont obtenus sont groupés dans le tableau suivant.

Tableau III-16 : Analyses élémentaires (C, S, O, N).E500

Elements	C	S	O(ppm)	N(ppm)
Teneur en %	0,243	0,009	15	99

Tableau III-17 : Analyses élémentaires (C, S, O, N).C₈D₂

Eléments	C	S	O(ppm)	N(ppm)
Teneur en %	0,085	0,007	5	68

III-14. Propriétés microstructurales :

Les photos MEB (**Figure III. 14**) réalisées sur un échantillon confirme la qualité de la billette produite au sein du complexe de Bellara avec l'absence de la porosité qui peut causer des dégâts néfastes sur l'acier lors de l'étape de laminage.

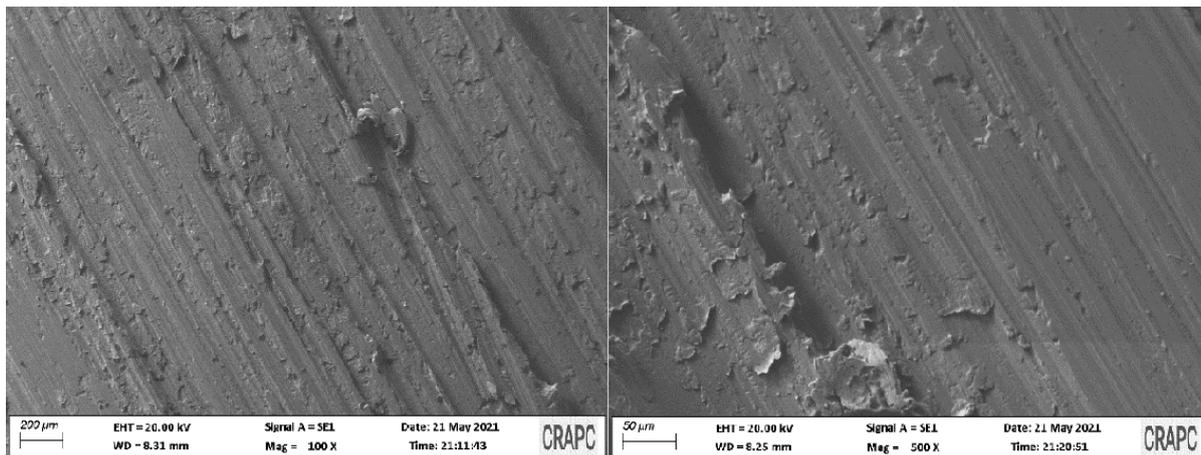


Figure III -14. Micrographie MEB d'un échantillon de billette [4].

III-15. Compositions chimiques :

Le rond à béton torsadé Fe E500 est une tige en acier doux laminé à chaud. Il est utilisé couramment en maçonnerie, il est utilisé aussi comme armature secondaire pour renforcer des ouvrages en béton armé : dalles, chapes, fondations ou chaînages.

Les aciers à haute adhérence : la surface présente des saillies ou des creux. La surface de ces armatures présente des aspérités en saillies inclinées par rapport à l'axe de la barre appelée verrous ou crantages qui sont destinées à favoriser l'adhérence des armatures une teneur en carbone équivalent qui dépasse 0,50 indique l'utilisation élevée de différents éléments d'alliage tels que Cr, V, Mo etc., ce qui compliquent la soudure mais permettent d'obtenir les caractéristiques de plasticité élevés [4].

III-16. Propriétés mécaniques :

Les laboratoires d'études attestent de la conformité des différents diamètres concernant les caractéristiques indispensables à sa commercialisation :

- Conformité à la masse linéique (poids/mètre linéique).
- Conformité à l'écartement des verrous (distance horizontale qui sépare les différents crantages sur une barre de fer à béton).
- Conformité à la hauteur des verrous (distance verticale entre les crantages sur la barre).
- Conformité à la hauteur des nervures.
- Conformité à la limite d'élasticité minimale REH (Contrainte à partir de laquelle le matériau se rompt).
- Conformité à la résistance à la rupture.
- Conformité de non fragilité à l'essai des différents aciers (bonne aptitude de l'acier au pliage).

