

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie



الجزائرية القطرية للصلب
ALGERIAN QATARI STEEL

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux

Thème

L'étude de l'effet des traitements thermiques sur les aciers au carbone élaborés par le complexe Bellara

Réalisé par : **Mr. AZZI Amine** et **Mr. BOUCHAIR Mohammed**

Présenté et soutenu publiquement le : 18/06/2023

Composition du Jury:

Président : **Mr. HELLAL Fatah**

Promoteur : **Mr. CHITROUB Mohamed**

Examineurs : **Mr. ABADLI Kamel** et **Mr. DAIMELLAH Abderrahmane**

ENP 2023

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie



الجزائرية القطرية للصلاب
ALGERIAN QATARI STEEL

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux

Thème

L'étude de l'effet des traitements thermiques sur les aciers au carbone élaborés par le complexe Bellara

Réalisé par : **Mr. AZZI Amine** et **Mr. BOUCHAIR Mohammed**

Présenté et soutenu publiquement le : 18 /06 /2023

Composition du Jury:

Président : **Mr. HELLAL Fatah**

Promoteur : **Mr. CHITROUB Mohamed**

Examineurs : **Mr. ABADLI Kamel** et **Mr. DAIMELLAH Abderrahmane**

ENP 2023

Remerciements

Notre gratitude et nos remerciements vont au bon Dieu qui nous a donné la santé, le courage, la patience et la force pour mener à bien cette humble œuvre.

*Nous exprimons notre gratitude et notre reconnaissance à notre initiateur Monsieur **MOHAMED CHITROUB** pour sa patience, son leadership, ses capacités d'organisation et de planification qui nous ont permis de mener à bien cette étude.*

*Nous remercions également monsieur le président de jury **HELLAL Fatah** et les examinateurs monsieur **ABADLI Kamel** et monsieur **DAIMELLAH Abderrahmane** d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous tenons également nos sincères remerciements à Mr. **MEDJRAB AZIZ**, notre promoteur de thèse à **ALGERIAN QATARI STEEL**, malgré ses responsabilités. Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont aidé au niveau de l'AQS, et particulièrement monsieur **BOUTCHABOU Mohamed**.*

Notre sincère et profonde gratitude va à tous les enseignants du Département de métallurgie de l'Ecole Nationale Polytechnique pour les connaissances et la perspicacité qu'ils nous ont transmises au cours des trois sessions de formation.

Nous tenons particulièrement à remercier nos chers parents, frères et sœurs « que Dieu les bénisse », qui ont toujours été là pour nous et qui nous ont soutenus pendant toutes ces années d'études.

Nous espérons qu'ils trouveront toute notre gratitude et notre amour dans ce spectacle. Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*A ma chère mère, pour tous ses sacrifices, son amour, sa
tendresse, son soutien et ses prières tout au long de mes études,*

*A mon père qui a été là toute ma vie,
A toute ma famille, mes frères et sœurs, mes chers amis et tous ceux qui m'ont
aidé dans ce projet de thèse.*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire.*

Merci d'être toujours là pour moi.

Amine

Dédicace

À ma chère mère, source de ma vie et de ma joie.

À mon père, pour son support et la puissance le long de mon
parcours scolaire.

À mes chers frères et mes sœurs, toutes les personnes les plus proches du cœur,
Pour leurs encouragements et leur soutien réconfortant durant les moments les
plus difficiles.

À tous mes amis qui m'ont aidé à surmonter les difficultés et m'ont encouragé
pour arriver jusqu'au bout, dans les meilleures conditions possibles.

Mohammed

Sommaire
Listes des figures
Listes des tableaux
Nomenclatures

Introduction générale.....	14
Chapitre I : Description du Complexe Sidérurgique Bellara.....	17
Introduction	18
I.1. Description du Projet.....	19
I.2. Description du Processus Industriel	22
I.3. Aciérie électrique	25
I.4. Laminage à chaud	27
I.5. Importance de l'établissement.....	27
I.6. Produits de l'entreprise	28
Chapitre II : Processus d'élaboration de l'acier au niveau de l'aciérie électrique.....	30
Introduction	31
II.1. Description générale du procédé.....	31
II.2. Présentation générale du four à arc [4].....	32
II.3. Affinage en poche.....	40
II.4. Présentation du procédé de la coulée continue	46
II.5. Mise en forme de l'acier	48
Chapitre III : Les traitements thermiques des aciers	62
Introduction	63
III.2. Structure d'acier.....	65
III.3. Traitement d'austénitisation	66
III.4. Le maintien en température	66
III.5. Mécanisme de la transformation lors de l'austénitisation	67
III.6. Rôle des éléments d'alliage.....	68
III.7. Rôle de la taille de grains	69
III.8. La trempe de l'acier.....	69
III.9. Les différents produits de transformation au refroidissement [16]	70
III.10. Le revenu.....	71
Chapitre IV : Partie expérimentale	74
IV.1. Introduction	75
IV.2. Les méthodes des traitements utilisés dans le complexe.....	75
IV.3. Méthodes utilisées.....	76
IV.4. Conclusion.....	98
Chapitre V : Analyse des résultats.....	99
V.1. Introduction	100
V.2. Analyse chimique	100

V.3. Analyse de la microstructure	102
V.4. Dureté	106
V.5. Essai de traction.....	110
V.6. Essai de pliage	113
V.7. Conclusion.....	114
Conclusion.....	115
Références bibliographiques	116
Annexes	118

Liste des tableaux

Tableau II.1: L'influence des éléments d'additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers.[6].....	46
Tableau IV.1: Différentes méthodes d'essai de dureté.	89
Tableau V.1: Composition chimique de notre échantillon du rond à béton E500.....	100
Tableau V.2: Analyses effectuées dans le but de suivre l'élaboration.	100
Tableau V.3: Profil de dureté de la billette.	107
Tableau V.4: Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur.	108
Tableau V.5: Les caractéristiques géométriques et mécaniques du rond à béton.....	110
Tableau V.6: Caractéristiques géométriques et mécaniques du fil machine (diamètre 7 mm).	112
Tableau A1.1: Caractéristiques de traction.	118
Tableau A1.2: Dimensions, masses linéiques et écarts admissibles.	119
Tableau A1.3: Valeurs dimensionnelles de pliage.....	120

Liste des figures

Figure I.1: Vue du complexe.....	18
Figure I.2: Aciers électriques.....	20
Figure I.3: Unité de Réduction Directe (DRI).....	20
Figure I.4: Unité de Production de Chaux.....	21
Figure I.5: Unité de production des gaz industriels.....	21
Figure I.6: Procédé MIDREX [3].....	22
Figure I.7: Sections de four de la réduction direct.....	23
Figure I.8: Les réactions chimiques [3].....	23
Figure I.9: Four à cuve.....	24
Figure I.10: Reformeur.....	25
Figure I.11: Four à arc électrique.....	26
Figure I.12: Four à poche.....	26
Figure I.13: Transport de pré réduit de minerai de fer (DRI) vers lacerie électrique.....	26
Figure I.14: Billettes.....	28
Figure I.15: Fil à machine.....	29
Figure I.16: Rond à béton.....	29
Figure II.1: Processus de production d'une opération de fabrication d'acier à four à arc électrique (EAF). [4].....	32
Figure II.2: Schéma du four à arc électrique.....	33
Figure II.3: Billes de fer pré réduit.....	35
Figure II.4: Ferrailles.....	35
Figure II.5: Chargement de la ferraille dans le four. [4].....	37
Figure II.6: Alimentation de pré réduit DRI.....	38
Figure II.7: L'extraction des scories.....	40
Figure II.8: Schéma de principe de la coulée continue. [8].....	47
Figure II.9: Recristallisation dynamique au cours du laminage.[11].....	50
Figure II.10: Parc à billettes. [4].....	52
Figure II.11: Four de réchauffage. [4].....	53
Figure II.12: Cage1 du dégrossisseur. [4].....	55
Figure II.13: Système de refroidissement à l'air (cooling bed).....	57
Figure II.14: Ligatureuse en fardeaux.....	58
Figure II.15: Zone de stockage.....	58
Figure II.16: Caractéristiques mécaniques de l'acier après les traitements thermomécaniques et la trempe en fonction de la pause entre déformation à chaud et refroidissement.[13].....	60
Figure III.1: Diagramme fer-carbone.....	66
Figure III.2: Influence des éléments d'alliage sur le diagramme de phase FeC.....	70
Figure III.3: Principe du processus Tempcore.[18].....	73
Figure IV.1: Spectromètre de L'AQS.....	76
Figure IV.2: Machine de polissage.....	77
Figure IV.3: Échantillon.....	77
Figure IV.4: Calibrage de spectromètre.....	78
Figure IV.5: Opération de polissage.....	78
Figure IV.6: Échantillon certifié.....	79
Figure IV.7: Scie à ruban horizontale.....	80
Figure IV.8: Opération de découpage.....	81
Figure IV.10: Tronçonneuse CM260.....	82
Figure IV.13: Échantillon enrobé.....	84

Figure IV.14: Échantillon après l'enrobage.....	84
Figure IV.17: Échantillon après l'attaque chimique.....	87
Figure IV.18: Microscope métallographique inversé - echolab - im500bd (AQS).....	88
Figure IV.19: Mesure de la dureté du produit fini.	89
Figure IV. 20: Mesure de la dureté du produit sans traitement thermique.....	90
Figure IV.21: Mesure de la dureté du rond à béton diamètre 16 mm	90
Figure IV.22: Duromètre (AQS).....	91
Figure IV.23: Fiche technique de l'essai de traction au niveau de l'entreprise.[4].....	92
Figure IV.24: Échantillon avant découpage.....	94
Figure IV.25: Machine de traction mécanique universelle.	94
Figure IV.26: Essai de traction du fil machine.	95
Figure IV.27: Machine d'essai d'effort.....	96
Figure IV.28: Essai de traction du rond à béton.....	96
Figure IV.29: Opération de pliage.	97
Figure IV.30: Éprouvette après l'essai de pliage.....	98
Figure V.1: Les trois zones : a- Zone trempée, b- Zone intermédiaire, c- Cœur.....	102
Figure V.2: Micrographie de la billette (X200).	103
Figure V.3: Vue par microscope optique (épaisseur de la martensite).....	104
Figure V.4: Micrographie de la couche supérieure (martensite X200).	104
Figure V.5: Micrographie de la couche intermédiaire (bainite X500).	105
Figure V.6: Micrographie de la couche centrée ((ferrite + perlite) X500).	105
Figure V.7: Micrographie du fil machine ATT.	106
Figure V.8: Dureté de la billette du rond à béton (E500).....	107
Figure V.9: Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur.	108
Figure V.10: Duretés du fil machine : sans traitement.	109
Figure V.11: Courbe de traction du rond à béton de diamètre 16 mm (produit fini).	111
Figure V.12: Courbe de traction de fil machine de diamètre 7 mm (produit fini).	113
Figure V.13: Résultat de l'essai de pliage.....	114

Nomenclature

Alphabet Latin

A%	Allongement, %
Ag%	Pourcentage d'extension plastique à la force maximale, %
Agt%	Pourcentage d'extension totale à la force maximale, %
Ac1	Point de transformation eutectoïde
Ac3	Fin de la transformation du fer α en fer γ
AISI	American Iron and Steel Institute
AQS	Algerian Qatari Steel
ATT	Avant traitement thermique
E500 (B500B-R)	B : Acier ordinaire, 500 : limite d'élasticité en MPa
C	Carbone
CCM	Continuous casting machine
CDRI	Cold directed reduction iron
C _{eq}	Carbone équivalent
C ₂ H ₅ OH	Ethanol
d	Densité de maillage
DRI	Directed reduction iron
E	Module d'élasticité, MPa
EAF	Electric arc furnace
H	Hardness (Dureté)
HA	Haute Adhérence
HBI	Hot briquet iron
HDRI	Hot directed reduction iron
HNO ₃	Acide nitrique
HRB	Dureté de Rockwell B
HV	Dureté de Vickers
ISO	International Organization for Standardization
LF	Ladle furnace
Mn	Manganèse
MS	Martensite start
P	Phosphore

P	Perlite
R	Rapport de ductilité
Re	Limite d'élasticité, MPa
Rm	Résistance à la rupture, MPa
S	Soufre
S0	Section initiale, mm ²
TFL	Température de Fin de Laminage, C°
TRC	Transformation Refroidissement Continue
TR	Temps de Revenu, C°
Tγ	Température de réchauffage, C°
Z	Striction

Alphabet Grec

α	Alpha (ferrite fer α)
δ	Delta (fer δ)
ρ	Densité, kg/m ³
ν	Coefficient de poisson
ξ	Epsilon (déformation)
γ	Gamma (austénite)
σ	Segma (contrainte en MPa)

ملخص

يجب أن تفي الخصائص المطلوبة عمومًا لصلب التسليح (حديد التسليح وقضبان الأسلاك) بالمتطلبات المحددة في المعايير الوطنية والأوروبية والدولية. لأن حديد التسليح (حديد التسليح وقضيب الأسلاك) يلبي الحاجة المتزايدة في قطاع الهندسة المدنية، في تشييد الهياكل، المباني والجسور، إلخ. تحمل دراستنا في نهاية الدورة تأثير المعالجة الحرارية على فولاذ E500 وقضبان الأسلاك لمجمع Bellara AQS الهدف من هذا العمل هو توصيف السلوك الميكانيكي في توتر حديد التسليح. وبالفعل تم تنفيذ هذا العمل مع شركة ALGERIAN QATARI STEEL، حيث سيتم دراسة تأثير المعالجات الحرارية (التبريد + التقسية الذاتية) على البنية الدقيقة باستخدام المجهر واستنتاج الخصائص الميكانيكية المختلفة مثل الصلابة والمقاومة والصلابة. حديد التسليح بالتقنيات التجريبية المختلفة المستخدمة.

الكلمات المفتاحية: حديد التسليح، التقسية الذاتية، الصلابة، قوة الخضوع، قوة الكسر، البنية المجهرية.

Abstract

The properties generally required of reinforcing steels (rebar and wire rod) must meet specific requirements specified in national, European and international standards. Because reinforcing steels (rebar and wire rod) meet a growing need in the civil engineering sector, in the construction of structures, buildings, bridges, etc.

Our end-of-cycle study bears the effect of heat treatment on E500 steel and wire rod of the AQS Bellara complex. The aim of this work is to characterize the mechanical behavior in tension of reinforcing steels. Indeed, this work was carried out with the company ALGERIAN QATARI STEEL. It will study the influence of heat treatments (quenching + self-tempering) on the microstructure using a microscope and deduce the different mechanical properties such as hardness, resistance and stiffness of reinforcing steels by the different experimental techniques used

Keywords: reinforcing steels, quenching, self-tempering, yield strength, breaking strength, microstructure.

Résumé

Résumé

Les propriétés généralement demandées aux aciers d'armature (rond à béton et fil machine) doivent répondre à des exigences particulières précisées dans des normes nationales, européennes et internationales. Parce que les aciers d'armature (rond à béton et fil machine) répondent à un besoin croissant dans le secteur du génie civil, dans la construction des structures, des bâtiments, des ponts, etc.

Notre étude de fin de cycle porte l'effet des traitements thermiques sur l'acier E500 et fil à machine du complexe AQS Bellara. Le but de ce travail est de caractériser le comportement mécanique en traction des aciers d'armature. En effet ce travail a été réalisé avec l'entreprise ALGERIAN QATARI STEEL. Il étudiera l'influence des traitements thermiques (trempe + auto-revenu) sur la microstructure en utilisant un microscope et déduire les différentes propriétés mécaniques telles que la dureté, la résistance et la rigidité des aciers d'armatures par les différentes techniques expérimentales utilisées.

Mots clés : Aciers d'armature , Trempe, Auto-Revenu, Limite élastique, résistance à la rupture, Microstructure.

Introduction générale

Introduction générale

Dans l'industrie sidérurgique, les barres d'armature passent par plusieurs processus de développement et de fabrication. La technologie AQS n'est pas basée sur les hauts fourneaux. Elle est basée sur la réduction directe de l'oxyde de fer à l'aide d'une installation de réduction directe, telle que la technologie MIDREX.

L'élaboration a lieu au niveau du four à arc électrique d'une aciérie électrique, la ferraille est chargée dans le four et trois électrodes en graphite sont descendues de la voûte du four. Au fur et à mesure que l'électrode se rapproche de la ferraille, un arc se forme (injection haute tension). En raison de la résistance électrique élevée et de la génération de chaleur intense, une fois l'arc généré, la ferraille atteint rapidement la température de fusion. La composition chimique de l'acier en fusion est ajustée dans un petit four (four poche) juste avant la coulée continue. L'étape de mise en forme finale se fait par le procédé de laminage à chaud. Après l'étape de laminage à chaud, vient le procédé TEMPCORE qui a été développé au début des années 1970. Ce dernier consiste à soumettre l'acier laminé à chaud à un traitement thermique en ligne en 3 étapes successives : en quittant le stand de laminage, le produit est refroidi rapidement à travers une installation. La troisième étape aura lieu lorsque le produit repose sur le lit de refroidissement (cooling bed) et il continue son refroidissement à l'air libre pour atteindre la température ambiante. L'objectif de ce procédé est l'optimisation de processus de production pour éviter l'addition de certains éléments coûteux [1].

L'objectif principal de ce travail est de découvrir le domaine sidérurgique de la réduction directe de l'oxyde de fer, de l'élaboration et de la mise en forme des barres d'armature, en particulier la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Tempcore Algérie-Qatar Steel (barre d'armature et fil machine) pour en évaluer les caractéristiques.

Les travaux ont été réalisés en collaboration avec la société algérienne Qatar Steel (AQS). Notre étude se base sur différents tests et analyses de :

- Analyse chimique de la billette
- Observation métallographique des différents échantillons
- Essai de dureté
- Essai de traction
- Essai de pliage

Introduction générale

Le mémoire est scindé en cinq chapitres, nous commençons par le 1^{er} chapitre la Description du Complexe Sidérurgique de Bellara, puis le 2^{ème} chapitre qui parle sur le processus industriel au niveau de l'entreprise AQS, après le 3^{ème} chapitre nous parlons sur les traitements thermiques, ensuite nous parlons sur la méthodologie des essais dans le 4^{ème} chapitre, et on termine avec le 5^{ème} chapitre analysant les essais effectuer et les interpréter.

Chapitre I : Description du Complexe Sidérurgique Bellara

Introduction

Algerian Qatar Steel Company est une société à capitaux publics, une joint-venture entre l'Algérie et le Qatar, issue du partenariat établi pour gérer le nouveau complexe sidérurgique de Bellara. AQS opère dans la Commune d'El-Milia, Zone Industrielle de Bellara, Wilaya de Jijel, située à 400 km de la capitale Alger, où se trouve un complexe sidérurgique d'une superficie totale de 216 hectares. Grâce au volume de production, à la fiabilité et au développement technique, Qatari Steel of Algeria occupe une place importante dans la carte nationale et régionale de l'industrie sidérurgique [2].



Figure I.1: Vue du complexe.

Les principaux partenaires d'AQS SIDER et QATAR STEEL sont des entreprises ayant une longue expérience dans la sidérurgie, responsables de la gestion et de l'exploitation de deux grands complexes sidérurgiques en Algérie (complexe El Hadjar Annaba) et au Qatar Complexe MIC près de Doha respectivement. la technique mise en œuvre dans le complexe MIC de Qatar Steel et la réduction directe est similaire à celle utilisée dans le complexe de Bellara.

I.1. Description du Projet

Construction d'une aciérie en deux phases d'une capacité de quatre (04) millions de tonnes de produits sidérurgiques. Démarrage prévu de la phase 01 en 2017 pour la production de deux (02) millions de tonnes de produits sidérurgiques (barres et fils en béton) par an, mettant en œuvre :

- Unité de réduction directe pré-réduite à partir de 2 500 000 tonnes de granulés importés.
- Deux aciéries électriques pour la production de 2 100 000 tonnes de billettes par an.
- Trois laminoirs pour la production de barres de béton de 1,5 MT et de fil machine de 0,5 MT.
- Unité de gaz industriel.
- Unité de production de chaux.
- Unité de production d'eau industrielle
- Installations de manutention et de transport (port et chantier).
- Ateliers centraux de maintenance.
- Stocks de pièces détachées et alliages ferreux.
- Espaces sociaux.

Principales unités de production

Algerian Qatari Steel contribue à la création de richesses et soutient la structure industrielle nationale en répondant aux besoins du marché sidérurgique local et en exportant les excédents vers les marchés régionaux et internationaux. AQS a commencé à fabriquer et à commercialiser des produits en fer à la fin de l'année 2017.

Le complexe sidérurgique de Bellara est équipé de la technologie la plus avancée au monde et comprend des unités de production écologiques qui garantissent une efficacité de production maximale et une qualité de produit conforme aux normes internationales.

Unité de Réduction Directe (DRI) : Capacité de production 2,5 millions de tonnes par an.

Deux aciéries électriques : capacité de production totale 2,2 millions de tonnes par an.

Trois laminoirs : la capacité de production totale de barres d'armature et de fil machine est de 2 millions de tonnes par an.



Figure I.2: Aciers électriques.



Figure I.3: Unité de Réduction Directe (DRI).

Installations Complémentaires

- Unité de Production de Chaux.
- Unité de production des Gaz Industriels
- Station de Réception et de Transport des Matières Premières.
- Usine de Traitement des Eaux.
- Sous-station Électrique.



Figure I.4: Unité de Production de Chaux.



Figure I.5: Unité de production des gaz industriels.

I.2. Description du Processus Industriel

Dans le processus de réduction directe, les granulés d'oxyde de fer en vrac sont réduits (l'oxygène est éliminé) en fer métallique à l'état solide avec un gaz réducteur. Le minerai de fer est sous forme d'hématite Fe_2O_3 ou de magnétite Fe_3O_4 . Le procédé MIDREX est constitué d'un gaz réducteur à partir d'hydrogène et de monoxyde de carbone, eux-mêmes produits par reformage de gaz naturel les températures de transformation sont proches de $1000\text{ }^\circ\text{C}$. En conséquence, un produit est créé un solide appelé fer spongieux ou DRI (Direct Reduced Iron). Le DRI est un produit pyrophorique ce qui signifie qu'il est susceptible de s'enflammer spontanément lorsqu'il est exposé à l'air et doit être manipulé avec soin pour éviter tout contact avec l'eau et doit être stocké dans une atmosphère inerte pour éviter la combustion spontanée. Dans le procédé MIDREX, en règle générale, le gaz naturel est utilisé comme source de gaz réducteur et comme source d'énergie au four à cuve.

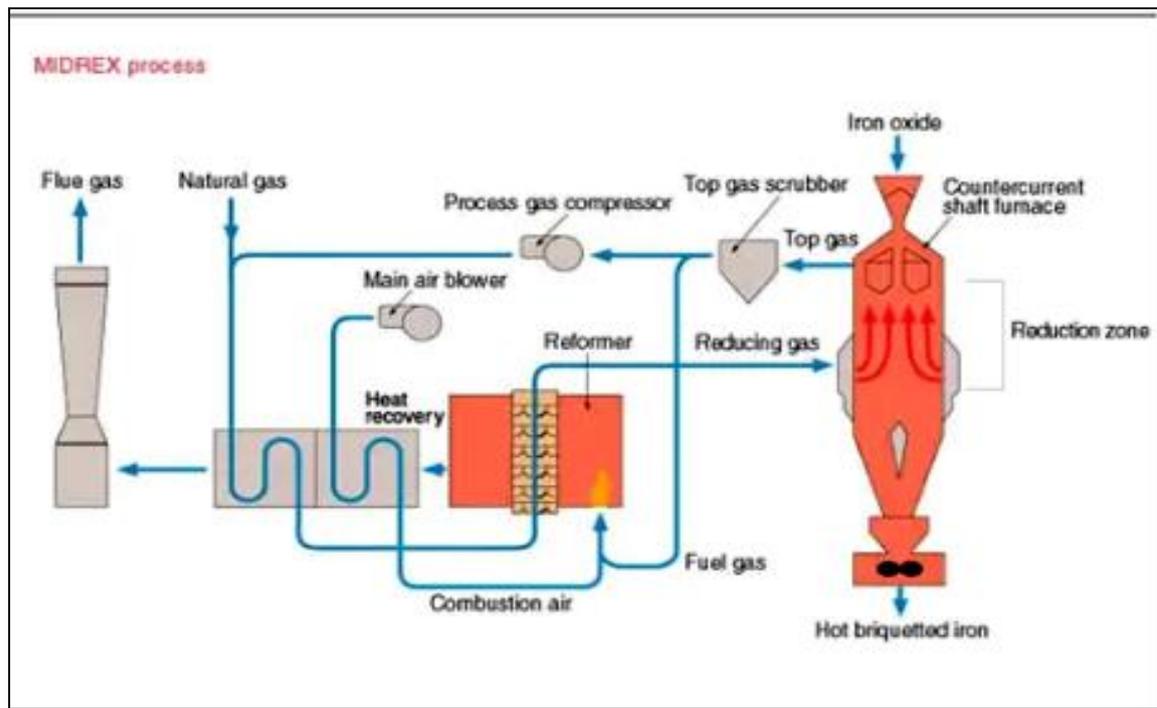


Figure I.6: Procédé MIDREX [3].