La principale propriété d'une armature est sa limite élastique (**Figure III-15 et III-16**), R_e , qui peut être calculée comme le rapport de la force à la limite élastique de l'armature sur sa section nominale. De plus, la norme détermine la valeur de la résistance à la rupture R_m ou le rapport R_m / R_e . Ce rapport décrit la sécurité des barres d'armature dans la construction [4].

Ces derniers doivent répondre aux exigences de propriétés en traction précisées dans le tableau ci-dessous (Tableau III-18):

Tableau III-18 : Propriétés mécaniques selon la norme internationale D=12mm

Classe de ductilité	Nuance d'acier		R_e Min (Mpa)	R_m Min(Mpa)	Ductilité R_m/R_e Min	Ductilité Allongement(%)	AGT (%)
B	B500B-R ou E500	Max	650				
		Min	500	540	10	14	5

Le premier "B" représente l'acier pour béton armé. Les 3 chiffres suivants(500) représentent les caractéristiques spécifiées de la valeur de limite d'élasticité supérieure. Et « R » signifie barre nervurée.

Les essais de traction sont réalisés au niveau du Laboratoire d'Essais Mécaniques du Moulin. L'essai de traction est l'un des essais les plus courants et les plus pratiqués. Il peut déterminer certaines propriétés mécaniques de base des matériaux comme critère de qualité des matériaux.



Figure III-15 : La machine de traction pour le fil à machine D>12 mm

Les résultats qui se trouvent sur le **tableau III-20** suivant sont :

Tableau III-20 : les résultats de traction de E500

Classe de ductilité	Nuanced' acier		Re Min (Mpa)	R _m Min(Mpa)	DuctilitéR _m /R _e Min	Ductilité Allongement(%)	AGT (%)
E	E500	Max	650				
		Min	500	540	10	14	5
Échantillon			593	694	17	23,57	10,10



Figure III-16: La machine de traction pour le fil à machine

Les résultats de la traction pour le fil machine sont rassemblés sur le **tableau III-21**.

Tableau III-21: Propriétés mécaniques selon la norme internationale D=5,5mm (C₈D₂)

Classe de ductilité	Nuance d'acier		R _e Min (Mpa)	R _m Min (Mpa)	Ductilité Allongement (%)	Z (%)
	C8D2	Max	310	435		
		Min	250	350	35	70

Tableau III-22: Résultats de traction (C8D2)

Classe ductilité	Nuance d'acier		R _{eM} in (Mpa)	R _m Min (Mpa)	Ductilité Allongement (%)	Z (%)
	C8D2	Max	310	435		
		Min	250	350	35	70
Échantillon			264	394	42,31	70,51

Les propriétés mécaniques de **E500** et **C8D2** sont représentées sur les **figures III-17** et **III-18** respectivement.