Réduction : Le minerai de fer, en boulettes ou en morceaux, est introduit au sommet du four à cuve. Lors de sa descente dans le four par gravité, la charge solide s'échauffe et l'oxygène est éliminé du minerai de fer (réduction) par des gaz réducteurs remontant à contre-courant (H_2 et

CO). Ces gaz réagissent avec les oxydes de fer (Fe₂O₃, Fe₃O₄ et FeO) du minerai et les convertissent en fer métallique, produisant en même temps H₂O et CO₂.

Le DRI est refroidi et cémenté par un gaz de refroidissement (méthane) entrant dans la partie inférieure du four à cuve. Le plus souvent, le DRI froid est stocké pour une utilisation ultérieure dans un four d'aciérie électrique (EAF) voisin.

Le DRI peut également être déchargé à chaud et alimenter une machine de briquetage pour la production de fer réduit à chaud (HBI, Hot Briquetted Iron), ou bien alimenter à chaud un four électrique (EAF).



Figure I.7: Sections de four de la réduction direct.

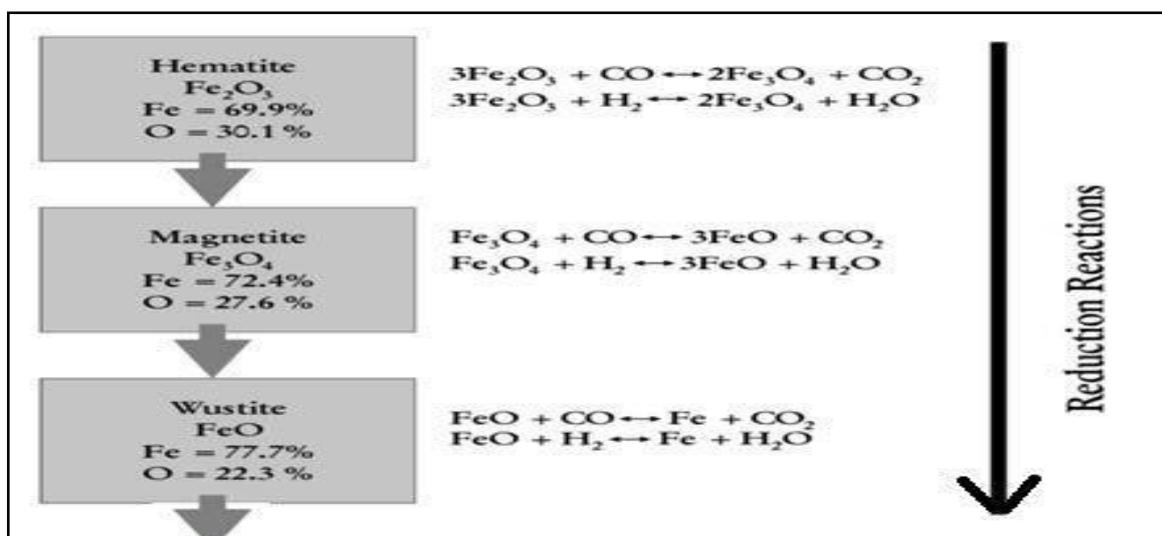
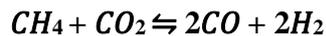


Figure I.8: Les réactions chimiques [3].

Reformeur : Le gaz de tête du four à bélier est recyclé après lavage et élimination éventuelle du CO₂ et est divisé en deux parties : une partie est utilisée comme gaz combustible et l'autre partie est mélangée au gaz naturel et envoyée au reformeur. Il s'agit d'une chambre à embase contenant des tubes en alliage remplis de catalyseur. Le gaz est chauffé et reformé lors de son passage dans les tubes selon les principales réactions :



Le gaz reformé, un gaz de synthèse contenant 88 à 92% de H₂ et de CO (base sèche), est ensuite introduit dans le four à piston comme gaz réducteur. Dans le procédé MIDREX, la chaleur est produite en brûlant du gaz naturel en plusieurs points. Les gaz réducteurs chauffent le four à piston lui-même, il faut donc faire circuler un débit suffisant dans le système (4 à 5 fois le débit stœchiométrique requis pour la réduction).

L'intégration énergétique permet d'optimiser le processus. En particulier, il y a une importante récupération de chaleur en amont du reformeur. Une partie de la chaleur sensible des fumées de reformage est récupérée pour préchauffer le mélange gazeux d'alimentation, l'air de combustion du brûleur et l'alimentation en gaz naturel.



Figure I.9: Four à cuve.



Figure I.10: Reformeur.

I.3. Aciérie électrique

L'acier liquide est obtenu en faisant fondre de la ferraille ou des minerais de fer pré-réduits avec de l'électricité dans un four à arc électrique, le résidu est chargé dans le four et trois électrodes en graphite descendent du toit du four. Des arcs se produisent (haute tension) lorsque les électrodes se rapprochent de la puce. En raison de la résistance électrique plus élevée et de la chaleur intense dégagée par l'arc, la ferraille atteint rapidement son point de fusion. La composition chimique de l'acier liquide est ensuite ajustée dans un four plus petit (four à canard) juste avant la coulée continue. [4]

En fin de production, l'acier est collecté à l'état liquide dans des caisses métalliques recouvertes de matériaux réfractaires et ainsi transporté vers la fonderie.

La structure de cette installation est caractérisée par un entrepôt DRI, un parc à ferraille et un parc ferroalliage, deux fonderies, deux fours sans fond, deux usines de traitement sans fond et deux coulées continues de billettes.



Figure I.11: Four à arc électrique.



Figure I.12: Four à poche.



Figure I. 13: Transport de pré réduit de minerai de fer (DRI) vers lacerie électrique.

I.4. Laminage à chaud

Le laminoir se compose de plusieurs cages constituées de cylindres, entre lesquels le métal passe et progressivement broyé. Les cylindres tournent dans des sens opposés et sont regroupés par paires. Ils sont généralement rainurés pour les produits sous forme de sticks. Le formage de l'acier se fait par laminage, qui consiste en plusieurs procédés, au cours desquels les ébauches obtenues lors de la fusion sont transformées en produits longs de forme et de dimensions spécifiques. Avant de rouler, les flans doivent être réchauffés dans la cheminée chauffante. Le laminage se produit surtout à l'état austénitique de la fonte malléable. Le durcissement a lieu entre 1100°C et 1200°C et la finition peut être effectuée à des températures allant jusqu'à 800°C.

I.5. Importance de l'établissement

Le développement de la sidérurgie est une activité stratégiquement importante pour l'Algérie en tant que moteur de croissance et de développement. Il est considéré comme un élément important de la chaîne d'approvisionnement du pays, fournissant des matériaux de base à des industries entières, développant et produisant des millions de produits sidérurgiques et fournissant des emplois directs et indirects et des moyens de subsistance à des milliers de familles. Entre autres, les effets positifs suivants ressortent :

- Création d'emplois (Phase 1) : 3 000 travailleurs en phase de construction et 1 500 emplois directs et 10 000 emplois indirects en phase d'exploitation.
- Au moins 23 millions de dollars en salaires et 27 millions de dollars en frais d'entretien sont distribués chaque année, dont la plupart affecteraient directement l'économie locale.
- L'effet positif du projet sur la balance du commerce extérieur de l'Algérie, qui se traduirait par une réduction significative de la facture et de la dépendance aux importations.
- Payer des impôts à un effet positif sur les finances publiques.
- Maintenir la valeur ajoutée économique et les connaissances techniques dans le pays.

I.6. Produits de l'entreprise

L'AQS commercialise une large gamme de produits sidérurgiques offrant à la fois une grande quantité et une qualité supérieure à des prix compétitifs et avec une excellente fiabilité conformément aux exigences des clients, aux exigences réglementaires et aux exigences légales et réglementaires. Ses produits sont fabriqués à l'aide des dernières technologies entièrement automatisées et disposent d'une grande capacité de production et de stockage pour différentes tailles de produits finis. [2]

- **Billette** : L'ébauche est un produit semi-fini d'une section de 150×150 mm et d'une longueur de 12 mètres provenant de l'industrie métallurgique, en particulier de l'industrie sidérurgique. Produit par un procédé de coulée continue, qui est destiné à la production de barres d'armature, de fil machine, et la production est réalisée selon le principe du laminage à chaud.



Figure I.14: Billettes.

- **Fil à machine** : Fil rond de haute qualité d'un diamètre de 5,5 à 14 mm. Le fil rond et lisse est obtenu par laminage à chaud selon la norme algérienne NA 8634 et les normes internationales. La capacité de production est de 500 000 tonnes par an.



Figure I.15: Fil à machine.

- **Rond à béton** : Produit laminé à chaud de l'acier universel à la construction hautement liée, soudable à la qualité RB 500 NA8634 (2015) et ISO 6935-2 (2015), avec un large choix de diamètres : 8, 10, 12, 14,16, 20, 25, 32, 40 mm et avec une capacité de production de 1 500 000 tonnes/an, les chiffres suivants montrent différents produits fabriqués par l'entreprise.



Figure I.16: Rond à béton.

**Chapitre II : Processus
d'élaboration de l'acier au
niveau de l'aciérie électrique**

Introduction

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 document de l'entreprise.[4]

II.1. Description générale du procédé

La fusion directe de matériaux ferreux tels que la ferraille, généralement effectuée dans des fours à arc électrique, joue un rôle important. L'utilisation de fours à arc électrique dans la sidérurgie implique des coûts d'investissement réduits pour les aciéries, des besoins énergétiques considérablement réduits pour les aciéries intégrées par rapport aux procédés de four à coke/fours à haute teneur en oxygène/convertisseurs, et l'élimination du besoin de fours à coke. [4]

La production d'acier dans les fours à arc électrique comprend le chargement de la ferraille, la fusion, l'affinage, le décarburage et la coulée. En plus de la ferraille, le lot contient également des éléments nécessaires pour la fonte brute et les alliages. De la ferraille supplémentaire peut être introduite dans le four pendant que la ferraille est fondue. Les fours à arc génèrent de la chaleur en faisant passer un courant électrique à travers une charge de four entre des électrodes en graphite. Cette énergie est complétée par du gaz naturel, de l'oxygène et d'autres combustibles.

Dans cette partie on va étudier le principe de fonctionnement de l'aciérie électrique et concernant le fonctionnement de l'aciérie on peut distinguer trois niveaux dont les opérations principales sont :

- La fusion de la charge dans le four à arc électrique.
- Le transport poche de l'acier liquide vers l'affinage.
- La coulée continue dans la machine de coulée continue.

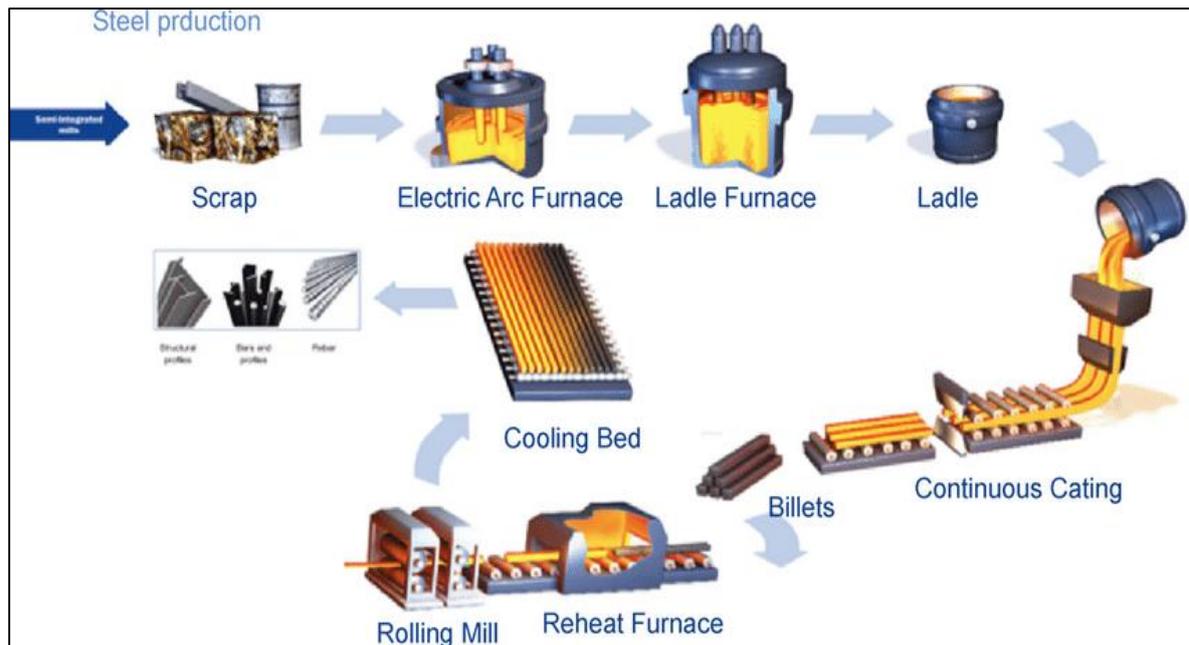


Figure II.1: Processus de production d'une opération de fabrication d'acier à four à arc électrique (EAF). [4]

II.2. Présentation générale du four à arc [4]

Un four à arc électrique est une cuve cylindrique à sole réfractaire en forme de creuset et d'électrode tombant d'un dôme amovible. L'intérieur du four est revêtu de briques réfractaires. Les murs sont généralement constitués de panneaux refroidis à l'eau et recouverts pour minimiser les pertes de chaleur. Les électrodes peuvent également être équipées d'un refroidissement par eau, et l'énergie nécessaire est fournie sous forme d'énergie électrique au moyen d'arcs électriques souples entre les électrodes de graphite et la charge métallique. La charge fond sous l'influence d'un arc électrique, il s'agit d'une fonderie conçue pour fondre le métal primaire, qui est de la ferraille mais peut être des minerais pré-réduits. Un four à arc est un système électrothermique qui utilise l'énergie produite par un arc électrique pour chauffer la charge. Les fours à arc sont utilisés presque exclusivement pour produire de l'acier à charge métallique, où des arcs sont formés entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, qui fait fondre le métal en conséquence directe des arcs creusant dans la charge métallique solide.

Les fours à arc sont alimentés en courant alternatif ou en courant continu. Compte tenu de la puissance mise en jeu, ils sont généralement alimentés à partir d'un réseau haute tension ou moyenne tension. À l'origine, le four à arc était utilisé essentiellement pour la production de tous types d'aciers car il permet non seulement d'atteindre des températures élevées

(supérieur à 1650°C), mais aussi de réaliser un affinage sur mesure en assurant au choix une atmosphère oxydante et/ou réductrice.

Les principaux éléments constitutifs du four électrique sont :

- L'alimentation électrique.
- L'enceinte du four proprement dite capable de contenir d'abord des ferrailles fondre, de densité relativement faible (donc nécessité d'un grand volume disponible), puis l'acier liquide porté à des températures de 1600 à 1700°C (donc nécessité d'un revêtement intérieur de la cuve à l'aide de réfractaires), notamment au fond de cuve (sol réfractaire).
- Les installations annexes, telle que le système d'aspiration et traitement des fumées (Dépoussiérage, Désoxydation) et les systèmes d'additions.

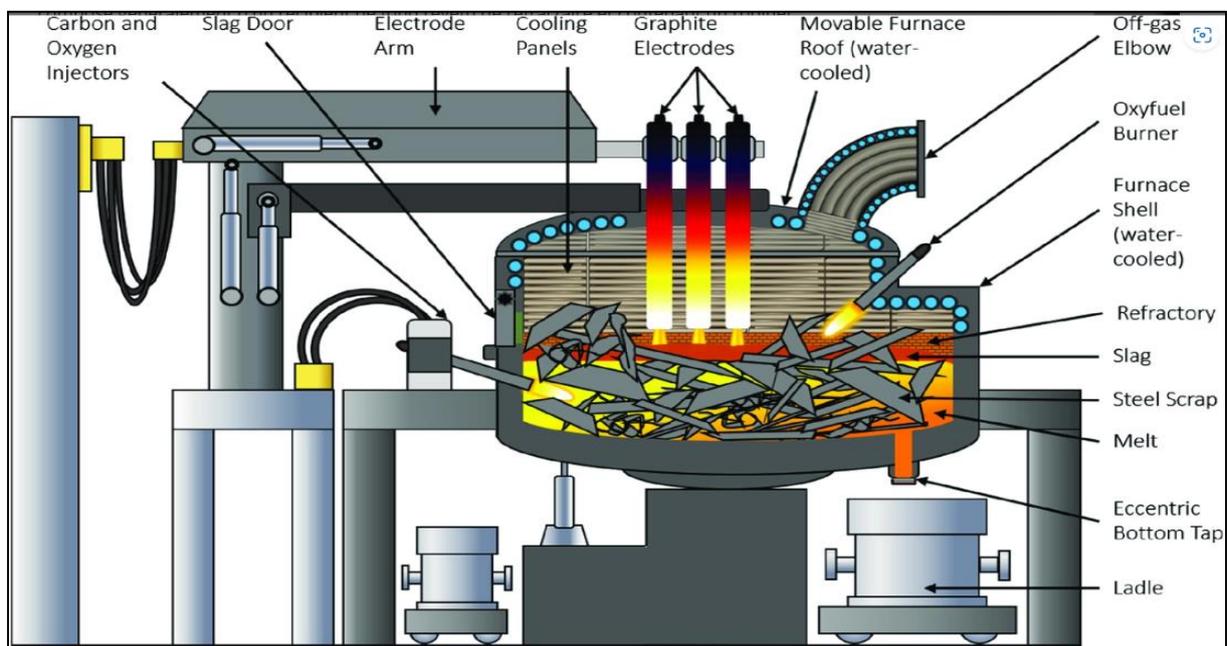


Figure II.2: Schéma du four à arc électrique.

II.2.1. Les matières premières utilisées dans le four à arc

Le four à arc n'était pas capable de fondre directement du minerai de fer (Fe_2O_3), les ferrailles, le fer pré réduit ou la fonte. Ces trois matières premières ont des compositions de la charge de four et donc des propriétés d'usage différentes. Suivant les proportions utilisées, le sidérurgiste peut atteindre la qualité d'acier voulue, essentiellement déterminée par la teneur en produits résiduels présents dans les matières premières. [5]

II.2.1.a. Les ferrailles (scrap)

Les ferrailles, issues de la récupération ou de la collecte interne, constituent la principale matière première employée par les usines à four à arc électrique. Si les chutes internes (ressources propres) représentent des matières premières d'excellente qualité, les ferrailles, provenant de la récupération, sont la principale source d'éléments résiduels des aciers fabriqués par le four à arc. Les éléments résiduels, présents dans les ferrailles, peuvent avoir des effets négatifs sur les propriétés des aciers et doivent être plus au moins limités en fonction de l'utilisation finale de l'acier.

Pour pouvoir maîtriser efficacement la quantité d'éléments résiduels, les sidérurgistes ont établi une classification des ferrailles en fonction de leurs provenances et de leurs caractéristiques. A chacune de ces catégories correspondent des densités de compositions, déterminées par analyses statistiques ou par fusion-test. On peut distinguer dans cette classification les ferrailles de bonne qualité (chutes neuves et chutes internes), de celles issues de la collecte et de la récupération (démolition industriel, automobile, ...). Les éléments résiduels ne sont pas la seule nuisance générée par l'utilisation des ferrailles. Leur fusion génère des volumes importants de gaz riches en CO et CO₂ riches en métaux la manipulation des ferrailles sur le parc, leur chargement dans le four, la fusion avec les amorçages d'arc génère des niveaux sonores très importants. La fusion des ferrailles dans les fours actuels nécessite entre 400 et 450 kWh par tonne d'acier.

II.2.1.b. Les pré réduits (DRI)

Les pré réduits (DRI : Direct Reduced Iron), 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 pré réduits 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 du pré réduit ne nécessite pas une adaptation particulière des fours à arc.

La régularité de leur taille en fait un produit particulièrement bien adapté au chargement continu. Introduits généralement près des électrodes pour éviter qu'ils se collent sur les parois du four, les pré réduits permettent, de diluer les éléments indésirables présents dans les ferrailles et également d'obtenir des teneurs en gaz (azote) inférieures. La fusion du pré réduit cependant

nécessite plus d'énergie que dans le cas de la ferraille, il faut environ 650 kWh d'énergie électrique pour élaborer une tonne d'acier. Le DRI peut être chargé en continu dans le four pendant la fusion (volume de coke réduit, perturbations électriques réduites lors de la charge continue, etc.).



Figure II.3: Billes de fer pré réduit.



Figure II.4: Ferrailles.

II.2.1.c. La fonte

La fonte, métal fortement carburé, produite par les hauts fourneaux, peut être utilisée sous forme solide (pig iron) ou liquide (hot métal, la fonte solide, exemple de polluants, permet de diluer les résiduels introduits par les ferrailles. Toutefois, la forte teneur en carbone impose une longue phase de décarburation, au cours de laquelle de l'oxygène est insufflé afin de brûler le carbone. Cette opération génère un volume important de gaz et peut augmenter la durée du cycle de fusion diminuant ainsi la productivité du four. La fonte liquide, est utilisée principalement pour élaborer des aciers de hautes qualités. Les enfournements sur four vide sont possibles mais imposent un fonctionnement sans pied de bain pour éviter des réactions avec le laitier.

Le principal intérêt de la fonte liquide, en plus de sa propreté métallurgique, est qu'elle ne nécessite que très peu d'énergie pour être portée à la température de fusion de l'acier. En effet, enfournée à une température d'environ 1400 °C, seulement 50 kWh par tonne d'acier.

II.2.1.d. Autre additifs

- Matériaux de fabrication de laitier (lime, dololime ou chaux dolomitique)
- Carburateurs (coke métallurgique, débris d'électrodes, etc.)
- Poudre de carbone (principalement pour la mousse de laitier)
- Matériaux d'alliage comme ferro-alliages pour les besoins d'analyse de la nuance d'acier.

II.2.2. Marche d'une opération dans le four électrique [4]

La fonction de four à arc a des étapes de procédure clairement définies qui sont les suivants :

II.2.2.a. Chargement du four (charging)

Le chargement doit être réalisé le plus rapidement possible pour limiter le refroidissement du creuset par le rayonnement des parois.

Le chargement du four est toujours une partie importante et sensible du processus, à la fois en termes de mesures pour éviter d'endommager le revêtement et les plaques du four et pour faciliter le processus de fusion. Le four électrique est alimenté en ferraille par des paniers en acier spéciaux. Ce panier permet d'évacuer les ferrailles vers le foyer par une ouverture. Avant de charger la ferraille, l'électrode est soulevée hors du four et le toit est soulevé et pivoté. Placez ensuite le panier à ferraille (seau) sur le dessus du four ouvert. Le godet est hissé au-dessus du réservoir par une grue et l'ouverture de la vanne du godet est actionnée par le contrôle de la charge. Le seau est ouvert lorsqu'il est au-dessus du poêle avec l'axe vertical central aligné

avec l'axe du poêle. Pour éviter d'endommager à la fois la vanne du godet et le panneau du four réfrigéré, le fond du godet est surélevé jusqu'à environ 0,5 m au-dessus du haut du four

La séquence d'ouverture du godet est la suivante :

- Le chariot de levage auxiliaire serre les câbles d'ouverture du godet et en même temps le chariot principal abaisse le godet ;
- Le chariot auxiliaire ouvre rapidement le godet faisant tomber la ferraille dans le four. Si possible, le chariot principal abaisse le godet et accélère l'ouverture de la vanne ; une fois le four chargé, le chariot principal soulève le godet et le chariot secondaire abaisse et ferme le godet qui est ensuite enlevé.

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



Figure II.5: Chargement de la ferraille dans le four. [4]

Le chargement du four se fait par étapes et le nombre de seaux est généralement de 2 à 4 selon la densité du fer. La tendance actuelle est de fonctionner sur seulement deux charges. Dans certains cas, le chargement peut être effectué dans un seul godet (en fonction du volume de l'EAF, des propriétés et de la densité des ferrailles) ou avec un approvisionnement continu en billes de fer pré réduites (DRI). Utilise un système de bandes transporteuses et de trémies montées sur le toit du four.



Figure II.6: Alimentation de pré réduit DRI.

II.2.2.b. Fusion (melting)

Lorsque le four est chargé, le transformateur est mis en marche et les trois électrodes sont descendues sur la ferraille. Un arc est amorcé entre la pointe de l'électrode en graphite et la charge. Le métal fond rapidement sous l'action de la chaleur dégagée par l'arc. L'électrode descend lentement jusqu'à ce qu'un bassin de métal en fusion se forme sous l'arc. A partir de ce moment, l'arc travaille dans un puits creusé dans la charge, et son rayonnement fait couler le métal et la charge s'affaisser progressivement vers le fond. La quantité de chaleur augmente et finit par noyer la dissolution presque complètement à ce titre, il peut être divisé en trois périodes bien caractérisées nécessitant des conditions de fonctionnement très différentes :

Phase de forage (drilling) : les électrodes creusent un puits au milieu de la cuve du four à arc qui est remplie de ferrailles. Cette séquence de fonctionnement a lieu sous puissance réduite. Le puits ainsi créé permet de limiter le rayonnement de l'arc sur les parois du four et donc de minimiser l'usure du matériau réfractaire. Cette phase dure environ 2 min.

Phase de fusion (melting) : dans cette phase, la puissance du four à arc électrique dans le premier panier reste au maximum. L'arc conserve une bonne efficacité thermique tant qu'il est inondé. Quelques minutes après l'allumage, dans certains cas, les buses à oxygène servent de chalumeau pour découper les plus gros morceaux de ferraille. A la fin de la première fusion du panier, l'injection de charbon fond les beignets sans base. Cette étape prend 15-25 minutes.

La charge DRI du four est ajustée pour maintenir une température du bain d'acier d'environ 1560-1580°C. Si l'alimentation DRI suit la charge de la lame, la lame fondra jusqu'à

environ 300 kWh/tonne pour garantir suffisamment de liquide au début de l'alimentation DRI pour faciliter la fusion du DRI.

II.2.2.c. Affinage (réfining)

A ce stade, la ferraille est complètement fondue, mais l'acier n'est pas assez chaud pour être coulé. En raison du fort rayonnement de l'arc, le flux de chaleur vers les murs augmente fortement, la foi est observée. Des lances à oxygène et à charbon sont activées et la combustion du charbon introduit directement dans le bain produit des gaz dont les constituants moussent les scories entraînées dans la ferraille. Le bouchon de mousse limite le rayonnement de l'arc vers le mur. L'injection de gaz apporte de l'énergie supplémentaire dans le bain pour l'agiter et ainsi l'homogénéiser. Pour minimiser l'usure des matériaux réfractaires, cette phase se déroule à basse tension, donc la puissance est réduite et dure environ 10 minutes.

L'affinage permet l'extraction du phosphore de l'aluminium, du silicium, du manganèse et du carbone par un processus d'oxydation de l'acier fondu au laitier. Ceci est réalisé grâce à l'alimentation en oxygène du système d'injection pour obtenir la teneur en carbone souhaitée.

Déphosphoration : Est un procédé métallurgique classique qui réduit la teneur en phosphore pour éviter la formation de fissures internes dans l'acier. Divers procédés industriels s'articulent autour de l'oxydation du phosphore et de la capture des oxydes formés par les scories. Pour être efficace, le laitier doit être basique. Cela implique également l'utilisation de réfractaires basiques dans la construction du garnissage du four.

Décarburation : Ou affinage, comme son nom l'indique, est une opération métallurgique qui élimine une partie du carbone contenu dans l'acier en fusion. Uniquement possible dans les fours à arc électrique. Le processus de raffinage élimine non seulement une partie du carbone, mais améliore également considérablement les propriétés de l'acier en stimulant le traitement par bain. La réaction de base est l'oxydation du carbone dissous par l'oxygène, qui peut être fourni sous forme gazeuse ou sous forme d'oxydes métalliques (comme FeO).

Le phosphore, avec le soufre, est l'un des éléments les plus problématiques car sa capacité à rester dans le laitier dépend fortement de la température du laitier, de sa basicité et de sa teneur en FeO. L'élimination du soufre à ce stade est très difficile car les conditions sont trop oxydantes et si la teneur en soufre du bain est trop élevée il faut affiner l'acier (affinage en poche).

II.2.2.d. L'extraction des scories (déslaging)

Dans cette étape, du carbone est injectée dans le laitier pour réduire le FeO restant et permettre la formation de mousse. Les scories et sont retirés en inclinant le four vers l'arrière.



Figure II.7: L'extraction des scories.

II.2.2.e. Coulée (tapping)

Lorsque la température du bain est suffisante (environ 1620°C), le métal en fusion est coulé et acheminé vers le four poche, le trou de coulée est ouvert et le four est basculé pour permettre l'évacuation de l'acier en fusion. Le fond de l'acier en fusion, appelé Bain (Hot Heel) est maintenu dans la cuve et représente 48 tonnes. Les aciéries électriques de l'AQS contiennent deux fours à arc électrique d'une capacité d'environ 120 T chaque fusion et pour une consommation électrique d'environ de 80 MW.

II.3. Affinage en poche

Dans le domaine de la métallurgie secondaire, divers procédés d'affinage ont été développés et mis en œuvre pour répondre aux exigences de qualité et atteindre une productivité et des économies plus élevées. La mission de Senka métallurgie est d'apporter la qualité et la température de l'acier liquide du convertisseur. Un procédé de four à liquide appelé LF (Ladle-furnace) est utilisé pour affiner l'acier liquide dans un environnement réducteur.

II.3.1. Four a poche

Un four latéral est installé dans l'aciérie électrique pour la production d'aciers de haute qualité. C'est dans ce domaine que la réalisation de l'acier semble rentable, elle permettrait de supprimer une longue période de traitement ou un four électrique, le four latéral remplit la fonction de fusion, fixant avec nuance analytique, équilibrant la température et fixant la température de coulée souhaitée dans la poche, et avec des briques poreuses et des alliages métalliques, et grâce à un entonnoir installé près de la poche, les alliages peuvent être amenés à la cuillère. Le procédé LF (ladle furnace) a ainsi permis non seulement d'améliorer la qualité et de contrôler la composition chimique, la température et les performances de l'acier, mais également d'augmenter la productivité du four électrique directement alimenté en LF.

Le four à poche est un processus de production pour tous les types d'acier, y compris l'acier de haute qualité, en mettant l'accent sur l'affinage du métal de laitier, ce qui signifie que le nettoyage du laitier, tel que l'oxydation et la désulfuration, est facile sous le laitier alcalin dans la poche et réduction, atmosphère l'acier liquide est mélangé dans une cuillère par barbotage pour initier des réactions, tout en réalisant une homogénéisation de la température et un contrôle de la composition chimique. De plus, le chauffage à l'arc submergé, où les électrodes en graphite sont entrelacées en couches, le laitier liquide empêche l'érosion tenace causée par le rayonnement de l'arc.

Les poches de traitement sont au nombre de 8 poches maçonnées et sont équipées des accessoires nécessaires pour effectuer les traitements nécessaires au niveau LF et au-dessus, garantissant fusion au niveau de la fonte continue et des sources. Généralement, les poches sont revêtues d'un matériau résistant au feu, dont la qualité varie en fonction des zones d'usure.

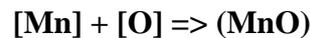
II.3.2. Avantages du four poche

Le procédé de fabrication dans un four à poche permet :

- Homogénéisation précise et contrôle de la température de l'acier.
- Ajustement précis de la composition de l'acier par addition.
- Une de désulfurer jusqu'à un bas niveau.
- Possibilité de produire de l'acier à faible taux d'inclusion (pureté d'inclusion)
- Réglez la vitesse de l'aciérie avec la fonction entre le four et la fusion continue.
- Augmente la productivité de l'acier.

II.3.3. Désoxydation

L'oxydation de l'acier commence lorsque l'alliage métallique est ajouté lors de la coulée. Le but de l'anti oxydation est d'obtenir de l'acier trempé (acier à faible teneur en O₂) pour éviter formation de défauts (bulles) lors de la solidification de l'acier. Le carbone a une affinité chimiquement plus élevée que le manganèse en oxygène, donc le manganèse ne peut pas faire cela pour désoxyder l'acier liquide dans un four à arc électrique, par réduction uniquement par conséquent, la capacité d'oxydation du manganèse augmente à la température de l'acier lors de la solidification de l'acier, le manganèse peut éliminer l'oxydation de l'acier. Réaction La désoxydation du 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 :

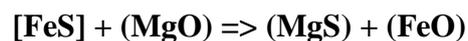
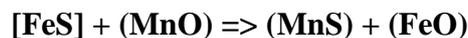
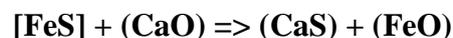


II.3.4. Désoxydation complexe

L'acier est généralement oxydé non pas par un oxydant, mais par trois ou plus antioxydants (Mn, Si, Al, ...) qui permettent une oxydation et une formation complètes les impuretés non métalliques (oxydes) sont plus susceptibles d'être éliminées du métal.

II.3.5 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.
2. Un laitier basique (riche en CaO).
3. 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 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 (pexe Sulfex, Desulfat).

II.3.6. Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers [6]

1. Aluminium

Jusqu'à présent, peu d'aluminium a été ajouté aux aciers à outils car il affecte négativement les propriétés de traitement telles que le traitement thermique, l'usinabilité et le meulage, ainsi que la résistance et le durcissement. Cependant, l'évolution des méthodes de production permet d'augmenter significativement la teneur de certains aciers au carbone (supérieure à 1 %). Cet ajout d'aluminium a un effet significatif sur le développement des microstructures lors des cyclages thermiques.

2. Carbone

Le carbone est un élément important dans le durcissement de l'acier, et la dureté varie avec la teneur en carbone de l'acier non allié. Avec une teneur en carbone supérieure à 0,6, on atteint le domaine des aciers à outils, caractérisé par une dureté élevée, qui correspond au domaine des aciers rapides à froid. Une augmentation progressive de la teneur en carbone entraîne une diminution des températures correspondant au traitement thermique.

3. Cobalt

Le cobalt est communément ajouté en quantités variables entre 3 et 15 %, notamment dans les aciers rapides qui travaillent dans des conditions sévères. Il permet d'effectuer la trempe à des températures plus élevées. Il accroît la dureté à chaud dans toute l'échelle de température allant de l'ambiante à 600 °C et retarde le sur vieillissement de l'acier au-delà du durcissement secondaire. Il améliore également la résistance à l'oxydation catastrophique de l'acier lors du chauffage entre 1000 et 1100 °C, surtout pour des teneurs supérieures à 5 %. Par contre, il diminue la ductilité de l'acier pour des teneurs supérieures à 3 % et a une action néfaste sur la trempabilité, si bien que les nuances à forte teneur en cobalt posent des problèmes d'obtention de dureté pour des outillages de dimensions importantes.

4. Chrome

Le chrome est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0.5 à 17%. Il joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Il forme des carbures qui participent à la résistance à l'abrasion et s'opposent au grossissement de grains lors de l'austénitisation. Il provoque, par ailleurs, un certain retard à l'adoucissement lors du revenu, ce qui améliore la résistance à chaud. Il entraîne également une très forte réduction de l'oxydation à haute température.

5. Manganèse

Le manganèse a un effet similaire sur le comportement des aciers à outils que le nickel. Il est généralement présent sous forme d'élément résiduel à une concentration de 0,3 à 0,5 %. Certains aciers à outils contiennent jusqu'à 2 % de manganèse pour résoudre les problèmes de durcissement et jusqu'à 1 % de cet élément pour éliminer le soufre. Le manganèse est présent dans les aciers en partie sous forme d'impuretés résiduelles, en partie à cause de l'oxydation. Une partie du manganèse est un élément délibérément ajouté pour neutraliser les effets néfastes du sulfure de fer, produisant du sulfure de manganèse relativement moins nocif. Le manganèse améliore les propriétés mécaniques et le traitement thermique. Le manganèse a une efficacité très élevée en tant qu'antioxydant et est utilisé pour obtenir de l'acier entier sans défauts internes tels que des soufflures.

6. Silicium

Comme le carbone, les aciers industriels contiennent toujours l'élément silicium. Il forme facilement des solutions solides avec le fer dans les états delta, gamma ou alpha et avec la cémentite, réduisant sa solubilité. Bien que cela se produise principalement dans l'état une petite partie de la solution solide de ferrite est sous une forme combinée, c'est-à-dire du dioxyde de silicium SiO_2 , qui forme des impuretés non métalliques dans le métal. De nombreux aciers marts sont partiellement oxydés en ferrobium, un antioxydant puissant qui élimine principalement les gaz et les oxydes et empêche la formation de bulles de gaz dans le métal qui se solidifie dans le lingot ou le moule, donnant du métal entier, librement. Cloques Le silicium améliore la résistance de l'acier aux hautes températures. Les premiers films d'oxyde de surface formés sont collants et inertes et empêchent une oxydation rapide. Certains aciers à haute teneur en chrome résistants à la chaleur contiennent 1 à 3 % de silicium.

7. Nickel

Le nickel se comporte de la même manière que le manganèse. Son principal avantage est qu'il abaisse considérablement la température des points critiques. Les points critiques de Ac3 et Ac1 diminuent tous les deux d'environ 10 °C pour chaque addition de 1,5 de nickel. Cette baisse est beaucoup plus importante pour le refroidissement que pour le chauffage. Etant donné que la ségrégation de la ferrite et la formation de perlite sont ralenties, l'effet sur la structure est similaire à celui qui serait causé par l'augmentation de la vitesse de refroidissement de l'acier au carbone ordinaire. Le nickel n'a qu'un effet modéré sur le durcissement des aciers. En abaissant la température des points critiques et la vitesse de refroidissement critique, il permet une plus grande liberté dans les conditions de traitement thermique. La température de revenu peut être abaissée, ce qui réduit le risque de décarburation et de déformation de surface.

8. Molybdène

L'acier au molybdène est devenu de plus en plus important dans la fabrication de pièces de machines. Le molybdène améliore les propriétés de résistance aux chocs des aciers trempés. Des recherches approfondies et des résultats observés signifient que le molybdène est maintenant le plus largement utilisé dans les aciers à haute résistance pour maintenir une bonne résistance aux chocs et aux hautes températures. Le succès de l'ajout de molybdène est dû à plusieurs raisons. L'un d'eux consiste à éliminer pratiquement toutes les tendances au durcissement après durcissement dans les aciers au chrome-nickel et autres aciers spéciaux. Le molybdène est donc un additif qui est généralement utilisé en même temps que d'autres. À l'exception de l'acier à outils, qui peut contenir jusqu'à 10 % de molybdène, un substitut de molybdène nécessite rarement plus de 1 % de molybdène pour obtenir un bénéfice maximal, et est souvent beaucoup moins. Ainsi, de nombreux aciers spéciaux ne contiennent que 0,15 à 0,40 μ molybdène. Le tableau suivant montre l'effet des additifs sur les propriétés mécaniques des aciers.

Tableau II.1: L'influence des éléments d'additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers.[6]

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↗			
Carbone	↗		↗		↘	↗		
Cobalt		↗					↗	
Chrome	↗	↗	↗		↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗			↗		↘
Molybdène	↗	↗					↗	
Nickel	↗	↗	↗		↗			↘
Silicium	↗	↗	↗			↗		
Titane	↗	↗	↗		↘	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	↗			↗	↗	
Vanadium	↗	↗		↗	↗	↗		

II.4. Présentation du procédé de la coulée continue

La production d'acier passe par une série d'étapes allant du minerai ou de la ferraille de fonte à l'acier pouvant être utilisé dans diverses industries (bâtiment, automobile, etc.). Le processus le plus courant qui permet la transition de l'acier liquide aux blocs d'acier solides est appelé coulée continue.

La coulée continue est une étape de solidification de l'acier liquide dont le principe est de couler de l'acier liquide dans une lingotière rectangulaire en cuivre. Le métal commence à former une croûte solide sur le côté des parois du moule, qui est fortement refroidie par l'eau. Le métal sortant du moule est tiré vers le bas par des rouleaux, il se termine par la solidification. Une barre carrée solide est tirée du bas de l'installation, qui est coupée en parties de la longueur souhaitée. [7]

II.4.1. Principe du fonctionnement de la machine de coulée continue [8]

La fonction principale de la machine de coulée est de transformer le métal de l'état liquide à l'état solide sous une forme déterminée par les capacités de formage des laminoirs en aval. Le produit résultant pose trop de problèmes lors du processus de moulage ultérieur et de la réalisation finale du matériau.

Une machine de coulée continue est constituée d'un moule en cuivre sans fond appelé lingotière (point numéro 3 sur la figure II.8), Il durcit l'acier au contact. Pour ce faire, un réseau de canaux le parcourt, où l'eau circule pour le refroidir en permanence. L'acier liquide est injecté

par le haut du lingot buse (caractère numéro 1). Lorsqu'il touche la paroi du moule, la température de l'acier liquide chute, provoquant sa solidification. Cette consolidation progresse donc, de la paroi du moule au cœur du produit et l'épaisseur du solide est proportionnelle au temps passé dans le moule. Ainsi, à mesure que l'acier se solidifie en lingot et se refroidit, l'épaisseur de la zone solidifiée est plus importante en dessous qu'en dessus du lingot. La partie centrale de l'acier reste liquide.

Une série de rouleaux (position numéro 2), appelés « rouleaux d'extraction », guident, et extraient en continu le produit partiellement solidifié du fond du moule. La solidification est terminée lorsque la surface de l'acier est refroidie pulvérisation d'eau. À la sortie de la machine, le produit est coupé à la taille souhaitée. Comme le produit est continuellement avancé entre les rouleaux, le moule subit un mouvement oscillatoire vertical. Ce mouvement favorise la lubrification et aide à lier les fissures cutanées pendant le collage 5), pour faciliter l'extraction du produit et limiter l'adhérence et isoler le ménisque (la surface libre de l'acier en fusion, repérée par le chiffre 5 sur la figure II.8), Un lubrifiant en poudre adhère à la surface d'acier exposée sur le dessus du moule (marquage numéro 4). Il peut donc créer une barrière de confinement entre l'air et l'acier liquide limitant l'oxydation des métaux et la formation d'inclusions non métalliques, le lubrifiant se liquéfie et s'introduit entre le moule et la peau solide. Le produit est généralement coupé à longueur au chalumeau (chalumeau à poudre pour l'inox). Cela peut être fait avec des ciseaux sur des produits de petite section. Selon la nature, le type et les exigences de qualité de surface du produit coulé, l'aval de la machine peut être conçu différemment.

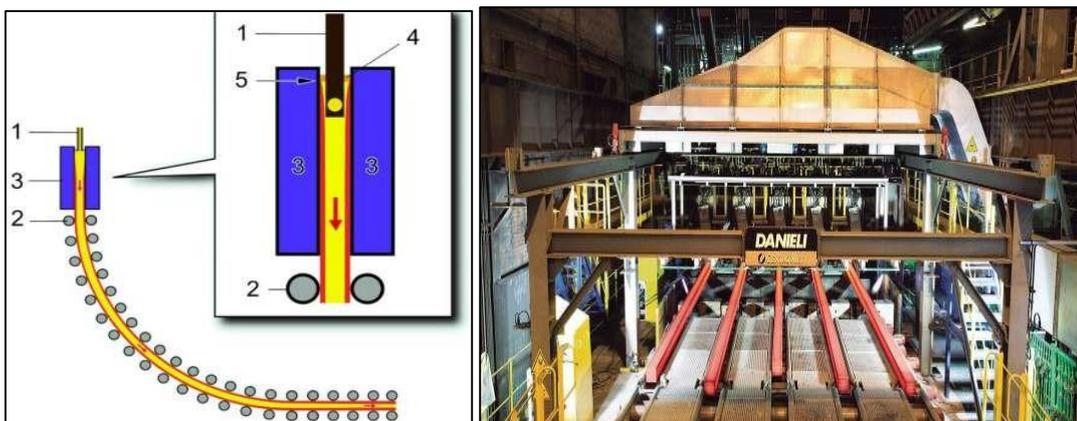


Figure II.8: Schéma de principe de la coulée continue. [8]

II.4.2. Défauts de coulée

L'un des plus gros problèmes pouvant arriver au cours de la coulée continue la peau solide n'est pas suffisamment épaisse pour contenir l'acier liquide et se déchire laissant ainsi l'acier s'écouler dans la machine. Ce phénomène entraîne une grosse perte financière due aux dégâts causés et au temps perdu pour la remise en marche de l'installation. L'une des causes principales d'une percée est la propagation d'un collage. Ce phénomène de collage débute généralement au début de la solidification, en haut de la lingotière (repère numéro 5 sur la figure II.8. En effet, c'est à cet endroit que la peau est la plus fine et donc qu'il y a plus de chance qu'un morceau de peau solidifiée se déchire et reste collé à l'intérieur de la lingotière. En général, lorsque la peau se déchire légèrement, elle se "ressoude", notamment grâce aux oscillations de la lingotière et la peau ne forme à nouveau qu'une seule pièce qui glisse à l'intérieur de la lingotière.

Un autre type de défaut pouvant survenir lors de la coulée est la formation de dépressions. Les dépressions se caractérisent par la présence de poches d'air ou de lubrifiant entre le produit et la lingotière, ce qui perturbe le processus de refroidissement du produit. Bien que ce défaut ne soit pas aussi grave que les collages, il peut entraîner une dégradation du produit. En effet, l'acier ne se solidifie pas de manière homogène, ce qui entraîne la formation de défauts structurels. Il est souvent difficile, voire impossible, d'éliminer ces défauts ultérieurement, ce qui entraîne une dégradation de la qualité du produit. [9]

II.5. Mise en forme de l'acier

L'acier est formé par laminage, qui est un processus composé d'une série d'opérations visant à transformer la billette obtenue par coulée en un produit long de forme et de dimensions spécifiques. Avant le laminage, la billette doit être réchauffée dans un four pour atteindre l'état austénitique, qui est particulièrement malléable et facile à mettre en forme. L'ébauche du laminage est réalisée à des températures allant de 1100°C à 1200°C, tandis que la finition peut être réalisée à des températures allant jusqu'à 800°C. [10]

II.5.1. Présentation du procédé

Le laminage est une opération de formage par déformation plastique visant à réduire la section de produits très longs en les faisant passer entre deux ou plusieurs outils qui tournent autour d'un axe. C'est la rotation de l'outil qui force le produit dans le manche par friction. C'est la définition d'un généraliste.[11]

D'un point de vue métallurgique, cela signifie atteindre d'excellentes propriétés mécaniques ou métallurgiques, l'opération précédente, qui peut être la coulée, ne donnant pas satisfaction sur ce point. Lors du laminage à chaud, la structure solidifiée est détruite ou du moins altérée. Les soufflures sont écrasées, allongées et même souvent ressoudées.

D'un point de vue mécanique, il met en œuvre des forces, des masses, des organes souvent critiques pour obtenir la bonne géométrie du produit final.

II.5.2. Laminage à froid et laminage à chaud

Il y a deux raisons principales pour lesquelles le laminage à chaud est nécessaire. La première est que la résistance à la chaleur du métal diminue rapidement avec l'augmentation de la température. Le second est la métallurgie. Lors du laminage à froid, le métal est écroui. Le défilement ne peut pas continuer au-delà de la limite. En plus de la rupture, l'écrouissage peut dépasser les capacités du laminoir à froid. [10]

En pratique, la première série de réductions démarre à haute température afin d'atteindre facilement les grandes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du matériau produit. Un travail à froid est alors nécessaire pour obtenir les bonnes propriétés géométriques et mécaniques et un bon état de surface.

Le laminage à froid est généralement effectué dans un laminoir inversé à plusieurs cylindres avec plusieurs cages se succédant. Décrivons le train roulant. Deux enrouleurs sont montés de chaque côté de la cage pour assurer la tension de la bande et la tension inverse. Le laminage a lieu sous un film d'huile minérale, qui favorise l'écoulement du métal, dissipe la chaleur générée par le laminage et lubrifie l'intérieur de la cage du laminoir. À basse température, un traitement thermique peut être effectué pour restaurer la structure et éviter les dommages. D'autre part, dans le laminage à chaud, la recristallisation se produit lors de la déformation lorsque la température du matériau le permet.