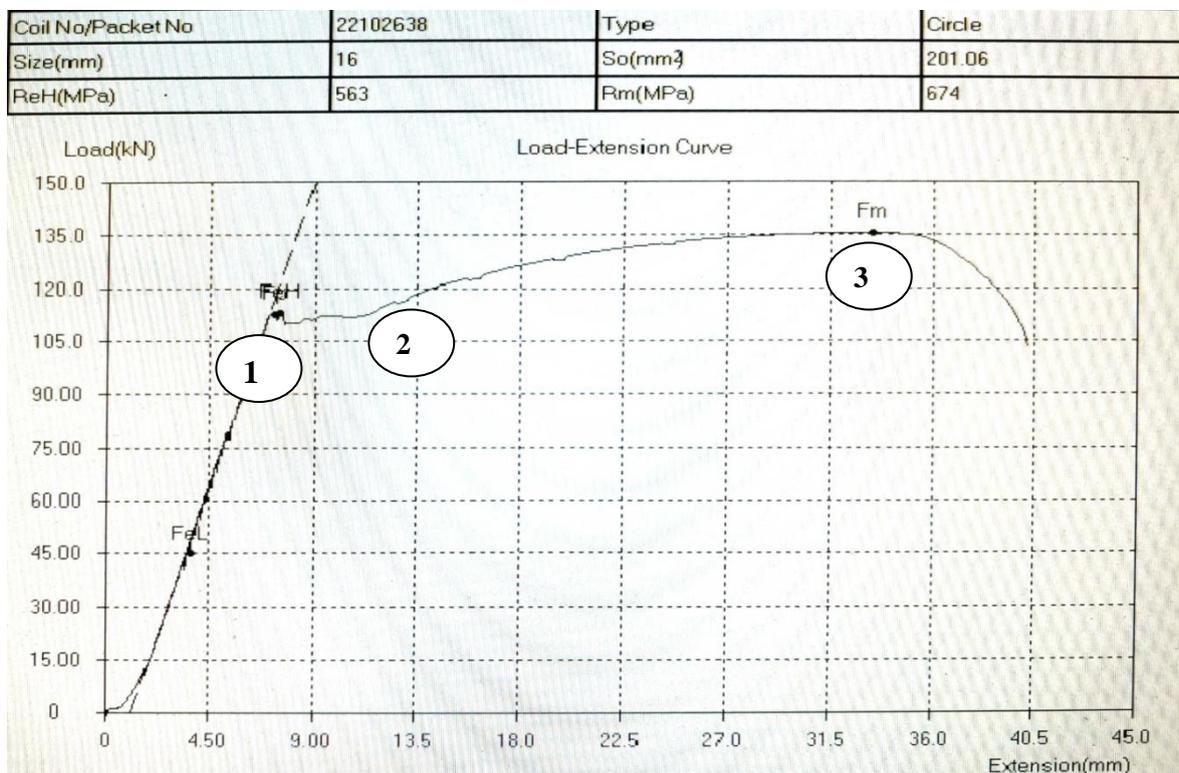


Figure III-17 : courbe de traction de l'échantillon E500

Coil No/ Packet No	22202557	Type	Circle
Size(mm)	5.5	So(mm ²)	23.76
Rm(MPa)	394	ReH(MPa)	264

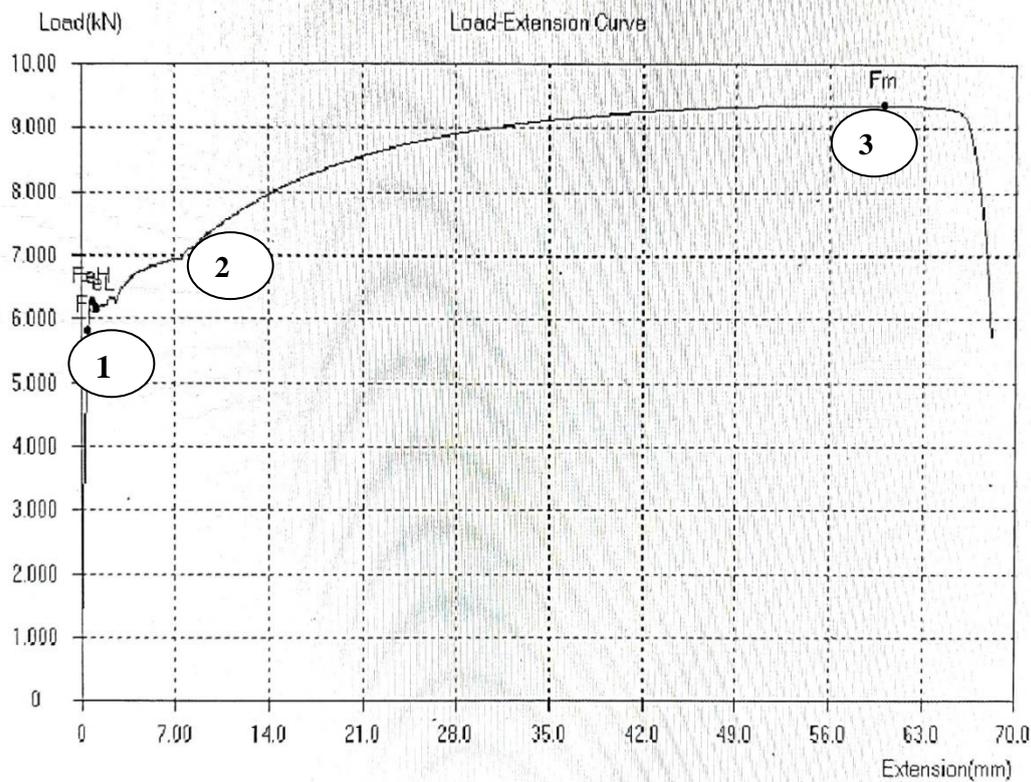


Figure III-18: La courbe de traction C8D2

Les figures III-17 et III-18 montrent plusieurs étapes expliquées comme suit :