Le laminage à froid n'est généralement nécessaire que pour obtenir des tolérances serrées et une bonne finition de surface. D'un point de vue pratique La différence entre le procédé à haute température et le procédé à basse température est principalement due à la différence de forme des produits transformés. Dans ce cas il sera plus épais pour un laminage à chaud et plus fin pour un laminage à froid [10]

II.5.3. Aspect métallurgique

II.5.3.a. Ecroissage et restauration du métal pendant la déformation

La déformation élastique d'un matériau cristallin est causée par une distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par fracture et reconstruction Des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, un phénomène qui nécessite théoriquement une énergie considérable. La présence de dislocations et leur déplacement vers des niveaux plans privilégiés permettent la rupture et la reconstruction des liaisons. Simultané mais discret, réduisant fortement l'énergie stockée sous forme de dislocations.[11]

II.5.3.b. Recristallisation statique [11]

La recristallisation se produit par germination, croissance de nouvelles graines. Une recristallisation complète est obtenue lorsque les particules durcies sont complètement éliminées et remplacées par des particules non durcies recristallisation statique qui se produit après la fin de la déformation.

II.5.3.c. Recristallisation dynamique [11]

Semblable à la recristallisation statique, la recristallisation dynamique dans la phase austénitique passe par la nucléation et la croissance de nouveaux grains. La première caractéristique de la recristallisation dynamique réside dans le fait que l'environnement des grains nouvellement recristallisés continue de se durcir au fur et à mesure que leur croissance ralentit. La recristallisation dynamique conduit donc à un raffinement très important de la structure, au moins jusqu'à l'arrêt de la déformation. Une deuxième caractéristique de ce phénomène est La structure peut recristalliser plusieurs fois de suite au cours de la déformation. Contrairement à la recristallisation statique, la progression de la recristallisation dynamique est indépendante du temps mais de la déformation appliquée.

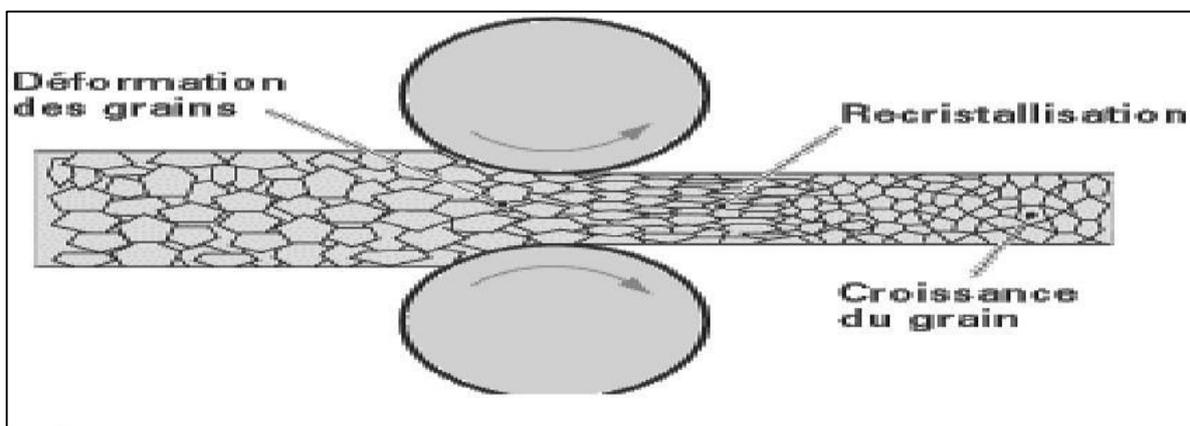


Figure II.9: Recristallisation dynamique au cours du laminage.[11]

II.5.4. Défauts de laminage [10]

II.5.4.a. Défauts métallurgiques et microstructuraux

Les défauts structuraux dépendent fortement de l'alliage considéré. Il s'agit de tailles de grains non uniformes, de structures cristallines mal orientées et d'inclusions Non métallique, porosité, fissures. Certains de ces défauts sont hérités de la structure coulée. Une combinaison de conditions crée des discontinuités (pores, fissures, criques) liées aux phénomènes et mécanismes d'endommagement des matériaux. Présence de contraintes de traction et d'inhomogénéités : d'où des liaisons mécaniques/métallurgiques microscopiques.

II.5.4.b. Défauts de surface

Parmi les défauts de surface, se distinguent les défauts chimiques tels que la corrosion, les dépôts d'oxyde, la contamination du lubrifiant et les défauts de rugosité. Ce dernier cas est directement contrôlé par le mécanisme de contact produit-vérin. Les microfissures peuvent résulter de contraintes de traction superficielles, la porosité peut être le résultat d'inclusions de lubrifiant (poches d'huile) ou de phénomènes de corrosion, par exemple un remplissage incomplet des trous de départ provoqué par un décapage.

II.5.5. Les différentes étapes du laminage à chaud

Ce procédé nous permet d'attribuer une forme géométrique spécifique (longue, large ou épaisse) à la billette produite lors de la coulée. Le laminage à chaud intervient notamment dans la production des produits longes, le cycle de fabrication des produits longs (raidisseurs, fils, bobines, plaques, etc.) est divisé en quatre étapes principales allant du chauffage au refroidissement. De l'ébauche à la finition.

Les fours de réchauffage sont utilisés pour exposer les métaux à des niveaux de température qui les rendent flexibles. Le dégrossisseur permet à partir de la billette de former le porteur calibré souhaité à la fois en diamètre et en diamètre. Un finisseur est un train roulant qui peut traiter simultanément des matériaux sur plusieurs supports en cascade. Pendant le processus de refroidissement. Les différentes parties de laminoir sont : [12]

1. Parc à billettes.
2. Chauffage.
3. Train de laminage.
4. Finissage.

II.5.5.a. Parc à billettes [4]

Les billettes sont stockées dans des parcs extérieurs et intérieurs entre l'aciérie électrique et le laminoir à l'entrée du four de réchauffage. Les billettes sont chargées dans le four depuis un parc intérieur à l'aide d'un pont roulant de 20 t et d'une table de chargement devant l'entrée du four. Le stick parc a deux modes de fonctionnement.



Figure II.10: Parc à billettes. [4]

II.5.5.a.1. Chargement à chaud

Les billettes sont convoyées en continu par élévateur depuis une zone de chargement chaude jusqu'au four. Il reprend le matériau de la table à rouleaux chauffée. Un dispositif de chargement de matériaux installé à la sortie de l'élévateur charge les matériaux sur la table à rouleaux à l'entrée du four.

II.5.5.a.2. Chargement à froid

De cette manière, la billette froide est chargée à partir de la zone de chargement froide, un pont roulant décharge la billette sur la traverse de chargement à froid. La traverse de chargement à froid se déplace pas à pas vers la table à rouleaux pour chaque cycle de déchargement. Le dispositif servant à déposer le matériau, qui se trouve à la sortie du longeron mobile pose le matériau sur la table à rouleaux à l'entrée du four. La sélection entre la charge chaude et froide se fait via un système de surveillance.

II.5.5.b. Chauffage

Ce processus est utilisé pour augmenter l'élasticité des métaux. Cela minimise l'effort de laminage et réduit mieux la section de la billette pour obtenir le diamètre requis. Le chauffage de l'acier au carbone et de l'acier micro-allié a trois objectifs principaux :

La première méthode mécanique consiste à porter le métal à une température suffisante pour réduire les efforts de formage et augmenter la ductilité de l'acier afin qu'il puisse subir des déformations importantes et un laminage complet dans ce domaine austénitique.

Le deuxième but, qui est la conséquence la plus favorable du premier, est d'être dans le régime austénitique. Cela éteint partiellement la structure très grossière résultant de la solidification et réduit les gradients de composition dus aux phénomènes de ségrégation.

Enfin, le but essentiel de cette étape de réchauffage est de redissoudre les éventuels précipités apparus lors de la solidification. En effet, d'une part, les précipités sont trop gros et pas assez nombreux pour contribuer au durcissement de l'acier à température ambiante et parce que les éléments d'addition jouent un rôle très important dans l'évolution structurale lors du laminage et de la transformation allotropique. [11]

Le four de réchauffage est un four à bogie surchauffé avec des brûleurs latéraux et des brûleurs avant. Les billettes sont disposées en rangées de 12 m dans le four. Il y a La capacité nominale du four pour le chargement à froid est de 140 t/h. Une fois que la billette a atteint la température de laminage idéale, elle est déchargée et transférée vers la ligne de laminage.



Figure II.11: Four de réchauffage. [4]

Données techniques de four :

- Type de four : four à longerons mobiles.
- Longueur intérieure rouleau à rouleau : 21950 mm
- Largeur intérieure paroi à paroi : 13300 mm.
- Chargement des billettes : latéral, par convoyeur à rouleaux.
- Déchargement des billettes : latéral, par convoyeur à rouleaux et défourneuse.
- Type de combustible : gaz naturel.
- Type de récupérateur de gaz : faisceau de tubes, à convection.
- La capacité nominale du four pour un chargement à froid est de : 140t/h.c.

Le four se compose de 3 zones :

- Zone de préchauffage : $T=850\text{ °C}$ jusqu'à $T=950\text{ °C}$.
- Zone de chauffage : $T=950\text{ °C}$ jusqu'à $T=1050\text{ °C}$.
- Zone de maintien : $T=1050\text{ °C}$ jusqu'à $T=1250\text{ °C}$.

Le mouvement des billettes à l'intérieur du four est réalisé à l'aide d'une poutre mobil actionnée par un vérin de levage et un vérin de translation. Le chargement et le déchargement se font automatiquement à l'aide d'une tige défourneuse.

La billette est poussée sur un convoyeur à rouleaux de 20 m de long avant d'atteindre la première cage. Ce convoyeur à rouleaux est équipé d'un éjecteur de billettes.

II.5.5.c. Train de laminage

a. Décalamineuse

En vidant la pièce, le décalamineuse élimine le calcaire collé aux surfaces des billettes lorsqu'il est chauffé à l'intérieur du four avec une pression d'eau de 240 bars. Un dispositif d'aspiration situé après la trempe pour réduire la vitesse de la pièce.

b. Zone de dégrossisseur

- **Train dégrossisseur (Cage 1 jusqu'à cages 8) :** La première étape de laminage comprend 4 cages horizontales et 4 cages verticales, les cages horizontales réduisent la hauteur de la billette et les autres cages réduisent la largeur de la billette. Une cisaille d'urgence est installée à l'entrée d'une route accidentée pour effectuer le cisaillement d'urgence des billettes .



Figure II.12: Cage1 du dégrossisseur. [4]

- **Cisailles volantes** : Se trouvent derrière la zone rugueuse et coupent la tête et la queue de chaque billette pour alimenter avec précision le métal dans la cage 9.
- **Le train intermédiaire (Cage 9 jusqu'à cage 10)** : Nous suivons toujours les mêmes principes. C'est-à-dire contrôler le diamètre en réduisant la section transversale de la billette. La plage de température est de 1050°C à 950°C et la vitesse est de 1050°C à 950°C. 1m/s à 10m/s.
- **Le train finisseur (Cage 11 jusqu'à cage 16)** : La plage de température est de 950°C~850°C et la vitesse est de 10m/s~120m/s. Cette partie de toutes les deux cages (horizontale et verticale) contient entraîneur de boucle. Ceci afin d'éviter de couper le métal car la cage secondaire est soumise à une tension métallique à un rythme plus rapide que la cage primaire.

II.5.5.d. Zone de finissage

Est après le déplacement de la cage. Cela comprend le refroidissement, le groupage et le transport des produits vers les zones de stockage.

- **Le thermex** : Le processus Thermex implique un refroidissement contrôlé rapide des barres après le laminage à chaud, suivi d'un processus de revenu pour améliorer les propriétés mécaniques de l'acier.

Les lignes de refroidissement rapide et le trempé des barres d'acier sont généralement installées entre la cage finale et le lit de refroidissement du laminoir.

Il a pour but de refroidir et de tremper rapidement les barres chaudes sortant du

laminoir, de façon à éviter des traitements couteux hors ligne.

L'eau de refroidissement provient de la pompe. Le refroidissement se fait en fonction du diamètre du profilé et de ses propriétés mécaniques souhaitées. Bien que cela dépende des conditions de laminage, la limite d'élasticité est de plus 500 MPa.

- Température de réchauffage : $T_{\gamma} = 1\ 150^{\circ}\text{C}$.
- Température de fin de laminage : $T_{fl} = 820^{\circ}\text{C}$.

Le thermex compose de 2 chambres pour le refroidissement de rond à béton avec une pression d'eau variée de 6bar jusqu'à 12 bars en fonction de diamètre de rond à béton, La température à l'entrée de thermex est environ de 820°C et à la sortie est 550°C .

Le but de thermex est d'assurer les propriétés mécaniques du produit final et d'obtenir un métal avec une surface dure et un cœur ductile.

- **Traineur de thermex** : Un remorqueur est positionné entre le thermex et la cisaille de 96 m pour maintenir la vitesse de la barre constante pendant le laminage. Sa vitesse dépasse 5% de la vitesse de la barre.
- **Traineur cisaille à froid de 96 m** : Le traineur tire le métal vers la cisaille de 96m.
- **Cisaille à froid de 96 m** : Grâce à un fonctionnement programmé, les ciseaux sont alimentés par des cellules photoélectriques qui détectent la longueur du métal, ce qui leur donne une longueur de 96 mètres, cette dernière donne l'ordre à la cisaille pour assurer la coupe, qui sont acheminés par une voie à rouleaux sur les tiroirs, qui les éjectent sur le refroidissement à l'air libre (cooling bed).
- **Déviateur des barres** : Utilisé pour dévier les barres de rond à béton au système de refroidissement à l'air (cooling bed)
- **Système de refroidissement à l'air (cooling bed)** : La température de la barre d'armature à l'entrée de cooling bed est d'environ 450°C . Le but de cooling bed est de maintenir barre bien alignée et de ramollir le produit fini. Améliore les propriétés mécaniques (traitement thermique auto-revenu).



Figure II.13: Système de refroidissement à l'air (cooling bed).

Le traitement thermique passe par trois phases de refroidissement : [4]

1. **Phase de trempage :** La phase de refroidissement rapide (la trempe) se fait à l'intérieur de la boîte à eau où la barre chaude sera froide par l'eau qui s'écoule. Le processus trempe-revenu appelé QTB.
 2. **Phase de revenu (auto-revenu) :** La chaleur résiduelle (restante) de la barre qui passe du noyau (cœur) à la surface extérieure provoque un auto-revenu pour la martensite qui s'est formée à la surface pendant la phase de trempe.
 3. **Phase de refroidissement final :** La barre se refroidit dans le cooling bed, pour atteindre la température ambiante, pour continuer sa transformation d'austénite en F et P.
- **Cisaille à froid de 12 m :** Elle sert à couper les barres en longueurs commerciales en générale 12 m.
 - **Ligatièreuse en fardeaux :** Le produit fini obtenu sous forme de barres ligaturé sous forme de fardeaux.



Figure II. 14: Ligatureuse en fardeaux.

- **Étiquetage :** Une étiquette métallique est attachée manuellement avec un fil à l'extrémité de chaque paquet. L'étiquette de poids fournit les informations suivantes :
 - N° de coulée.
 - N° de fardeau.
 - Date.
 - Diamètre du produit.
 - Grade.
 - Longueur des barres.
- **Zone de stockage :** Chaque colis est pesé et transporté vers le lieu de stockage approprié. Le poids moyen d'un colis expédié est de 3 à 3,5 tonnes (avec un poids maximum de 5 tonnes). Pour la vente directe.

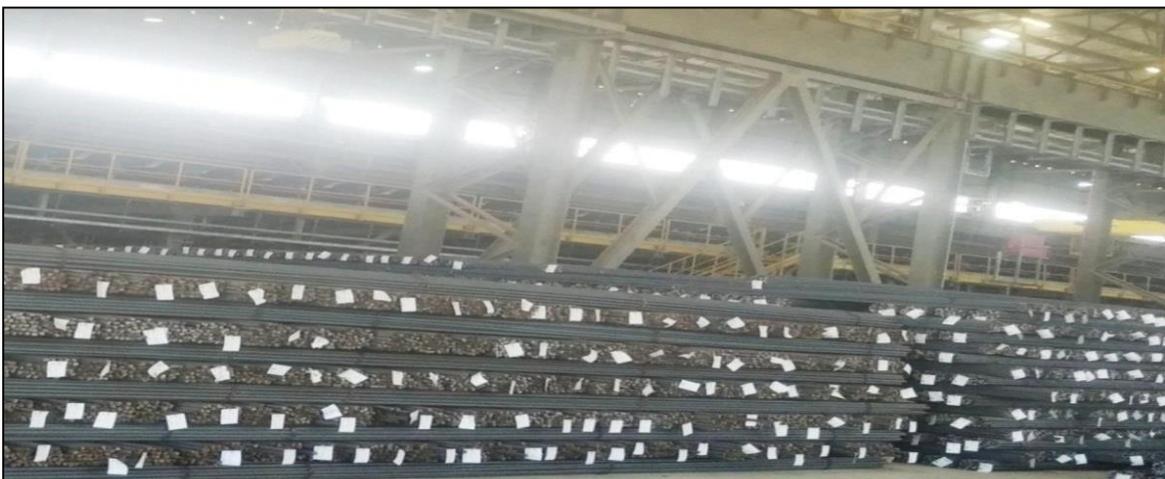


Figure II.15: Zone de stockage.

II.5.6. Formation de la structure après le traitement thermomécanique (TMCP)

Un procédé complexe qui associe généralement deux techniques :

- Déformation à chaud (le laminage) ;
- Refroidissement après le laminage (traitement thermique).

Par conséquent, la microstructure des barres d'armature et de fil à machine et les propriétés mécaniques (physiques et rhéologiques) finales des produits laminés dans notre étude dépendent de ces deux processus. [13]

a. Formation de la structure après la déformation à chaud

Une caractéristique du processus de déformation à chaud est que la déformation est rapide et se produit à des températures élevées, proches de $0,6 T_f$, (T_f – Température de fusion Kelvin).

Les propriétés mécaniques de résistance et de plasticité (fluage) dépendent fondamentalement de la température et de la vitesse de déformation. Les grandes déformations à haute température ne sont pas associées à l'écrouissage.

Les phénomènes physiques associés sont essentiellement la récupération dynamique et la recristallisation. Lors de la déformation à chaud, la restauration dynamique, processus de réarrangement et d'annihilation des défauts cristallins par diffusion locale, limite l'accumulation de fortes densités de dislocations et donc l'écrouissage. Études structurales à hautes températures (procédés dynamiques de récupération et de recristallisation).

L'acier peut subir une augmentation de sa dureté en raison de la transformation solide-solide $\gamma \rightarrow \alpha$ qui se produit lors du refroidissement. Cependant, il est possible d'estimer l'évolution structurale en utilisant des méthodes indirectes d'essais mécaniques.

En général, la structure finale après travail à chaud dépend des conditions de travail telles que la température, la vitesse, la contrainte de travail, le repos après travail et avant refroidissement, Ainsi la structure peut correspondre à :

- Etat d'écrouissage à chaud avec une distribution désordonnée des dislocations peut entraîner une augmentation de la résistance mécanique et une diminution de la fragilité.
- Premiers stades de la formation de l'armature lors de la réparation dynamique, augmentant la résistance mécanique, l'élasticité, les propriétés plastiques et la résistance à la rupture fragile. En termes de propriétés finales, cette microstructure est idéale pour

les aciers à forte tendance au durcissement, où la recristallisation dynamique lors de la phase de déformation statique provoque un adoucissement important

- Une phase formée au cours de la phase de déformation statique. Dans ce cas, la sous-structure formée est bien développée et stable, donc un ensemble de propriétés mécaniques plus élevé.

Ainsi, la sélection des conditions de déformation appropriées lors de l'étape de déformation à chaud du traitement thermomécanique détermine la formation et le réarrangement des dislocations lors des processus de récupération, de polygonisation et de recristallisation, et donc l'ensemble des propriétés finales.

Il est à noter que même après recristallisation dynamique, la structure obtenue ne provoque pas un ramollissement complet de l'acier par rapport à la recristallisation statique. En effet, la diffusion à haute température laisse les dislocations intactes et la déformation crée de nouvelles dislocations.

En conclusion, pour les aciers bas carbonés utilisés pour l'armature du béton, le refroidissement après formage à chaud doit être le plus rapide possible pour obtenir les propriétés mécaniques les plus favorables figure II.16. [13]

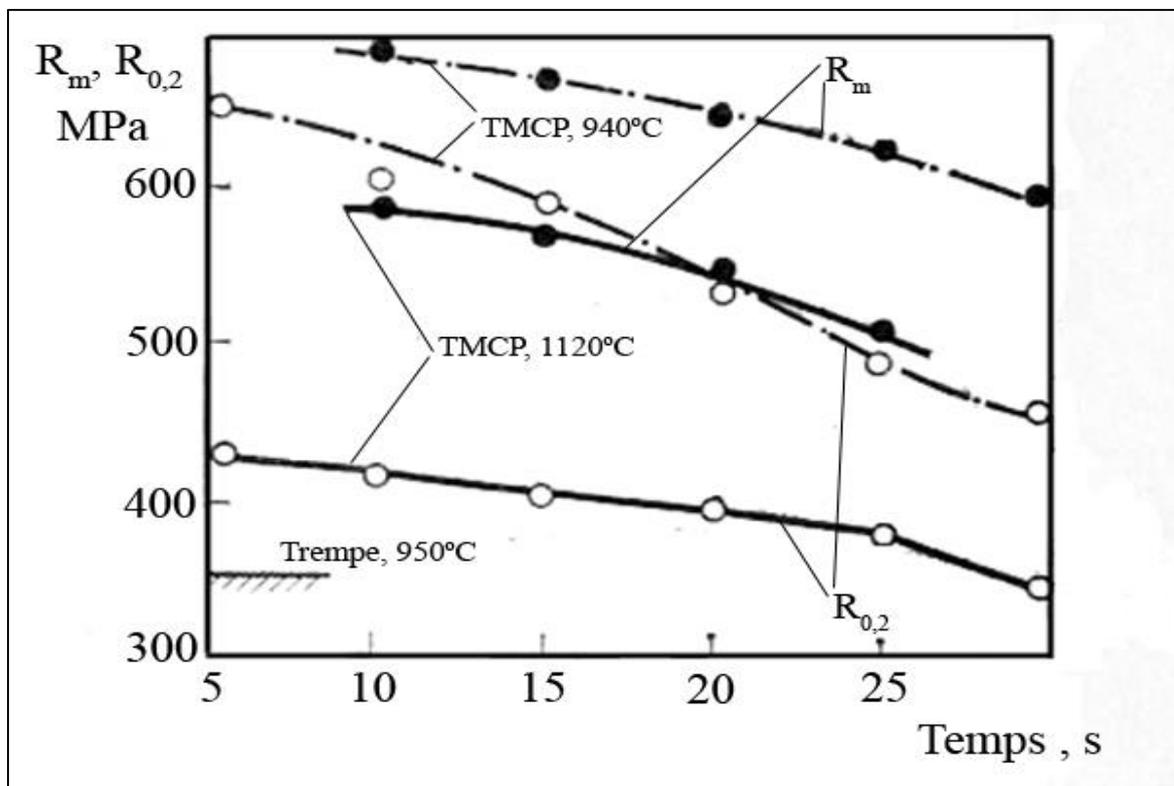


Figure II.16: Caractéristiques mécaniques de l'acier après les traitements thermomécaniques et la trempe en fonction de la pause entre déformation à chaud et refroidissement.[13]

b. Formation de la structure après le refroidissement

Les programmes de laminage des trains modernes incluent des vitesses de laminage élevées allant jusqu'à 100 m/s, par exemple pour des renforts de 6 mm de diamètre. La combinaison de pauses minimales et de vitesses de formage élevées entre le formage à chaud et le refroidissement crée de grands gradients de température à travers la section transversale du renfort.

Différentes conditions thermiques lors du refroidissement de la surface et du noyau de la barre d'armature déterminent la formation de différentes microstructures. Comme déjà montré, la température de surface chute rapidement à 150-100 °C et reste constante pendant un certain temps. Dans ce cas, la répartition transversale de la température du cylindre est parabolique, avec un maximum au centre. Après un refroidissement intensif, moins de chaleur est évacuée de la surface et, en 3 à 4 secondes, la température de la section transversale de l'armature est uniforme. Étant donné que la section de refroidissement se compose de plusieurs tubes d'eau, le processus de création d'un gradient de température et d'égalisation de la température est répété plusieurs fois. [13]

Chapitre III : Les traitements thermiques des aciers

Introduction

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage, de maintien suivi d'un refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier de composition déterminée. D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage, mais apporte les modifications suivantes :

- Constitution (état de carbone et forme allotropique du fer).
- Structure (grosseur du grain et répartition des constituants).
- Propriétés mécaniques.

Dans le 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 , en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

Les traitements thermiques effectués lors la fabrication de l'acier E500, tempcore consiste :

- Le chauffage des billettes jusqu'à la température d'austénitisation avant la déformation.
- Un refroidissement accéléré sous flux d'eau (trempe superficielle) après la déformation à chaud suivie d'un auto-revenu (procédé tempcore).

III.1. Diagramme fer-carbone

Le diagramme fer-carbone, également connu sous le nom de diagramme de phase fer-carbone, est un diagramme qui représente les différentes phases et transformations qui se produisent dans les alliages fer-carbone en fonction de la composition en carbone et de la température. Le diagramme fer-carbone est principalement utilisé pour comprendre les transformations de phase et les propriétés des aciers et des fontes. Il présente les pourcentages de carbone sur l'axe horizontal et la température sur l'axe vertical.

Les principales phases qui apparaissent dans le diagramme fer-carbone sont :

Ferrite alpha (α) : Il s'agit de la phase fer pur, qui est douce et ductile. Elle se forme à des températures basses et avec une faible teneur en carbone.

Perlite : La perlite est un mélange de ferrite alpha et de cémentite. Elle se forme à des températures et des teneurs en carbone intermédiaires. La perlite offre une combinaison de dureté et de ductilité.

Cémentite : La cémentite est une phase riche en carbone (Fe_3C) qui est dure et cassante. Elle se forme à des teneurs en carbone élevées.

Austénite gamma (γ) : L'austénite est une phase à haute température qui se forme avec une teneur en carbone élevée. Elle est non magnétique et présente une structure cubique à faces centrées.

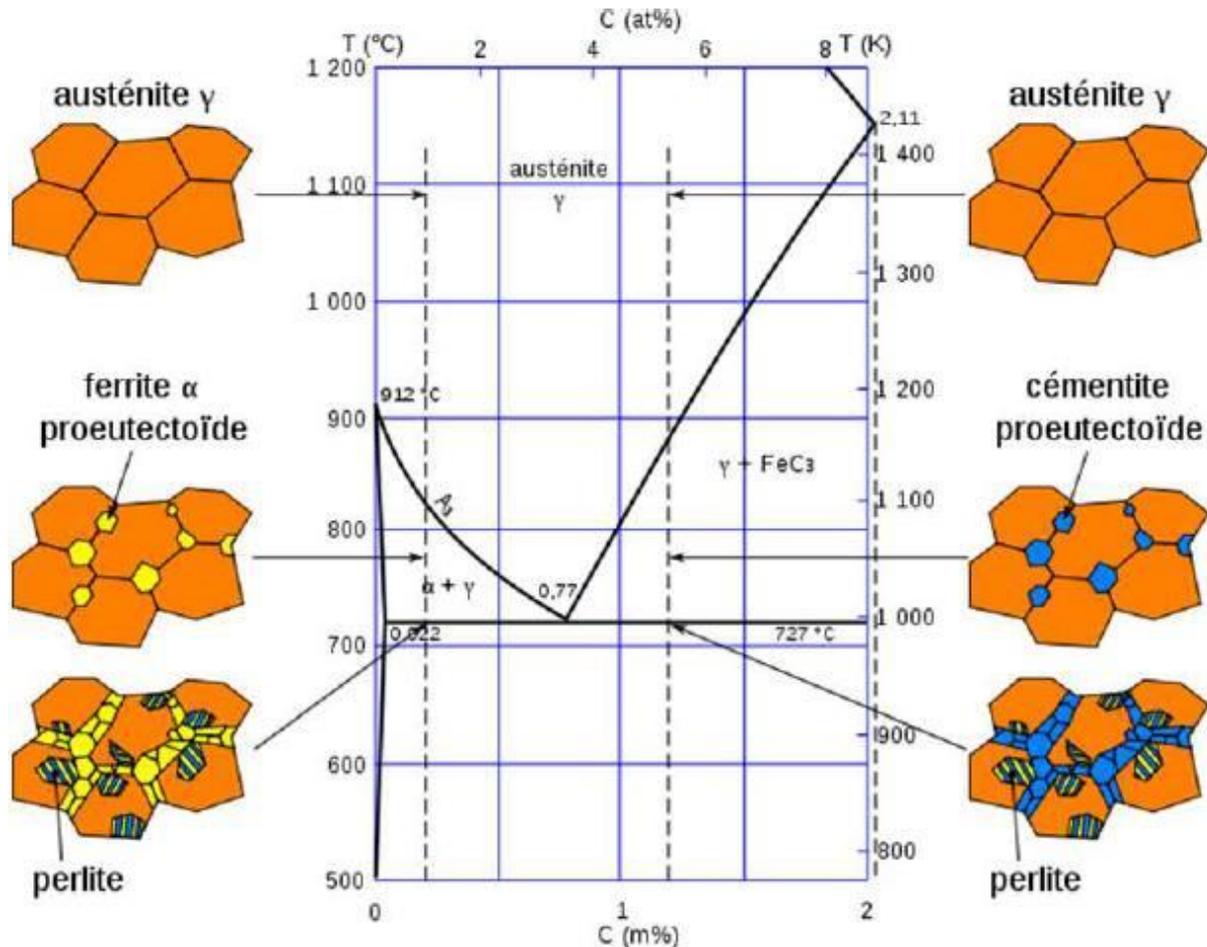


Figure III.1: Diagramme fer-carbone

III.1.1. Ferrite α

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPA), mais très ductile ($A \approx 35\%$).
 Ferrite δ . Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centrée CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

III.1.2. L'austénite γ

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%$ C à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

III.1.3. La cémentite (Carbone de fer Fe₃C)

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

III.1.4. La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure ($HB \approx 200$), résistante ($R_m \approx 850$ MPa) et assez ductile ($A\% \approx 10$).

III.2. Structure d'acier

Lors du refroidissement d'un lingot, l'acier se solidifie à l'état austénitique. Au cours du refroidissement, à 727 °C, l'austénite se décompose, soit en ferrite + perlite, soit en perlite + cémentite. La vitesse de refroidissement ainsi que les éléments d'alliage ont une importance capitale sur la structure obtenue, et donc sur les propriétés de l'acier.

En effet :

- Les joints de grain bloquent les dislocations, donc augmentent la dureté et la limite élastique ; or, plus les grains sont petits, plus il y a de joints de grain ;
- La cémentite est un carbure, une céramique très dure ; sa présence augmente la dureté et la limite élastique, mais diminue la ductilité.

De manière générale : Un refroidissement rapide donne de petits grains, alors qu'un refroidissement lent donne de gros grains ; la réorganisation des atomes pour passer de la structure austénitique (cubique à faces centrées) à la structure ferritique (cubique centrée) se fait par des mouvements d'atomes de faible ampleur (quelques distances interatomiques) ;

La ferrite pouvant contenir moins de carbone dissous (voir Solution solide et Site interstitiel), le carbone doit migrer sur de plus grandes distances pour former de la cémentite la distance à parcourir est moins grande dans le cas de la perlite (eutectoïde), puisque la cémentite s'intercale entre des « tranches » de ferrite ; la germination des nouveaux cristaux se fait de manière préférentielle aux défauts, et notamment aux joints de grain de l'austénite ; ainsi, la structure de solidification de l'austénite joue un rôle important (voir Solidification).

Certains éléments chimiques peuvent « piéger » le carbone pour former des carbures (par exemple le titane ou l'aluminium). Ils empêchent ainsi la formation de cémentite. On peut modifier la structure de l'acier par des traitements thermomécaniques :

Déformations : écrasement du lingot, laminage à froid ou à chaud, forgeage, etc. ; traitements thermiques, qui permettent de « rejouer » le refroidissement : o trempe, éventuellement suivie d'un revenu : la rapidité de la transformation ne permet pas au carbone de diffuser et le « piège » dans la maille cubique centrée, qui se déforme pour donner de la martensite les cristaux forment de petites aiguilles :

- Une trempe plus lente, ou bien une trempe étagée, permet la formation de bainite,
- Recuit, permettant la diffusion des éléments, la réorganisation des atomes et l'élimination des dislocations.

III.3. Traitement d'austénitisation

L'austénitisation est la formation d'austénite en chauffant un alliage à base de fer au-dessus de sa température limite supérieure jusqu'à la partie du diagramme d'équilibre correspondant à la phase austénitique.

L'austénitisation a pour but de dissoudre le carbone et, si nécessaire, les éléments d'alliage précipités sous forme de carbures. Pour ce faire, le carbone du fer doit être fondu, c'est-à-dire qu'il doit être chauffé pour convertir le fer α en fer γ . Compte tenu du diagramme d'équilibre, les carbures qui précipitent après solidification ou formage à chaud sont de la cémentite (pour les aciers non alliés), de la cémentite substituée (pour les aciers faiblement alliés), ou formée d'éléments de cémentation (pour les aciers alliés). [14]

Pour pouvoir austénitiser l'acier, la température lors du traitement thermique doit être supérieure à la température A_3 . Généralement, la température A_3 (25-50 °C) est choisie. La température d'austénitisation est donc étroitement liée à la teneur en carbone de l'alliage traité.

III.4. Le maintien en température

Maintien en température d'austénitisation le temps pendant lequel la température de l'ensemble de la pièce est maintenue constante et égale à la température d'austénitisation, considérant que le chauffage ne s'arrête que lorsque la température est uniforme dans toute la pièce, le but de ce traitement est principalement d'améliorer l'austénitisation.

Ceci permet une dissolution complète des carbures et uniformise la répartition du carbone dissous. La durée de maintien devrait être encore plus longue. La température d'austénitisation est proche de A_{c3} et inversement.

Le problème est de soumettre la pièce à un maintien en température suffisamment long pour permettre une bonne homogénéisation de l'austénite et la dissolution du carbure. Ce processus ne doit pas être poursuivi trop longtemps pour éviter le grossissement du grain. On parle d'austénitisation complète lorsque tous les carbures sont dissous et que l'austénitisation se produit. Lorsqu'il reste une phase partiellement non dissoute.

Pour les aciers hypoeutectoïdes :

L'austénitisation entre $A_{c3} + 25$ °C et $A_{c3} + 50$ °C (souvent, lors du traitement des aciers non alliés trempés à l'huile, on relève ces températures de 25 °C environ pour augmenter

un peu la trempabilité en provoquant un léger grossissement des grains d'austénite) ; La durée du maintien très souvent définie en fonction de la taille de la pièce chauffée et dans le but de parvenir à une mise en température uniforme. Cette façon de faire découle du choix de température indiqué ci-dessus ($Ac_3 + 25\text{ °C}$ à 50 °C) ; la durée du maintien nécessaire (maintien qui ne débute que lorsque l'isothermie de la pièce est acquise, à la tolérance près admise dans la pratique pour l'écart de température entre peau et cœur) est alors très courte (quelques minutes suffisent, en général, pour les aciers hypoeutectoïdes non alliés et faiblement alliés) [14].

III.5. Mécanisme de la transformation lors de l'austénitisation

Lors du traitement thermique d'austénitisation, les microstructures de martensite, bainite et ferritopéarlite se transforment en phase austénitique. La croissance de l'austénite est contrôlée par diffusion. Du fait de la température élevée du processus d'austénitisation, cette diffusion est rapide et 30 minutes de traitement à température suffisamment élevée permettront initialement de refondre complètement la perlite. Dans la perlite, le mécanisme de nucléation de l'austénite dépend de la morphologie de la perlite présente à l'origine.

Dans le cas d'une perlite globulaire, la formation de l'austénite se fait par étapes successives au cours de la montée en température. La diffusion du carbone se faisant préférentiellement aux joints de grains, c'est sur ces derniers que la germination de la phase austénitique se produit. Le carbone nécessaire à cette étape provient de la dissolution des carbures.

La première apparition d'austénite peut aussi être localisée à l'interface entre les colonies de perlite. La croissance de l'austénite se poursuit ensuite sous formes de lattes. Du fait que l'on se trouve à haute température, il y a ensuite coalescence de ces lattes à l'arrière du front de croissance, jusqu'à ce que celle-ci soit bloquée par des globules de perlite encore présents.

La phase austénitique croît alors de façon isotrope à partir du joint de grains ou elle s'est formée, parallèlement à la dissolution des carbures.

Si la structure initiale de la perlite est lamellaire, le mécanisme de formation de la phase austénitique diffère de celui décrit précédemment. L'austénite va germer sur les interfaces ferrite/cémentite de la perlite. La germination est suivie d'une croissance rapide austénite immédiate. Au fur et à mesure que l'austénite augmente, la fraction de ferrite diminue et les lamelles cimentées deviennent de moins en moins épaisses, jusqu'à ce qu'elles se dissolvent complètement [15].

III.6. Rôle des éléments d'alliage

Les éléments d'alliage ont un rôle prépondérant dans le traitement d'austénitisation. La germination de l'austénite est instantanée dans le cas des aciers au carbone mais la présence de certains éléments d'alliage peut ralentir la croissance gouvernée essentiellement par la diffusion, du fait de leur faible diffusivité [Sht99], modifiant la position des points caractéristiques de début et de fin de la transformation Ac1 et Ac3.

En pratique, les éléments d'alliage vont influencer sur la transformation d'austénitisation, selon qu'ils sont alphagènes ou gammagènes et carburigènes ou non. Un élément est dit alphagène quand il stabilise la phase cubique centrée. Il va donc augmenter la température de formation de l'austénite. Au contraire, un élément sera qualifié de gammagène s'il stabilise la phase cubique à faces centrées. La température Ac3 est alors abaissée.

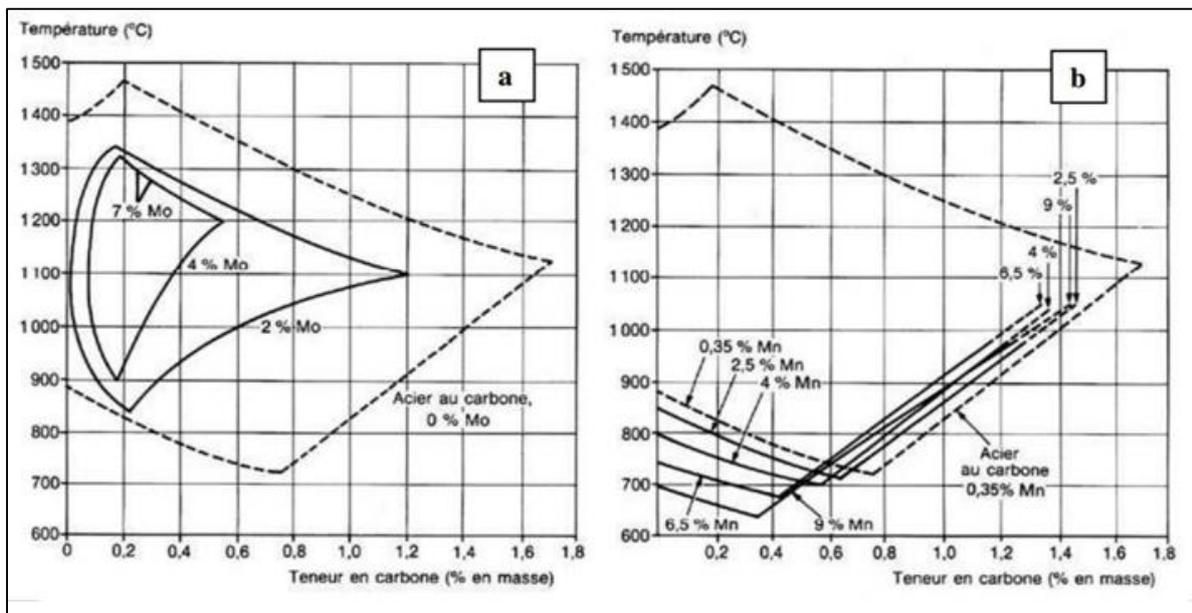


Figure III.2: Influence des éléments d'alliage sur le diagramme de phase FeC a- Présence d'un élément alphagène, le molybdène, b- Présence d'un élément gammagène, le manganèse.

[15]

Un autre aspect est à prendre en compte pour comprendre l'effet de ces éléments. En effet, certains éléments, dits carburigènes, ont une affinité plus grande pour le carbone que celle du fer. Même présents en faible quantité, ils peuvent se substituer partiellement aux atomes de fer de la cémentite, formant ainsi des carbures notés de manière générale M₃C. Lorsque la teneur en ces éléments est suffisante, la formation de différents carbures autres que la cémentite, peut être observée [Hit08]. Notons ici quelques exemples pour l'ajout de chrome ou de vanadium : (Cr,Fe)₂₃C₆, (Fe,Cr)₃C, (Cr,Fe)₇C₃ ou (Fe,V)₃C et (V,Fe)₄C₃.

Parmi les éléments carburigènes on trouve Cr, V, Mo, Ti, W, Nb et Mn. Des éléments comme le silicium ou le nickel, n'étant pas carburigènes, se retrouvent en solution solide dans la ferrite. [15]

III.7. Rôle de la taille de grains

Plus la température de la fin de laminage est basse (quand on passe du domaine austénitique (γ) vers le domaine biphasé austénito-ferritique ($\gamma + \alpha$)), plus l'affinement du grain est considérable permettant l'amélioration simultanée des propriétés de résistance (limite d'élasticité) Généralement, la taille du grain ferritique est le paramètre essentiel qui joue sur les propriétés des aciers à structure ferrite-perlite. Suivant les propriétés désirées, on cherche à fabriquer des aciers à grain le plus fin possible ou à grain contrôlé de taille moyenne. Le contrôle de la taille de grain est donc un objectif essentiel lors de la fabrication, il met en œuvre plusieurs mécanismes Le premier facteur résulte de la transformation $\gamma \rightarrow \alpha$: les grains α se forment à l'intérieur des grains γ , généralement à partir des joints, ce qui entraîne de facto que les grains α sont plus petits que les grains γ . Ce phénomène intervient chaque fois que le métal est réchauffé dans le domaine austénitique puis refroidi ; si le chauffage s'effectue à haute température, plus de 1 200°C, on a en général des gros grains γ , d'où un grain α grossier le grain γ est moins gros, d'où un grain α plus fin que le précédent, toutes choses égales par ailleurs : c'est le principe de la normalisation qui affine un grain très grossier par le seul effet de la transformation

Un autre moyen d'affiner le grain γ est l'écroutissage suivi d'une recristallisation, ce qui se produit au cours de la déformation à chaud soit en dynamique, soit le plus souvent en statique, c'est-à-dire entre les passes de laminage. Le laminage permet donc de faire plusieurs recristallisations successives à des températures décroissantes, donc à taille de grain décroissante. À taille de grain γ donnée, le nombre de grains α formés est lié à la température et à la durée de la transformation : plus le refroidissement est rapide, plus les grains α sont petits. [15]

De plus, si les grains d'austénite sont écroutis, c'est-à-dire allongés, il y a naissance de grains α en plus grand nombre, d'où un affinement supplémentaire.

III.8. La trempe de l'acier

En gros, la trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer $\gamma \rightarrow \alpha$ (austénitisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale. Ce mode de

durcissement, commun à de nombreux métaux, est réalisé selon le schéma général, à travers trois opérations successives : austénitisation, trempe et revenu.

La première étape consiste donc d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés au-dessus de son point de transformation (entre 30 °C et 50 °C). Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques en austénite et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite. [16]

S'ensuit la trempe qui consiste en un traitement visant à refroidir rapidement le métal à partir de sa température d'austénitisation (généralement entre 815 °C à 870 °C afin d'obtenir une constitution martensitique. C'est cette transformation qui permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du métal traité, notamment sa dureté. La possibilité, de faire subir à un acier un durcissement par trempe, est soumise à deux conditions indispensables :

- Une condition métallurgique : existence d'un domaine austénitique sur le diagramme d'équilibre de l'acier choisi de manière à pouvoir austénitiser cet acier en le portant à une température convenable ;
- Une condition thermique : possibilité de refroidir cet acier à une vitesse suffisante à partir de l'état austénitique de manière à provoquer la formation des constituants, hors d'équilibre, recherchés.

Le cycle thermique de la trempe sera caractéristique de la dureté finale recherchée. Ce degré de dureté envisagé fera recourir à différentes méthodes de refroidissement. La vitesse de refroidissement dépend principalement, pour une pièce déterminée :

- De la chaleur spécifique et la conductibilité thermique de l'acier ;
- De la masse, la forme et l'état de surface de la pièce ; plus la pièce sera massive plus le temps sera long ;
- Du pouvoir refroidissant du médium de trempe (air, eau, eau-sel, huile etc.).

Notons que la vitesse de refroidissement est maximale à la surface de la pièce et diminue vers le cœur.

III.9. Les différents produits de transformation au refroidissement [16]

Selon les conditions de refroidissement et la composition de l'alliage, différentes transformations de phases à l'état solide peuvent se produire

- Si la vitesse de refroidissement est faible (inférieure à 1°C/s), on se trouve dans un état proche de l'équilibre. La diffusion du carbone est alors possible. Le refroidissement de

la phase austénitique va conduire à la formation d'un mélange de fer α et de cémentite Fe₃C. La température de début de transformation ferritique est notée AC₃.

- Si la vitesse de refroidissement est rapide (supérieure à 80°C/s), le carbone ne peut pas diffuser et se retrouve alors piégé dans la maille. La transformation se produit hors équilibre et conduit à la formation d'une phase métastable obtenue par trempe : la martensite. La température de début de transformation martensitique est notée Ms. La capacité d'un acier à former de la martensite dépend de sa trempabilité, i.e. son aptitude à éviter la formation du fer α et de Fe₃C lors du refroidissement. La trempabilité peut être augmentée à l'aide d'éléments d'alliage. Les plus efficaces sont, par ordre décroissant d'influence : C, Mo, Va, Cr, Mn, Ni, Si.
- Pour des vitesses de refroidissement intermédiaires, des structures bainitiques sont observées. Il s'agit d'agrégats formés de plaquettes de ferrite saturées en carbone et de cémentite, dont l'aspect diffère suivant leur température de début de transformation.

III.10. Le revenu

III.10.1. Introduction

Nous avons précisé que la phase martensitique est une phase fragile : un traitement thermique est nécessaire pour en améliorer la ductilité. Ce traitement, durant lequel la phase martensitique métastable retourne progressivement vers son état d'équilibre en rejetant le carbone en excès qu'elle contient, est appelé revenu. A basse température, une forte dispersion de précipités métastables, dont la formation est contrôlée par des considérations cinétiques, se forment en fonction de la quantité de carbone libérée dans la matrice. La précipitation de ces carbures et le retour vers une maille moins contrainte, jouent un rôle essentiel dans l'adoucissement de la structure. [15]

III.10.2. Généralités sur le revenu des aciers au carbone

Le revenu de la martensite se décompose en plusieurs étapes successives, ou pour certaines, simultanées. Ces transformations dépendent essentiellement de la température, de la durée de maintien à la température de revenu et de la composition de l'acier considéré. Les structures martensitiques brut de trempe sont composées principalement de martensite et d'austénite résiduelle. Dans certaines conditions s'y ajoutent des carbures non dissous au cours du traitement de mise en solution, de par le choix d'une température de traitement insuffisamment élevée. Dès 1931, des recherches effectuées par Portevin et al [Por31] sur le comportement au revenu des structures martensitiques, ont mis en évidence les transformations

essentielles qui se produisent au cours du revenu. L'étude au revenu a également fait l'objet de nombreuses publications [15].

Les quatre étapes qui se produisent au cours du revenu sont identifiées comme suit :

- **Étape 1** : appauvrissement en carbone de la phase martensitique et précipitation des premiers carbures, appelés carbures de transitions.
- **Étape 2** : transformation de l'austénite résiduelle instable en ferrite et en cémentite
- **Étape 3** : perte de la tétragonalité de la martensite et transformation progressive des carbures de transitions en cémentite
- **Étape 4** : apparition des carbures alliés pour les aciers enrichis en éléments d'alliages Carburigènes.

Cependant, il faut rajouter à ces quatre stades du revenu, une étape supplémentaire, que l'on qualifie plutôt de stade de vieillissement puisqu'elle peut se produire à température ambiante.