Étape 1 :

Présente la limite d'élasticité (R_e) : c'est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

Étape 2 :

Présente l'allongement à la rupture : est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d'un matériau à s'allonger avant de se rompre lorsqu'il est sollicité en traction. Il consiste à réaliser un champ de contrainte uniforme et uni-axiale de traction dans une éprouvette et à enregistrer l'allongement résultant.

Étape 3 :

Présente la résistance à la traction : Elle correspond à la capacité d'un matériau à résister à des charges,

à des forces sans rompre en raison d'une concentration de contrainte ou de déformation. La résistance maximale à la traction (Rm) est souvent désignée par la contrainte maximale et est calculée en divisant la force maximale de traction que l'échantillon supporte par sa surface transversale.

Par comparaison (**Tableau III-23**) :

- À travers les courbes, nous notons que la valeur de **Re** est beaucoup plus élevée dans le type **E500** par rapport à le type **C8D2**.
- Grâce à des analyses chimiques et courbes, nous concluons que la présence de carbone augmente la résistance du fer au resserrement et réduit l'allongement.

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résilience	Dureté à froid	A%
Aluminium						
Carbone						
Chrome						
Manganèse						
Nickel						
Silicium						

Tableau III-23 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers[6].

III-17. Propriétés thermiques:

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi

donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , A %.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure)

cas des matériaux ayant subi le forgeage.

- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subits une déformation plastique.

Le module de dilatation thermique du ferrailage est très proche de celui du béton. Sous l'effet du feu, le rond à béton résiste à des températures élevées avant que les propriétés de résistance et de ductilité ne changent. De nombreuses structures en béton qui ont été soumises un incendie peuvent être réhabilitées en utilisant l'acier d'armature existant[4].

Références

- [1]. Meilland, R. (2005). Spectrométrie d'émission optique à source étincelle (partie 2). Ed. Techniques Ingénieur.
- [2]. <https://www.eltra.fr/fr/produits/analyseurs-chs/cs-i/fonction-caracteristiques/>.
- [3]. Khalifa, H., Megahed, G. M., Hamouda, R. M., & Taha, M. A. (2016). Experimental investigation and simulation of structure and tensile properties of Tempcore treated rebar. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 244-253.
- [4]. Okba Boughedda, Application des traitements thermiques lors du laminage à chaud du rond à béton de l'acier Tempcore-500 (Algerian Qatari Steel-AQS).
- [5]. Boujriou Linda mémoire avec Benamira Messaoud (2021) Étude de la structure et des propriétés de l'acier à béton.
- [6]. http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/trait_thermic/_

Conclusion générale

Ce travail vise à décrire le processus de préparation et de production de l'acier à travers trois principales unités de production et à décrire les différentes propriétés chimiques, physiques, mécaniques et thermiques pour produire de l'acier avec les propriétés requises pour les marchés nationaux et internationaux en utilisant des technologies respectueuses de l'environnement et conformes aux normes internationales. .

Le complexe commence par une grande unité de réduction directe qui utilise le procédé MIDREX et le gaz naturel comme source de gaz de réduction et d'énergie. Les pastilles d'oxyde de fer en vrac sont réduites (oxygène éliminé) en fer métallique solide par un gaz réducteur constitué d'hydrogène et de monoxyde de carbone, lui-même fabriqué par reformage de gaz naturel. Le résultat est un produit solide appelé fer spongieux ou fer réduit (DRI). Les différentes caractérisations physico-chimiques réalisés sur la matière première et le produit DRI confirment l'obtention d'un produit du fer réduit (DRI) présentant un degré de métallisation de 94,71 % attestant une qualité du produit conforme aux normes internationales.