III.10.3. Les techniques de refroidissement après laminage

Dans la pratique de production de l'acier à haute résistance on utilise actuellement le refroidissement accéléré à l'eau (train à barres) ou bien le refroidissement combiné à l'eau et à l'air réunissant les processus de trempe interrompue avec auto-revenu (procédés Tempcore) et trempe étagée (trempe isothermique). Le refroidissement à l'air calme est peu répandu maintenant, car l'obtention des propriétés élevées de résistance de l'armature dans ce cas exige l'utilisation des aciers alliés avec des éléments d'addition assez chers (Cr, V, Nb). Il faut prendre en considération aussi que l'augmentation de carbone équivalent, dans ce cas, a un effet négatif sur la soudabilité de l'acier. De plus, si après le laminage, le fil de l'armature doit être mis en couronne, le refroidissement à l'air de l'acier en couronne provoque la formation d'une grande quantité de la calamine 3 à 4 % en poids, ce que diminue considérablement l'efficacité économique de la production de l'armature. [13]

III.10.3.a. Le procédé TEMPCORE

III.10.3.a.1. Introduction

Le Centre de Recherche Métallurgique (CRM.), à Liège, en Belgique, a développé en 1974 un processus connu sous le nom de TEMPCORE pour augmenter la limite élastique et la résistance ultime à la traction de l'acier faiblement allié (barre d'armature) sans altérer leur ductilité. Le processus consiste en une trempe la surface locale des tiges sortant du laminoir à chaud, suivie de l'auto-revenu de la martensite.

Le processus peut être divisé en trois étapes, le premier consiste en un refroidissement rapide pendant une courte période de la barre d'armature émergeant de la dernière favorisé la

transformation de l'austénite en martensite à la surface. La deuxième étape est le retrait sélectif de la martensite de la chaleur qui coule du centre de la barre, et le troisième consiste en la transformation de l'austénite restante en un mélange de perlite fine et de ferrite.

La variété des microstructures du centre à la surface améliore les propriétés mécaniques des barres. Les essais menés dans une mini-usine ont mis en évidence la faisabilité d'adapter un tel traitement, mais il est nécessaire de développer un modèle capable de prédire les propriétés mécaniques des barres d'armature en tant que fonction des différents paramètres opérationnels.[17]

III.10.3.a.2. Description de processus

Ce processus se compose de trois étapes, Tout d'abord, le produit laminé à chaud est trempé avec de l'eau. L'efficacité du système de refroidissement doit être suffisamment élevée pour atteindre une vitesse de refroidissement sur le dessus de la barre à la vitesse critique de formation de martensite

Dans la deuxième étape, les barres quittent la zone de refroidissement par eau et se dirigent vers l'air de refroidissement. La chaleur du noyau chaud se propage vers la surface et la couche de martensite s'auto-durcit. La trempe du procédé assure une bonne ductilité du matériau tout en maintenant une limite d'élasticité élevée.

La troisième étape se produit lorsque la barre est librement refroidie dans un refroidisseur et que l'austénite est convertie en ferrite et en perlite au cœur de la barre. Les composants de la morphologie structurale dépendent de la chimie de l'acier, du diamètre de la barre, du temps de refroidissement et de l'efficacité. [18]

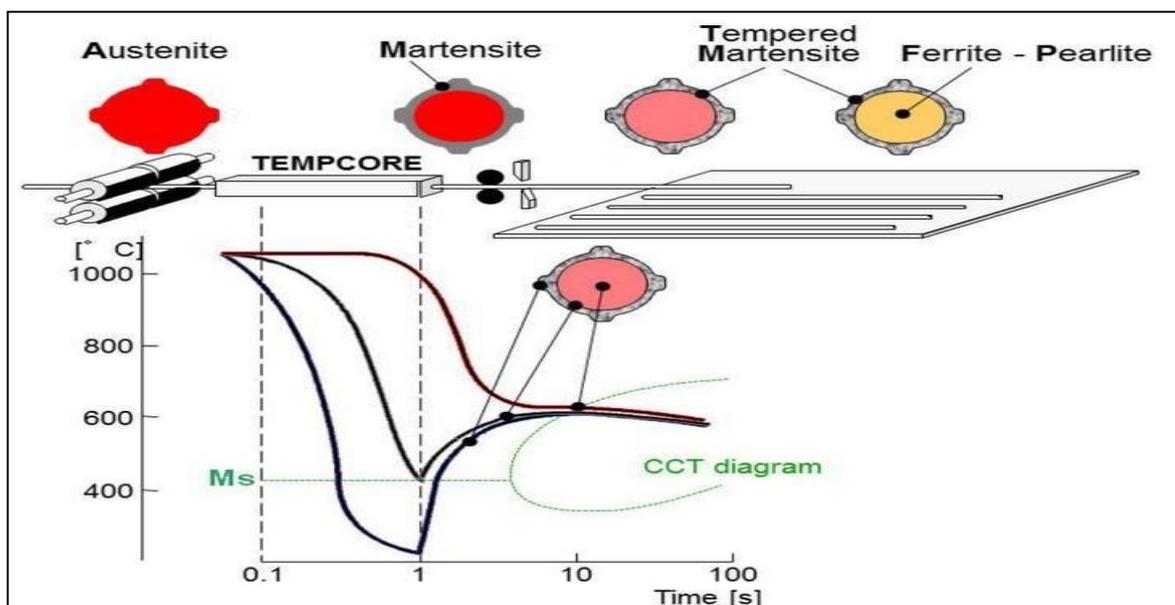


Figure III.3: Principe du processus Tempcore.[18]

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1. Introduction

Parmi les objectifs de cette étude, nous nous concentrons sur l'effet des traitements thermiques sur la structure et les propriétés d'un acier spécifique, en l'occurrence l'acier Tempcore 500 de l'entreprise Algerian Qatari Steel. Nous examinerons les différentes méthodes de traitement thermique utilisées ainsi que les techniques utilisées pour obtenir des images des microstructures et les résultats des propriétés mécaniques, notamment la dureté et les essais de traction. Notre étude comprendra également une analyse chimique approfondie, un examen métallographique détaillé et une caractérisation complète de l'acier Tempcore 500

Afin de réaliser tous ces objectifs, nous avons utilisé acier du rond à béton avant et après le traitement, utilisé couramment pour la fabrication des outils travaillant à chaud.

L'ordonnancement des essais doit être comme suit : nous commencerons par l'analyse chimique suivie d'un examen métallographie, ensuite nous mesurons la dureté de notre matériau puis faisons un essai de traction et finalisons le travail avec un essai de pliage.

IV.2. Les méthodes des traitements utilisés dans le complexe

La structure de notre produit est obtenue en trempant la surface des barres d'acier à la fin du processus de laminage à chaud, suivi d'un revenu.

La trempe est obtenue en exposant le rond à béton, qui à la fin du processus de laminage est à très haute température, à une pulvérisation d'eau froide, ce qui provoque un refroidissement très rapide de la surface de la barre entraînant une transformation martensitique à la même température. L'acier martensitique trempé qui en résulte est très dur, mais il est également trop fragile pour être utilisé dans la plupart des applications, nécessitant un revenu pour être utilisé dans l'acier renforcé.

Le revenu est obtenu grâce à la chaleur résiduelle présente dans le noyau de la barre d'acier. Cette énergie chauffe la section précédemment trempée de l'acier à une température inférieure à la température critique, suivie d'un refroidissement progressif et lent par exposition à l'air jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante. A partir de ce second traitement thermique, on obtient un produit final constitué approximativement d'une surface de martensite trempée à haute résistance, d'un noyau de ferrite-perlite et d'une zone de transition en bainite

IV.3. Méthodes utilisées

IV.3.1. Analyse chimique

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau du laboratoire l'aciérie électrique SMS (Steel Melt Shop) de Qatari Steel en Algérie. Le but est de connaître la composition chimique du produit fabriqué. Nous avons suivi l'évolution des matériaux au niveau des aciéries électriques SMS : fours électriques à arc, fours poche et coulée continue. Nous avons utilisé un échantillon de produit fini de rond à béton (B500WR). L'analyse chimique a été effectuée à l'aide d'un spectromètre. La figure IV.1 expose le spectromètre de L'AQS.



Figure IV.1: Spectromètre de L'AQS.

Premièrement nous commençons par recevoir l'échantillon, puis le polir pour obtenir une surface lisse. Ensuite, étalonner le spectromètre par rapport à un échantillon certifié pour effectuer l'analyse chimique de l'échantillon que vous souhaitez analyser.

Les figures ci-dessous présentent respectivement les étapes à suivre dans l'analyse chimique :



Figure IV.2: Machine de polissage.



Figure IV.3: Échantillon.



Figure IV.4: Calibrage de spectromètre.



Figure IV.5: Opération de polissage.



Figure IV.6: Échantillon certifié.

IV.3.2. Étude métallographique

La métallographie est la technique de caractériser la microstructure des métaux par observation au microscope optique ou électronique à balayage. On peut déterminer le type de microstructure, la distribution de phase, la taille des grains, la forme des grains, les joints de grains, les fissures, les types d'inclusions, la présence ou l'absence de traitement thermique (transformation de phase) et la direction des lignes de glissement. Pour les échantillons déformés (voir article sur les déformations plastiques et dislocations) ou traitement de surface supplémentaire. Vous ne pouvez pas obtenir d'informations spécifiques simplement en observant un objet métallique. [20]

Pour l'étude de la microstructure de l'acier de AQS, des échantillons ont été préparés pour suivre la microstructure du produit après et avant le traitement, ça veut dire connaître sa microstructure en plusieurs étapes.

a) Méthode de préparation des échantillons

L'obtention d'informations sur la microstructure d'un matériau nécessite une préparation minutieuse de l'échantillon, qui comprend plusieurs étapes.

i. Découpage : L'échantillon est coupé avec une scie à ruban horizontale - ECHOENG-SN350SA pour la préparation de l'échantillon, en Lubrifiant autant que possible pour que l'échantillon ne présente aucun échauffement ou déformation susceptible de modifier sa microstructure

Les figures ci-dessous montrent les étapes de la coupe de la scie à ruban.



Figure IV.7: Scie à ruban horizontale.



Figure IV.8: Opération de découpage.

Cette machine est principalement conçue pour prélever des échantillons métallographiques sous forme de cylindres. Nous avons utilisé une autre machine appelée la tronçonneuse CM260 pour couper de petits échantillons. L'objectif est de protéger l'échantillon et de préserver les propriétés mécaniques de notre matériau.



Figure IV.9: Tronçonneuse CM260.

ii. Enrobage : Les échantillons sont enrobés de résine pour faciliter leur manipulation et assurer une bonne préparation. Le but de l'enrobage est de manipuler de petits échantillons de forme irrégulière même avec un revêtement mince pour protéger les matériaux et fournir une clarté des bords pour un polissage facile et une bonne visibilité microscopique.

L'enrobage nous donne des échantillons cohérents. Les résines utilisées dans notre laboratoire sont respectivement L'époxyde et le phénolique. Nous avons utilisé la presse de montage métallographique - ECHOLAB - MP140A pour l'opération d'enrobage.

Les figures exposent respectivement l'opération d'enrobage.



Figure IV.11: Ecopress d'enrobage.



Figure IV.12: Addition de la poudre.

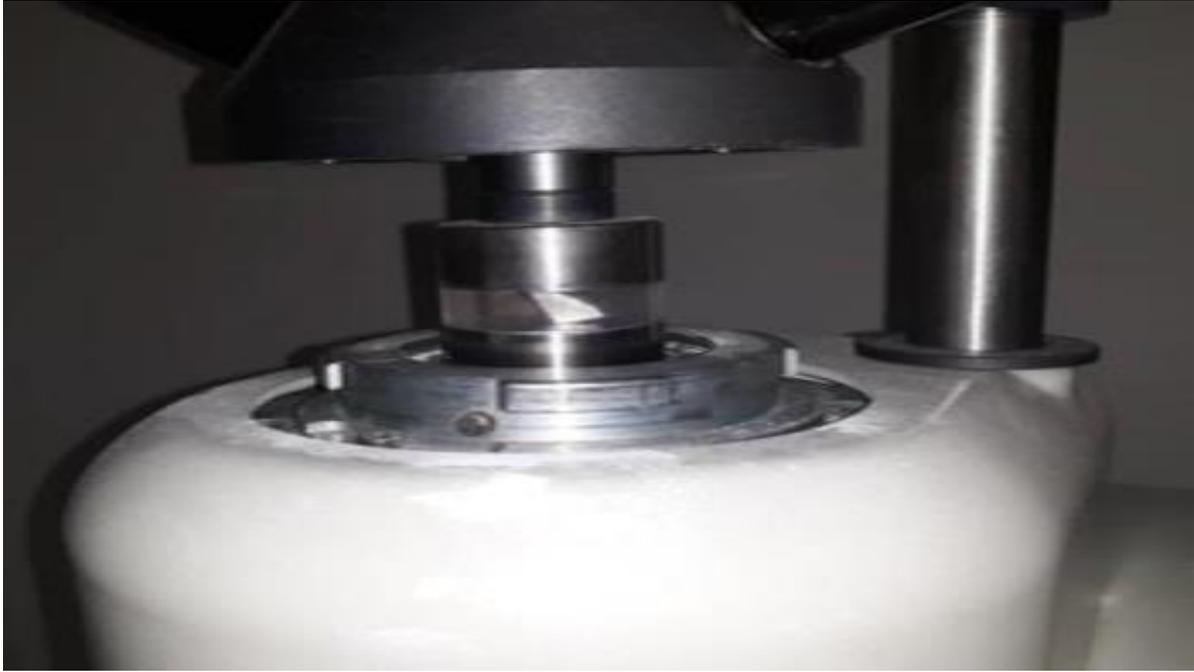


Figure IV.10: Échantillon enrobé.



Figure IV.11: Échantillon après l'enrobage.

La température et la pression de chauffe de la machine sont contrôlée automatiquement, elle est chauffée à 170°C pendant 3 minutes, puis refroidie pendant 5 minutes à 30°C. Les arbres de transmission et les pièces mobiles doivent être lubrifiés pour éviter les blocages et les dommages. Après l'enrobage, la machine arrête le processus et abaisse automatiquement la pression. En tournant le bouton, l'échantillon est libéré de la machine et peut être retiré et utilisé.

iii. Polissage : Le polissage consiste à rendre la surface lisse et brillante afin qu'il n'y ait pas de rayures pouvant gêner l'examen ultérieur.

Le polissage se déroule généralement en deux étapes : le pré-polissage et le polissage final, qui s'effectue avec une polisseuse à disque équipée d'un dispositif de d'arrosage permanent

- **Pré polissage** : Cela se fait en frottant l'échantillon sur du papier de verre de plus en plus fin (180-2500) Le polissage se fait généralement sous l'eau pour éviter le risque de surchauffe de l'échantillon. Chaque papier abrasif a besoin de 5 minutes de temps.
- **Polissage de finition** : Les deux principales méthodes de finition sont souvent utilisées.
- **Polissage à l'alumine** : Ce type de polissage consiste à frotter l'échantillon sur des disques en feutre.
- **Polissage à la pâte diamantée** : Le polissage se fait comme avant le polissage Appliquer de la pâte diamantée sur le disque avec du diluant Après polissage et finition, certains composants sont visibles sans attaque chimique, tandis que d'autres existant à l'intérieur de la structure ne peuvent être distingués que par attaque chimique. Cela vise à mettre en évidence toute la structure, les joints de grains et peut également mettre en évidence l'orientation cristallographique.



Figure IV.15: Polisseuse ECHOLAB-PM62 T300.



Figure IV.16: Opération de polissage (AQS).

iv. Attaque chimique

Nous gravons généralement la surface pour révéler la structure, en particulier les joints de grains, les grains, les phases, les inclusions, etc. Les procédés acides ou électrochimiques sont souvent utilisés dans des conditions où la réaction est plus rapide ou plus forte aux joints de grains. L'anodisation (oxydation anodique) peut également être utilisée pour révéler la structure : si la couche d'oxyde croît différemment selon l'orientation du cristal, les différents

cristaux se distinguent facilement.[21]

Dans notre étude, nous avons effectué une attaque chimique de l'alcool et du nital, dont la composition est la suivante : Acide nitrique 4% (HNO_3), Alcool éthylique 96% ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$) Nous utilisons d'abord de l'alcool à 96 % pour nettoyer la surface, puis pénétrons la surface avec 4 % de réactif nital. La figure présente l'état d'échantillon après l'attaque chimique.



Figure IV.12: Échantillon après l'attaque chimique.

b) Analyse et observation

Après la préparation des échantillons, nous utilisons des microscopes métallurgiques inversé, IM 500/BD/DIC au niveau de l'AQS pour analyser la microstructure et connaître la nature de la microstructure et l'existence de chaque phase après et avant le traitement thermique. Les figures présentent respectivement les microscopes métallographiques.



Figure IV.13: Microscope métallographique inversé - echolab - im500bd (AQS).

IV.3.3. Essai de dureté

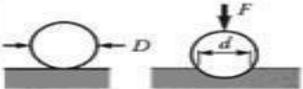
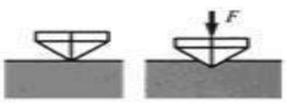
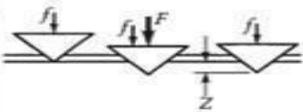
La dureté du matériau détermine la résistance du matériau à la déformation constante causée par la pénétration du matériau plus dur. Un test de dureté typique consiste à pousser (à travers) un objet d'une certaine taille contre une surface avec une certaine charge du matériau testé. La dureté est déterminée en mesurant la profondeur de pénétration de l'indentation ou en mesurant la taille de l'indentation qui la quitte.

Les tests de dureté qui mesurent la profondeur de pénétration comprennent : le test Rockwell, le test de pénétration de la bille instrumentée.

Les essais de dureté qui mesurent la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur sont: Vickers, Knoop, et Brinell.

Le tableau présente les différentes méthodes d'essai de dureté.[21]

Tableau IV.1: Différentes méthodes d'essai de dureté.

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d)	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

Dans la mesure de dureté, nous avons utilisé un échantillon en produit fini de l'acier Fer E500, un échantillon en produit dureté B (500) de produit sans traitement thermique.

Rockwell B d'une force de 100 kgf et HV sera donnée par le duromètre à partir de la HRB. Toutes ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un duromètre de l'entreprise AQS.

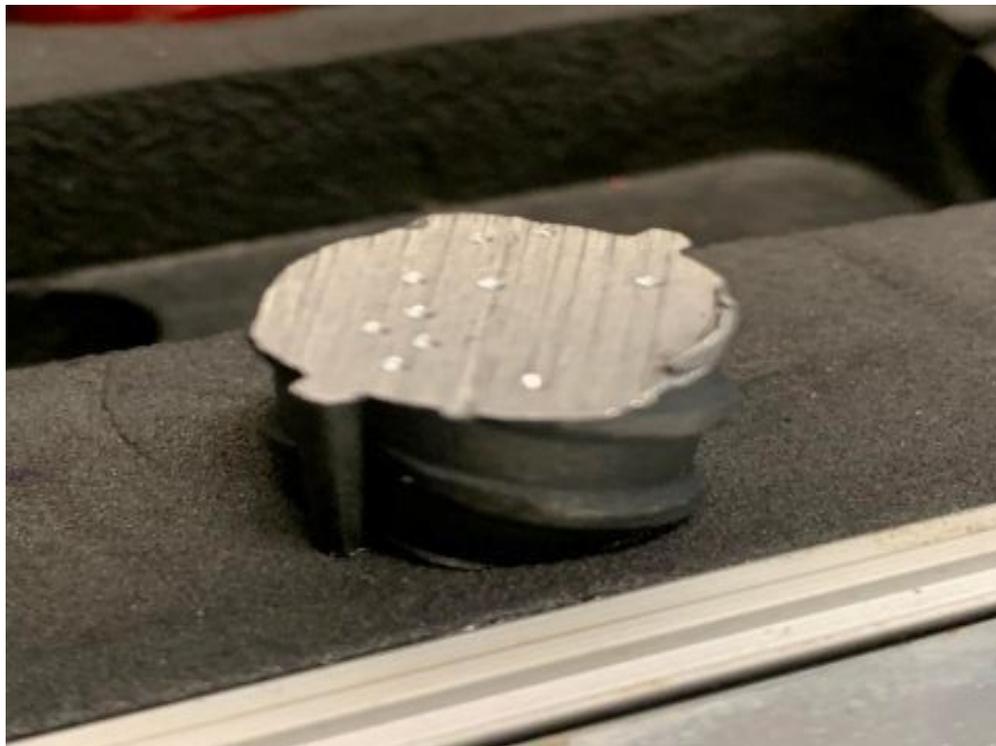


Figure IV.14: Mesure de la dureté du produit fini.



Figure IV. 15: Mesure de la dureté du produit sans traitement thermique.



Figure IV.16: Mesure de la dureté du rond à béton diamètre 16 mm



Figure IV.17: Duromètre (AQS).

IV.3.4. Essai de traction

L'essai de traction c'est L'essai le plus courant permettant de déterminer le comportement mécanique d'un matériau. La seule connaissance des paramètres de l'épreuve d'effort permet de prédire le comportement de la pièce sollicitée en mouvement, traction, compression, flexion, on applique une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture suivant un processus de mise en charge à vitesse de déformation constante. L'effort de traction (contrainte) est exprimé en Pascal ou Newton/m². L'allongement est exprimé en % de la longueur initiale de l'éprouvette. L'essai est effectué à la température ambiante.

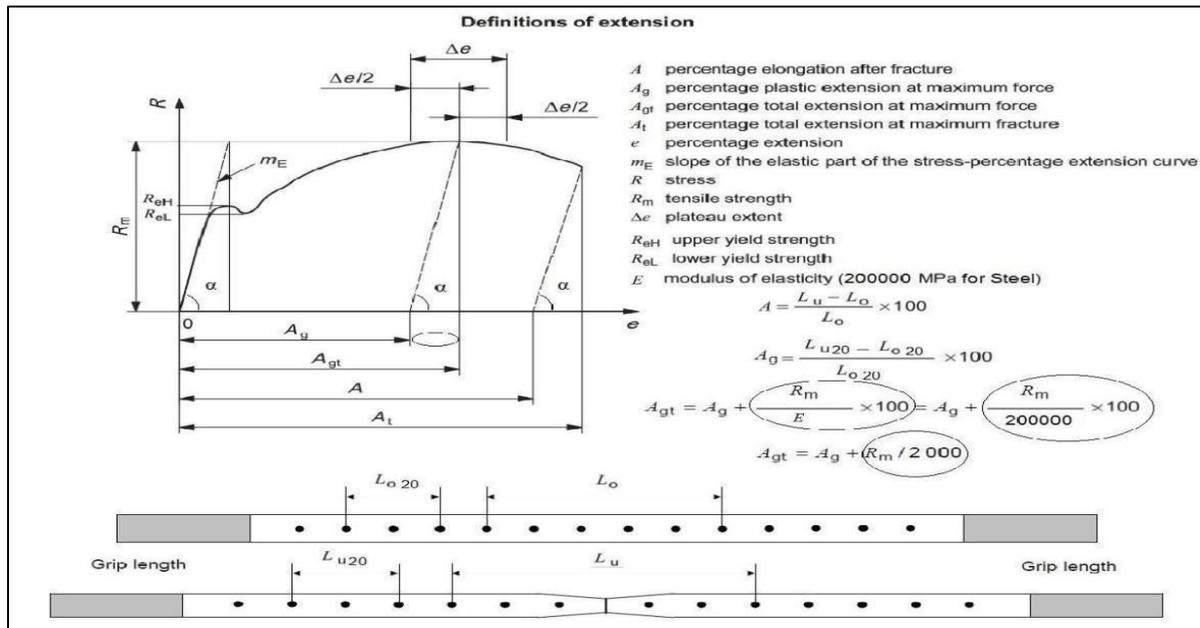


Figure IV.18: Fiche technique de l'essai de traction au niveau de l'entreprise.[4]

a) Préparations des éprouvettes

Les échantillons doivent être prélevés et préparés conformément aux exigences des normes internationales valables pour une variété de matériaux. (Exemple ISO 377).

i. Éprouvettes de l'entreprise AQS.

Les laboratoires de contrôle de la qualité ne peuvent pas effectuer d'essais de traction sur des échantillons usinés pour chaque moulage, alors dans ce cas-là l'essai de traction s'effectue avec une éprouvette non usinée (brut) de forme cylindrique (produit fini).

ii. Éprouvettes non usinées (éprouvette cylindrique brut (produit fini après laminage)).