Le rond à béton de qualité MS-fe500, possédant des propriétés mécaniques qui dépassent les exigences de la norme (ISO6935-2/2015), à l'aide d'un Traitement d'austénitisation et une déformation à chaud suivie par un trempé à l'eau suivie d'un auto-revenu. Ces traitements thermiques sont appliqués dont l'objectif principal est de former en extrémité de la martensite et au coeur de la ferrite. Ces structures formées permettent d'assurer un bon compromis entre résistance et ductilité et un équilibre au sein du rond à béton.

Résumé :

Le Complexe sidérurgique de Bellara (AQS) utilise des technologies plus avancées pour la fabrication du rond à béton et de file machine de différents diamètres et de chaux vive, dolomitique et de fer réduit DRI.

La matière première sous forme de pellets constitués essentiellement de l'oxyde de fer (hématite; Fe_2O_3) est réduite dans l'unité de la réduction directe en utilisant la technologie MIDREX à l'aide du gaz naturel (les gaz utilisés dans la réduction à du four sont H_2 et CO produits par l'unité de reformage à partir du gaz naturel) suivi par une fusion des DRI (HDRI ou CDRI+scrap). Dans un four à arc éclectique puis à LRF (à son niveau, des éléments chimiques sont ajoutés selon les normes internationales) afin de fabriquer un produit semi fini sous pression d'eau appelé biellette. L'étape finale est la production du rond à béton de qualité MSfe500, fil machine (par traitement thermique) possédant des propriétés mécaniques bien déterminées. Tout au long de cette chaîne de production des contrôles de qualité sont réalisés afin de garantir une qualité du produit final selon les normes internationales.

Mots clés : Acier, DRI, CDRI, LRF, MIDREX , AQS.

Abstract

The Bellara Iron and Steel Complex (AQS) uses the most advanced technologies for the manufacture of rebar and wire rod of different diameters and of live lime, dolomitic and DRI reduced iron.

The raw material in the form of pellets consisting essentially of iron oxide (hematite; Fe_2O_3) is reduced in the direct reduction unit using MIDREX technology and using natural gas, (the gas used in the reduction to of the furnace are H_2 and CO produced by the reforming unit from natural gas). Followed by a fusion of the DRI (HDRI or CDRI+ scrap). In an eclectic arc furnace then at LRF (at its level, chemical elements are added according to international standards) in order to manufacture a semi-finished product under water pressure called a connecting rod. The final step is the production of MSfe500 quality rebar, wire rod (by heat treatment) with well-defined mechanical properties. Throughout this production chain, quality controls are carried out in order to guarantee the quality of the final product according to international standards.

Keywords: Steel, DRI, CDRI, LRF, MIDREX, AQS.

ملخص

يتم تقليل المواد الخام في شكل كريات تتكون أساساً من أكسيد الحديد (الهيماتيت ؛ Fe_2O_3) في وحدة الاختزال المباشر باستخدام تقنية MIDREX و باستخدام الغاز الطبيعي (الغازات المستخدمة في الاختزال في الفرن هي غاز H_2 و CO الناتج عن إعادة التشكيل عن طريق الغاز الطبيعي) يليها اندماج DRI (HDRI أو CDRI + الخردة). في فرن القوس كهربائي ثم في LRF (عند مستواه ، تتم إضافة العناصر الكيميائية وفقاً للمعايير الدولية) من أجل تصنيع منتج شبه نهائي تحت ضغط الماء يسمى قضيب التوصيل. الخطوة الأخيرة هي إنتاج قضبان التسليح ذات الجودة العالية MSfe500، وقضبان الأسلاك (عن طريق المعالجة الحرارية) بخصائص ميكانيكية محددة جيداً. خلال سلسلة الإنتاج هذه، يتم تنفيذ ضوابط الجودة من أجل ضمان جودة المنتج النهائي وفقاً للمعايير الدولية.

الكلمات الرئيسية: الصلب ، DRI ، CDRI ، LRF ، MIDREX ، AQS.