Si l'éprouvette est constituée d'une partie non usinée du produit ou d'une éprouvette non usinée, la longueur libre entre les mâchoires doit être suffisante pour que les marquages soient correctement espacés des mâchoires.

Dans notre étude, nous avons réalisé des essais de traction sur deux échantillons : Échantillon de produit fini de barres d'armature en béton d'un diamètre de 16 mm, un échantillon de produit fini de fil machine de diamètre de 7 mm.

Les étapes sont les suivantes :

i. Machines de traction

Au niveau du laboratoire de contrôle qualité de la société AQS il y a deux machines de traction. Le mode opératoire de la machine est le suivant :

- Activer le disjoncteur de la machine ;
- Allumer l'ordinateur et attendez que le menu reprenne ;

- Choisir le programme d'essai ;
- Introduire l'information de l'échantillon « date, n° coulée, forme et diamètre d'éprouvette » sur logiciel ;
- Vérifiez que la vitesse de la charge d'essai est conforme à la norme de fonctionnement ;
- Mettre en marche l'unité hydraulique ;
- Mettre en place l'éprouvette ;
- Fermer les mordaches du haut ;
- Réinitialiser la force dans le menu de la machine, puis fermez la mâchoire inférieure pour éviter de glisser. Sélectionnez le programme que vous souhaitez utiliser et commencez à tester. ;
- Attendre la fin de l'essai pour enregistrer les grandeur physiques (R_e , R_m , etc.) ;
- Retirer l'éprouvette cassé ;
- Remettre la traverse dans sa position d'origine à l'aide du bouton inférieur de la télécommande.

ii. Machine de traction mécanique universelle

Une nouvelle génération de machines d'essais pour les essais de compression et de traction des matériaux. Il se compose principalement de bâtis de charge, de systèmes de mesure, de systèmes informatiques de traitement de données, de systèmes de préparation et d'impression de données et de systèmes de sécurité. Il utilise une nouvelle technologie intégration mécanique et électrique, etc.

Les figures montrent respectivement la barre d'armature de rond a béton avant le début de l'essai de traction, l'essai du fil machine et de la barre d'armature rond a béton et la machine de traction mécanique générale.



Figure IV.19: Échantillon avant découpage.



Figure IV.20: Machine de traction mécanique universelle.



Figure IV.21: Essai de traction du fil machine.

iii. Machine d'essai d'effort de traction

La machine d'essai se compose d'un cadre de chargement avec un cylindre d'huile en bas, d'un servo-contrôleur électrohydraulique de la source d'huile et d'une pompe à huile. Elle peut réaliser un contrôle fermé de la charge d'essai, de la déformation de l'échantillon et du volume de balayage.

Les paramètres traités par l'ordinateur sont : Limites d'élasticité inférieure et supérieure R_e & R_m , limite de charge max, force de rupture, contrainte, déformation, taux d'élongation Module élastique. Les figures présentent respectivement Machine d'essai d'effort de traction mécanique universelle, l'essai de traction et la mesure de l'allongement après la rupture.



Figure IV.22: Machine d'essai d'effort.



Figure IV.23: Essai de traction du rond à béton.

IV.3.5. Essai de pliage

L'essai de pliage consiste à plier une éprouvette solide et droite de section polygonale à la déformation plastique, l'éprouvette est pliée jusqu'à l'obtention d'un angle spécifique.

L'essai de pliage est géré par la norme (NF EN 910 :1996)

Une déformation plastique se produit à l'extérieur de l'éprouvette pliée, de sorte que d'éventuels dommages matériels ou fragilisation soient clairement visibles, une inspection visuelle est suffisante. Un test de courbe doit être effectué. Selon la norme ISO 15630-1.

L'échantillon doit être plié à un angle compris entre 160° et 120° sur un mandrin de diamètre et d'entraxe spécifiés avec précision. L'essai s'effectue par une machine de pliage appelée « machine d'essai à plier ».

- Dans notre étude, l'angle de pliage est compris entre 160° et 120° et la température de pliage est à l'ambiante, est la même température que dans l'essai traction .
- Si l'éprouvette d'essai présente une fissure après pliage, le produit final est rejeté.

Les figures et présentent respectivement l'opération de pliage, la machine d'essai à plier et l'éprouvette pliée :



Figure IV.29: Opération de pliage.



Figure IV.30: Éprouvette après l'essai de pliage.

IV.4. Conclusion

Nous avons commencé ce chapitre par une introduction spécifiant la caractérisation de l'acier TEMPCORE 500 de l'AQS. L'analyse chimique, la structure métallographique et la préparation des échantillons ont été définies. Les essais de polissage, de dureté, de traction et de pliage et leurs machines respectives ont été cités

Chapitre V : Analyse des résultats

V.1. Introduction

Ce chapitre contient les résultats de plusieurs essais tels que la dureté et les facteurs de son évolution, la traction pour observer le comportement mécanique, les essais de pliage, l'effet de la composition chimique sur la dureté, et les connaissances structurales retrouvées dans l'acier pour fournir une étude complète du produit (aciers d'armature : rond à béton et fil machine).

V.2. Analyse chimique

V.2.1. Composition chimique de l'acier E500 (B500B-R) selon ISO 6935-2/2019

Le tableau V.1 illustre les éléments qui rentrent dans la composition chimique de la billette du rond à béton B500 selon la norme ISO et les limites de chaque élément.

Tableau V.1: Composition chimique de notre échantillon du rond à béton E500.

Élément	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%	Ni%	Cr%	Mo%	V%	Pb%	N-PPM	C-eq
Min	0,20	0,15	0,55	–	–	–	–	–	–	–	–	120	0,32
Max	0,27	0,30	0,63	0,060	0,060	0,20	0,15	0,20	0,10	0,0020	0,050	120	0,45
Souhaité	0,20	0,21	0,61	0,004	0,013	0,10	0,05	0,05	0,05	0,0001	0,001	80	0,37

V.2.2. Analyse chimique au cours de l'élaboration

Le tableau V.2 présente les analyses effectuées pour la coulée (HEAT) N° 23202046 du produit B500 dans le laboratoire de contrôle qualité de l'aciérée électrique. Une analyse s'effectue au niveau du four à l'arc électrique (EAF), deux analyses dans le four à poche (LF) et deux analyses dans la coulée continue (CCM).

Tableau V.2: Analyses effectuées dans le but de suivre l'élaboration.

Recd from	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	N-PPM	Ca PPM	Cu%	Ni%	Mo%	Pb%
EAF	0,11	0,005	0,031	0,003	0,007	0,007	58	81	0,001	0,005	–	0,001
LF	0,16	0,067	0,21	0,003	0,008	0,009	67	8	0,001	0,006	–	0,001
LF	0,25	0,15	0,61	0,006	0,01	0,011	78	16	0,001	0,007	0,01	0,001
CCM	0,24	0,20	0,62	0,006	0,09	0,01	84	19	0,001	0,007	0,01	0,001
CCM	0,24	0,21	0,61	0,009	0,011	0,016	100	16	0,001	0,008	0,002	0,001

L'analyse d'un four à arc permet de comprendre la composition chimique principale de toutes les masses fondues (matériau résiduel) afin d'éviter la présence d'éléments non réactifs tels que le cuivre (Cu) qui pourraient dépasser les limites spécifiées. De plus, les deux principales réactions responsables de l'élimination du carbone et du phosphore sont également étudiées.

L'analyse effectuée dans le four à poche nous a permis d'ajuster la composition chimique afin de la rendre conforme aux exigences. Par la suite, l'analyse réalisée lors de la coulée continue garantit le maintien de la composition chimique initiale sans altération, en respectant les valeurs souhaitées.

❖ Calcul C_{eq} (carbone équivalent) au niveau de CCM

Le carbone équivalent est un critère très important pour évaluer la trempabilité et la soudabilité métallurgique de l'acier.

$$C_{eq} = C\% + \frac{1}{6} Mn\% + \frac{1}{5} (Cr\% + Mo\%) + \frac{1}{15} (Cu\% + Ni\%)$$

$$C_{eq} (CCM) = 0,24 + 0,61/6 + (0,016 + 0,002) / 5 + (0,001 + 0,008) / 15 = 0,34$$

Dans notre cas : $C_{eq} = 0,34$. Donc l'acier a une bonne soudabilité métallurgique. On est dans l'intervalle de la norme ISO ($0,34 < 0,45$).

Le manganèse et le silicium ont un grand pourcentage par rapport à d'autres éléments. Nous avons cherché à améliorer les caractéristiques mécaniques de l'acier et surtout la limite d'élasticité. Les effets de ces éléments sont :

- Le manganèse augmente la dureté et la trempabilité de l'acier. Il joue un rôle principal dans la désulfuration (élimination du soufre).
- Le silicium participe à l'homogénéité de l'acier à la coulée, grâce à son pouvoir réducteur à la formation de soufflures. Il participe aussi à la désoxydation de l'acier.

V.3. Analyse de la microstructure

Nous avons préparé quelques échantillons de différents états pour évaluer la microstructure de l'acier Tempcore au niveau de l'entreprise Algerian Qatari Steel (AQS).

– Microstructure du métal précieux brut

La figure V.1 montre la microstructure à l'état brut. Morphologie de l'échantillon présente trois zones clairement définies qui peuvent être attribuées à l'effet d'extinction :

Zone 1 : trempé, zone 2 : intermédiaire et zone 3 : cœur du rond à béton, il semble que la température de l'acier à la sortie des dernières cages de laminage et supérieur à AC3 passera la trempe (limite de pénétration de la trempe).



Figure V.1: Les trois zones : a- Zone trempée, b- Zone intermédiaire, c- Cœur.

- Zone trempée ($V_r > V_{crit.}$) on note la présence d'une structure de trempe, à savoir (Martensite à bas carbone + Austénite résiduelle).
- Zone intermédiaire ($V_r < V_{crit.}$) dans ce cas la structure est constituée de mélange (perlite+ Bainite+ Martensite) + Austénite résiduelle
- Cœur structure de l'acier hypoeutectoïde (Ferrite+Perlite), avec persistance d'un constituant de trempe (Bainite)

V.3.1. Rond à béton E500 (B500B-R)

Dans l'analyse de la microstructure de rond à béton, nous avons évalué deux échantillons : un échantillon de la billette, et un échantillon de produit fini.

La figure V.2 expose la microstructure de la billette destinée pour le laminage. Elle est constituée de bainite. Au cours de solidification de la billette le temps est plus lent pour l'apparition de la martensite et plus rapide pour l'apparition de ferrite et perlite.



Figure V.2: Micrographie de la billette (X200).

En ce qui concerne le produit fini du rond à béton, après l'attaque chimique au Nital à 4%. Nous constatons que le matériau est constitué de trois couches (trois phases). La couche supérieure présente la martensite avec un pourcentage de 10% (selon la norme ISO). Nous remarquons que l'épaisseur de la couche est proche de 0,8 mm (1/10) de diamètre ($D = 8\text{mm}$).

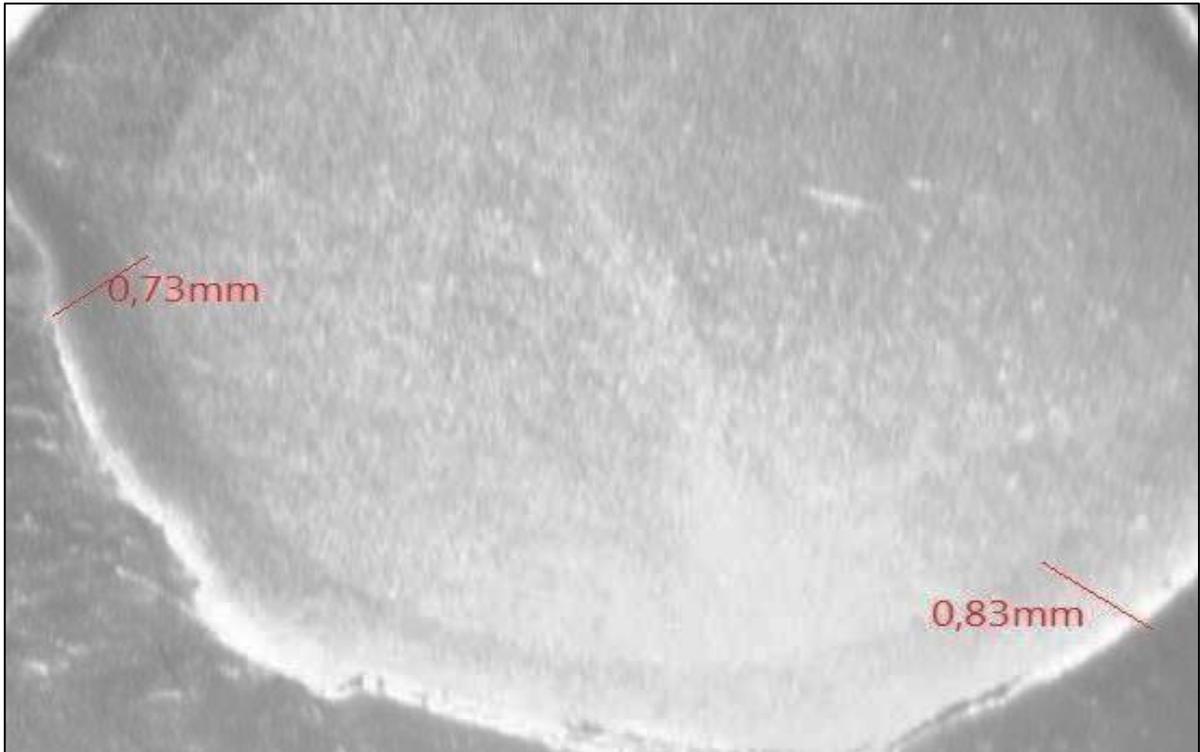


Figure V.3: Vue par microscope optique (épaisseur de la martensite).

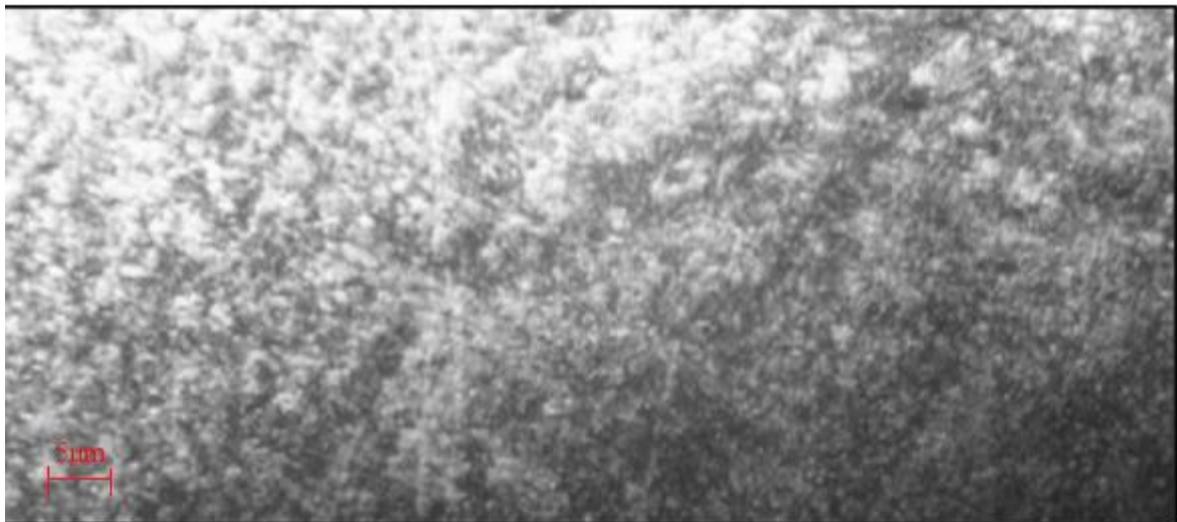


Figure V.4: Micrographie de la couche supérieure (martensite X200).



Figure V.5: Micrographie de la couche intermédiaire (bainite X500).

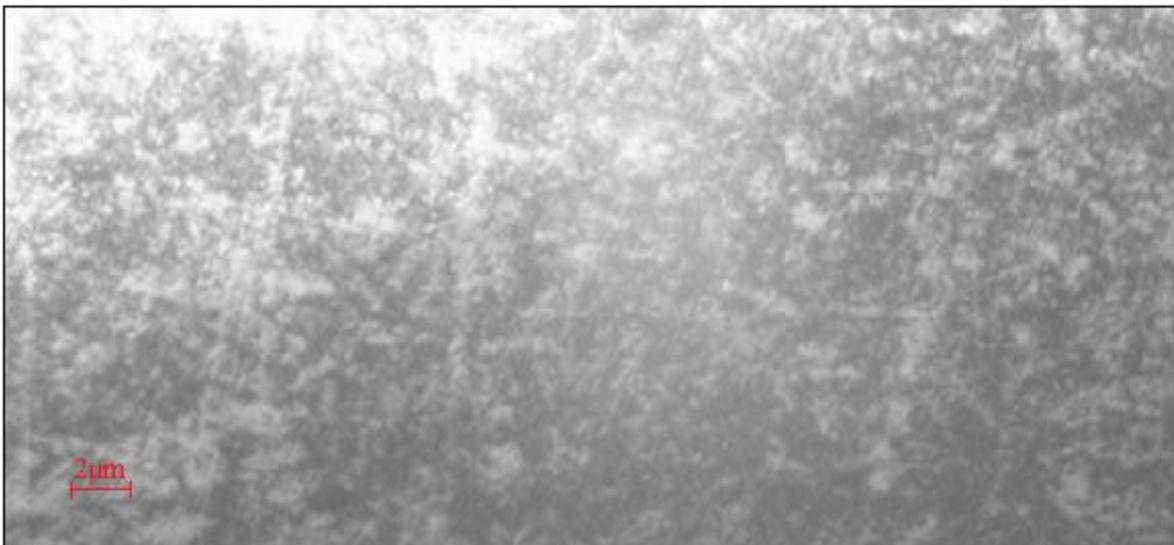


Figure V.6: Micrographie de la couche centrée ((ferrite + perlite) X500).

Des grains qui ont la forme de lamelle (Aiguille) à l'extrémité. Donc on a une formation d'une couche martensite à l'extrémité due au refroidissement rapide. La couche de centre est constituée de ferrite et de perlite. La taille des grains est plus petite que la taille des grains de billette.

Le processus au niveau microscopique implique de nombreux phénomènes physiques complexes associés à l'évolution de la microstructure du métal. Les principaux phénomènes microscopiques qui existent pendant le laminage sont :

- La recristallisation de l'austénite et de croissance des grains.

- La transformation de l'austénite en martensite, bainite, ferrite et perlite.

V.3.2. Fil machine

Dans l'analyse de la microstructure du fil machine (Wire rod), nous avons évalué un échantillon sans traitement thermique. Après l'attaque chimique nous remarquons qu'une seule zone se forme : probablement c'est de la ferrite et la perlite.

La figure V.7 illustre la microstructure du fil machine.

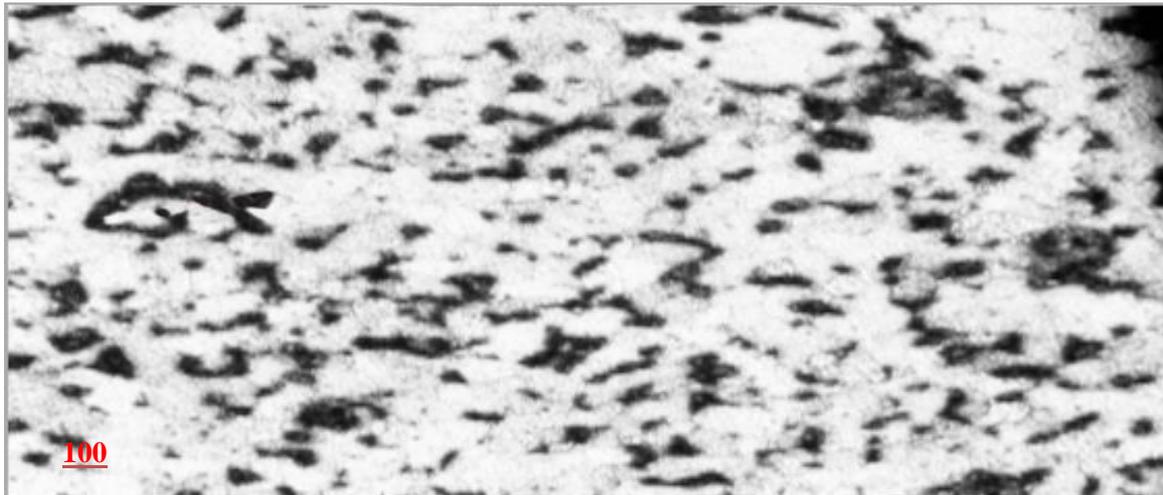


Figure V.7: Micrographie du fil machine ATT.

La figure V.7 présente une microstructure d'un échantillon de fil machine ATT (sans traitement thermique). Alors le fil machine est constitué des plages de ferrite (blanche) et des plages de perlite (grise ou noire). Il revient à l'état d'équilibre au cours de refroidissement à l'air libre (transformation de l'austénite par diffusion).

V.4. Dureté

Nous savons que la dureté d'un acier dépend de deux paramètres : la composition chimique et la microstructure. Pour savoir l'influence des éléments d'addition et la microstructure sur la dureté d'un acier, nous avons pris deux aciers : E500 et le fil machine avec 0,08% de carbone. Alors nous avons fait des calculs et des mesures.

- Nous mesurons la dureté de la billette (matière première avant laminage).
- La mesure de dureté du produit fini est faite (après un traitement thermique).

V.4.1. Dureté de la billette (E500)

Nous prenons une coupe transversale de la billette. Au cours de mesure on prend des

points de l'extrémité vers le centre. Les duretés de la billette sont exposées dans la figure V.8.

Tableau V.3: Profil de dureté de la billette.

Point par rapport à l'extrémité de surface (mm)	Dureté (HV)	Dureté (Hb)
1	135	74.1
2	134	73.8
3	139	75.9
4	137	75.2
5	138	75.6
6	139	76
7	136	74.3
8	136	74.3
9	135	74.4
10	137	75.2
11	138	75.8

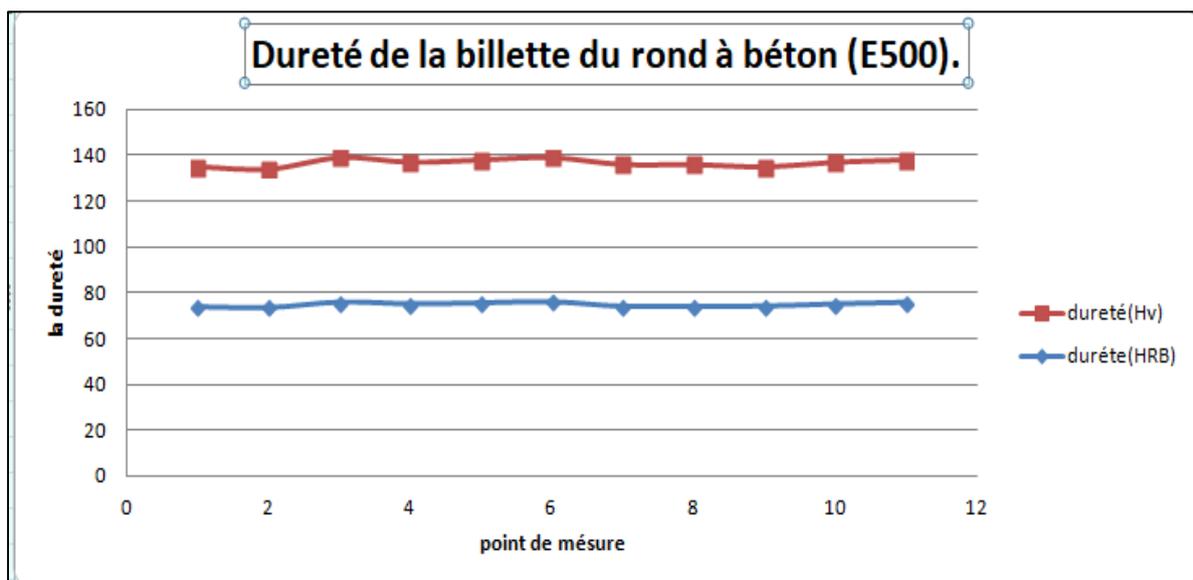


Figure V.8: Dureté de la billette du rond à béton (E500).

Interprétation

La figure V.8 montre la répartition inégale de la dureté des billettes. L'apparition d'une couche de moindre dureté par rapport au noyau s'explique par le phénomène de décarburation.

V.4.2. Dureté du produit fini de diamètre 16 mm (rond à béton) (après le traitement thermique)

Tableau V.4: Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur.

Point de mesure de l'extrémité vers le centre (mm)	Dureté (HV)
1	205
2	202
3	189
4	184
5	175
6	169
7	164
8	153

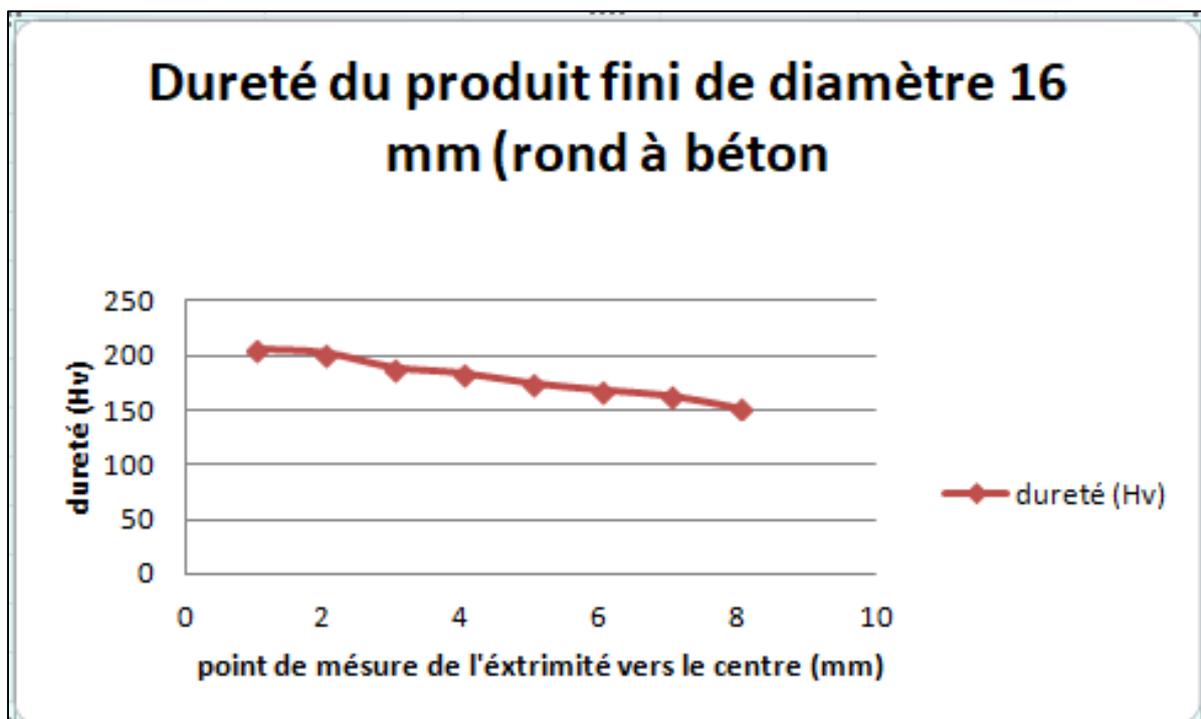


Figure V.9: Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur.

Interprétation

La figure V.9 présente l'évolution de la dureté du produit fini de diamètre 16 mm

(rond à béton). Le produit fini par le traitement thermique (trempe + auto-revenu), après la mesure de dureté, nous choisissons des points de l'extrémité vers le cœur. Nous remarquons que la valeur de dureté diminue au fur et à mesure que nous rapprochons vers le centre. Après l'attaque chimique du produit fini nous constatons que nous avons trois couches. La martensitique qui a un pourcentage de 10% exigé par ISO est la plus dure, suivie d'une couche bainitique moins dure jusqu'on atteint la valeur minimale à l'intérieur du noyau (une structure ferritoperlitique (ferrite + perlite)). On peut conclure que la diminution de la dureté est due à la présence de ferrite et de perlite, à l'exception de la martensite qui se forme dans la finition de surface. (Probablement de la bainite aussi).

V.4.3. Dureté du fil machine

La figure V.10 présente le changement de la valeur de dureté dans le fil machine. Cette valeur diminue par rapport au rond à béton parce que le pourcentage de carbone dans le fil machine est inférieur dans le rond à béton. Alors plus quel pourcentage de carbone augmente, la dureté augmente.

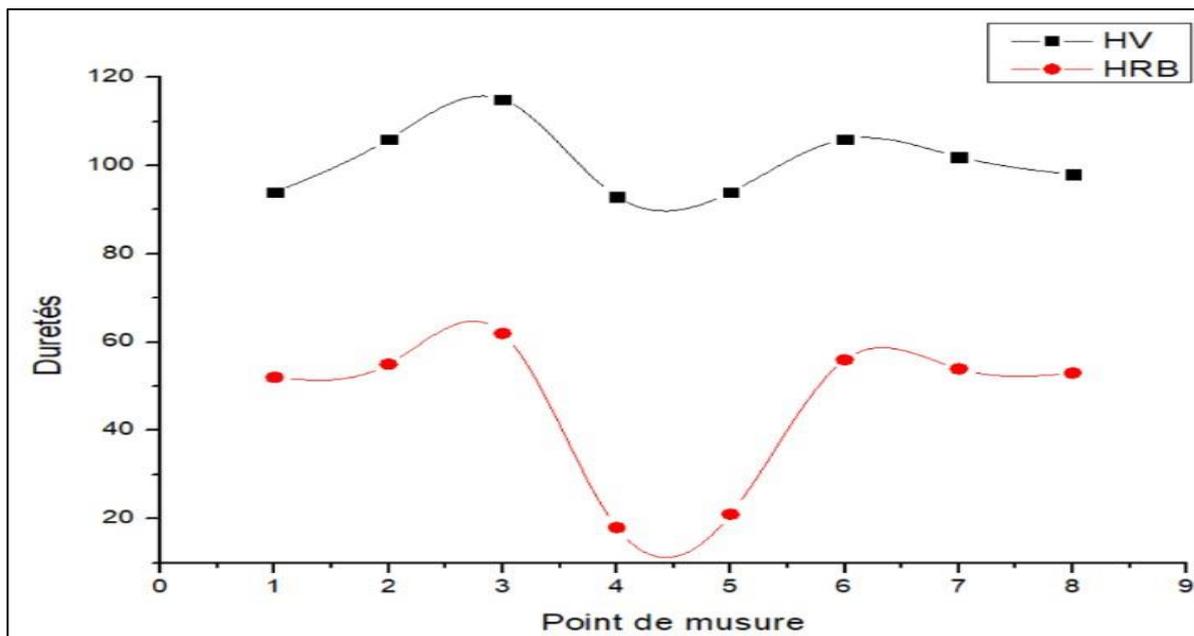


Figure V.10: Duretés du fil machine : sans traitement.

Nous concluons que le carbone est présent dans tous les aciers et constitue le principal élément durcisseur. Les éléments d'addition comme le manganèse et le silicium augmentent aussi la dureté.

V.5. Essai de traction

Pour que le produit soit conforme, il faut que :

- La limite d'élasticité : $Re \geq 500 \text{ MPa}$ pour rond à béton et $310 \text{ MPa} \geq Re \geq 240 \text{ MPa}$ pour lefil machine
- Le rapport de ductilité : $Rm / Re \geq 1,08$
- $A_t \% > 14\%$
- $A_{gt} \% > 5 \%$

—
Pour le fil machine, la striction $z = \frac{S_0 - S}{S_0} > 70\%$

- Masse linéique soit dans l'intervalle (chaque diamètre à son propre intervalle).

❖ Rond à béton

Tableau V.5: Les caractéristiques géométriques et mécaniques du rond à béton.

Diamètre	16 mm
S₀	200,96 mm ²
Longueur (partiecalibrée)	500 mm
Re	547 MPa
Rm	630 MPa
Rm/Re	1,151

La figure V.11 montre la courbe de traction du rond à béton de diamètre 16 mm (produit fini).

L'allure des courbes force–allongement comprend une partie linéaire. Cette dernière représente le comportement élastique du matériau, où la charge augmente considérablement pour de faibles allongements.

Concernant le rond à béton, la limite d'élasticité Re , est supérieure à 500 MPa pour les produits finis, par contre elle est inférieure à 500 MPa pour les produits qui ne subissent pas une trempe et un auto-revenu.

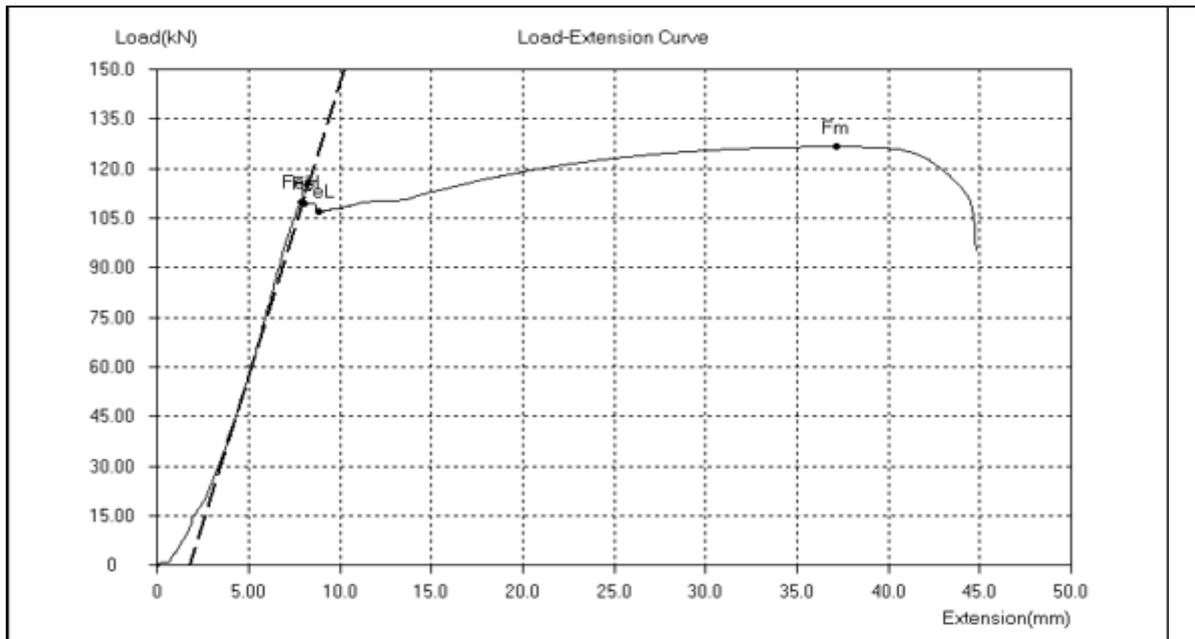


Figure V.11: Courbe de traction du rond à béton de diamètre 16 mm (produit fini).

On calcule le $A\%$ comme suit : pour chaque diamètre on a fait un repérage de $5*d$ dans le cas suivant le diamètre est 16 mm on multiplie $16*5$ qui est égale 80 après on mesure la longueur entre les deux repères (dans la partie qui rompre) $((L_f - L) / L)$

L_f : la longueur de la partie après la rupture

L : la longueur initiale $L = 5*d$

Calcul le pourcentage d'allongement après la rupture $A\%$

$$A\% = \frac{98 - 80}{80} \times 100 = 22.5\%$$

Calcul le pourcentage d'extension plastique à la force maximale $A_g\%$

$$A_g\% = \frac{22.35 - 20}{20} \times 100 = 11.75\%$$

Calcul le pourcentage d'extension totale à la force maximale $A_{gt}\%$

$$A_{gt}\% = \frac{630}{2000000} \times 100 + 11.75 = 12.06\%$$

Le traitement thermique (trempe + auto-revenu) influe directement sur les propriétés mécaniques des aciers d'armature et les améliorent. Le refroidissement rapide qui permet la Transformation de l'austénite à la martensite. Ce qui nous donne une augmentation dans la résistance à la rupture R_m et la limite élastique R_e . Par ailleurs une diminution dans le rapport de ductilité est observée. D'après les essais de traction sur les barres d'armature nous pouvons conclure que les aciers d'armature sont des matériaux ductiles alors ils sont des matériaux tenaces.

❖ Fil machine

Les caractéristiques géométriques et mécaniques du fil machine (diamètre 7mm) sont illustrées dans le tableau :

Tableau V.6: Caractéristiques géométriques et mécaniques du fil machine (diamètre 7 mm).

Diamètre	7mm
S_0	38,465 mm ²
Longueur (partie calibrée)	180 mm
R_e	265 MPa
R_m	399 MPa
R_m/R_e	1,50

$$A\% = \frac{55,66 - 40}{40} = 39,16\%$$

$$Z\% = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{38,46 - 10}{38,46} = 74\%$$

- Le rapport R_m/R_e suivant la norme ISO pour la classe de ductilité B, est :
 $R_m/R_e > 1,08$ pour les produits finis et aussi pour l'échantillon qui ne passe pas par la trempe et l'auto-revenu.
- Le rapport de ductilité du fil machine est plus grand que le rapport du rond à béton des produits finis.
- Lorsque le rapport R_m/R_e augmente, $A\%$ et $A_t\%$ augmentent.
- Les allongements $A\%$ et $A_g\%$ sont aux normes alors les produits sont conformes.

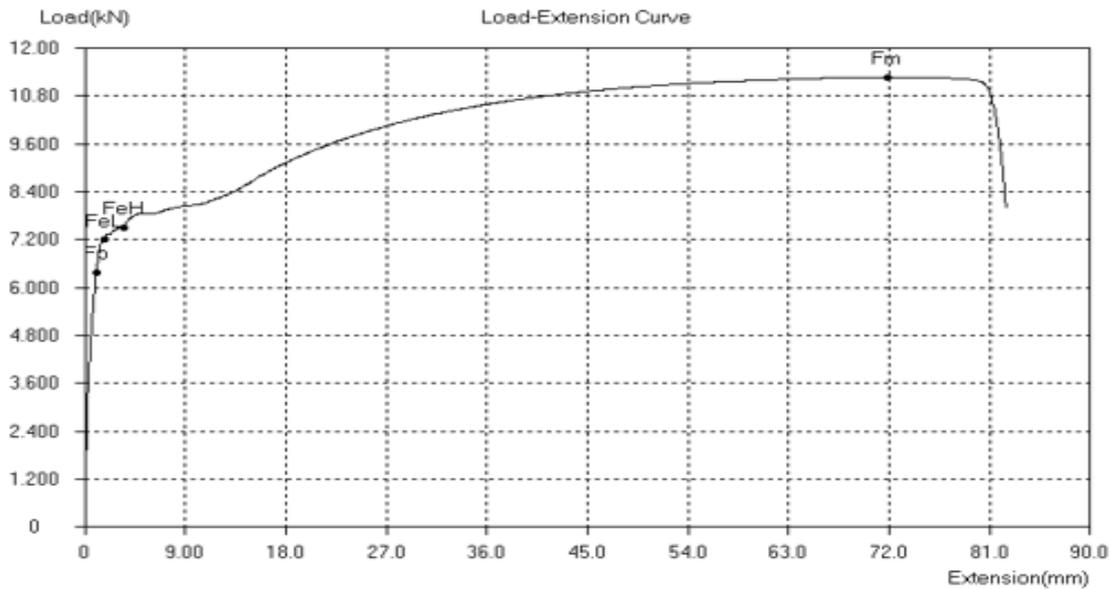


Figure V.12: Courbe de traction de fil machine de diamètre 7 mm (produit fini).

V.6. Essai de pliage

L'essai de pliage au niveau de l'entreprise AQS est un test simple pour tester la fragilité du matériau et surtout la couche supérieure (martensite) qui est exposée à la fragilité à cause du choc thermique au cours de la trempe. Donc ce test assure la conformité du produit et la continuité de production.

Nous avons effectué un essai de pliage sur un échantillon du produit fini en acier de rond à béton de diamètre 16 mm, selon la norme ISO. Après l'essai de pliage, nous surveillons la zone pliée par un contrôle visuel.

Nous constatons qu'il n'y a pas de microfissures ni de changement dans la nature de la surface. On conclut que l'échantillon a une bonne résistance au pliage et une bonne ductilité, donc le produit répond aux normes de contrôle qualité.

La composition chimique et le traitement thermique influent sur le comportement du matériau et améliorent ses propriétés mécaniques. La figure V.13 présente le résultat de l'essai de pliage.



Figure V.13: Résultat de l'essai de pliage.

V.7. Conclusion

Nous avons étudié l'analyse chimique et la microstructure des produits fabriqués par AQS. Les différentes phases de rond à béton et de fil machine ont été définies. Les caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques sont également décrites. Les résultats des essais de dureté, de traction et de pliage et du contrôle qualité associés aux produits manufacturés sont présentés. Les conditions d'exploitation de l'usine et des infrastructures seront étroitement liées à ces résultats.

Conclusion

Le but de notre étude est d'étudier l'effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques des barres d'armature (rond à béton, fil machine). Le produit passe par trois unités principales. La première unité est la réduction directe modifie la formule chimique des bielles DRI. Le produit est transporté vers une aciérie électrique (SMS) où il est conditionné pour les niveaux de carbone et d'autres éléments additifs. La mise en forme se fait par laminage, ce qui donne la forme finale du produit. Le produit est ensuite transporté directement pour être refroidi grâce à un processus appelé TEMPCORE. Enfin, le contrôle de qualité est effectué pour vérifier l'adéquation du produit au marché.

Les principales propriétés du produit final sont la limite d'élasticité, la résistance à la rupture et le rapport de ductilité. Ces propriétés mécaniques du produit sont très bonnes. L'acier est important car il est utilisé dans la construction de bâtiments et d'installations qui sont exposés à de nombreux phénomènes naturels tels que les tremblements de terre, les vents violents et les inondations.

La microstructure formée sous l'influence d'éléments additionnels et de traitements thermiques (trempe et auto-revenu) favorise la formation de couches martensitiques à 10 %. Ce dernier assure une ductilité réduite. La vitesse de formation de martensite (transformation d'austénite en martensite) dépend de paramètres d'entrée tels que le débit d'eau, la vitesse et le temps de refroidissement, etc.

Références bibliographiques

- [1] N. FILALI, Évaluation de la microstructure et les propriétés mécaniques du rond à béton de l'acier tempcore -500- Algerian Qatari Steel (AQS). Mémoire de master. ENSMM- Annaba (2018).
- [2] Cite officiel de l'entreprise : <https://aqs.dz>.
- [3] Hamzeh Hamadeh. Modélisation mathématique détaillée du procédé de réduction directe du minerai de fer. Matériaux. Université de Lorraine, 2017. Français.
- [4] Documentation interne de l'entreprise.
- [5] Postiglione, G. (année 2006). Nouvelle alimentation pour les fours à arc à courant alternatif (Thèse). Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [6] http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/trait_thermic.
- [7] Les aciers dans la construction, Publication des grands ateliers, Mme Mariam Olivier. Page 41, 44, 61 et 62. Octobre 2006.
- [8] Farhi, J. (10 Oct 1994). "Coulée Continue de Brames Minces." Dossier Techniques de l'Ingénieur, p. 6.8.
- [9] Jean Saleil, Jean Le Coz, La coulée continue des aciers. Un exemple de développement technique où l'étroite coopération entre métallurgistes, constructeurs et exploitants ont été d'une grande fécondité Jean Saleil, Jean Le Coz.
- [10] GREDT M., LESSEL G., SIMON P. Laminage de ronds à béton Tempcore en bobines sur un train à fil moderne à grande vitesse // Revue de Métallurgie-CIT, 1987, N° 1, P. 25-31.
- [11] Anouar Halloumi. Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique. Autre Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011.Français. NNT : 2011EMSE0595 tel-00609219.
- [12] O, BOUGHEDDA, Application des traitements thermiques lors du laminage à chaud de ronde à biton de l'acier tempcore-500-Algerian Qatari Steel (AQS). Mémoire de master. Université Badji Mokhtar Annaba (2020).
- [13] Kostiantyn Tabalaiev. Etude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformations à froid. Sciences de l'ingénieur [physics]. Ecole Centrale de Lyon, 2010.Français. NNT : 2010 ECDL0020. Tel :00566878&q

Références bibliographiques

- [14] M.T. Leger, P. Detrez. Les aspects métallurgiques du traitement thermique des aciers. Notice CTIF (1976), P 31, 38, 42, 43, 56, 76
- [15] Muriel Hantcherli. Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, 2010 Français. NNT : 2010EMSE0570 tel-00541049.
- [16] Élodie Boucard. Étude de l'influence de l'état métallurgique de l'austénite sur la microstructure de transformation de phase dans les aciers bas carbone. Autre. Université de Lorraine, 2014. Français. NNT: 2014LORR0245. tel-01751262.
- [17] Nikolaou, J., et al. (année 2004). "Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes."
- [18] Lourenço, P.B., Ramalho, A. (2007). "Study of steel bars for use in reinforced concrete produced by the 'TEMPCORE' process." Semantic Schola.
- [19] Ben Nasser, M., Amdouni, H., Hajbrahim, F., & Hssin, H. (2015). Matériaux métalliques. Cours Génie Mécanique. Site: Technologuepro.
- [20] Site internet : https://www.wikiwand.com/fr/R%C3%A9duction_directe/

Annexes

Annexe 1 : Tableau des caractéristiques

Tableau A1.1: Caractéristiques de traction.

Classe de ductilité	Nuance d'acier	Valeur caractéristique spécifiée de la limite supérieure d'écoulement		Caractéristique de ductilité		
		<i>ReH</i> <i>MPa</i>		Valeur caractéristique spécifiée de <i>Rm/ReH</i>	Valeur caractéristique spécifiée de l'allongement ^a	
		Maximum	Minimum		%	<i>A_{gt}</i>
				Minimum	A Minimum	Minimum
A	B300A-R	300	–	1,02	16	2
	B400A-R	400	–		14	
	B400AWR					
	B500A-R	500	–		10	
	B500AWR					
	B600A-R	600	–			
	B450AWR	450	1,25 × <i>ReH</i> (min.)	1,05	–	2,5
B	B300B-R	300	–	1,08	16	5
	B400B-R	400	–		14	
	B400BWR					
	B500B-R	500	–		10	
	B500BWR					
B600B-R	600	–				
C	B300C-R	300	–	1,15	16	7
	B400C-R	400	–		14	
	B400CWR					
	B500C-R	500	–		10	
	B500CWR					
	B600C-R	600	–			
	B450CWR	450	1,25 × <i>ReH</i> (min.)		–	7,5

D	B300D-R	300	–	1,25	17 ^b	8
	B300DWR		1,3×ReH (min.)			
	B350DWR	350				
	B400DWR	400	16 ^b			
	B520DWR	420				
	B500DWR	500	13 ^b			

Par accord entre le producteur et l'acheteur, le type d'allongement doit être choisi entre A et Agt. Si le type d'allongement n'est pas spécifié par accord, il convient d'utiliser Agt. Dans le cas des barres de diamètre 32 mm ou plus de classe de ductilité D, la valeur caractéristique minimale spécifiée pour A peut être diminuée de 2 % par chaque tranche de 3 mm d'augmentation du diamètre. Toutefois, la diminution maximale par rapport la valeur caractéristique minimale spécifiée.

c 1 MPa = 1 N/mm²

Tableau A1.2: Dimensions, masses linéiques et écarts admissibles.

Diamètre nominal de la barre ^a d mm	Section transversale nominale ^b S0 mm ²	Masse linéique	
		Prescriptions ^c Kg/m	Ecart admissible ^d %
6	28,3	0,222	±8
8	50,3	0,395	±8
10	78,5	0,617	±6
12	113	0,888	±6
14	154	1,21	±5
16	201	1,58	±5
20	314	2,47	±5
25	491	3,85	±4
28	616	4,84	±4
32	804	6,31	±4
40	1257	9,86	±4
50	1964	15,42	±4

Annexes

a : Il convient que les diamètres supérieurs à 50 mm fassent l'objet d'un accord entre le producteur et l'acheteur. L'écart admissible pour de telles barres doit être $\pm 4 \%$.

b : $S_0 = 0,785 4 \times d^2$

c : Masse linéique = $7,85 \times 10^{-3} \times S_0$.

d : L'écart admissible concerne une barre individuelle

Tableau A1.3: Valeurs dimensionnelles de pliage.

Diamètre nominal D'échantillon (mm)	Relation	Diamètre de Mandrin (mm)	Entraxe Min (mm)	Entraxe Max (mm)
8	3*d	24	72	76
10	30	78	83	
12	36	83	89	
14	42	89	96	
16	48	94	102	
20	6*d	120	135	145
25	150	156	169	
32	192	186	202	