

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE : SCIENCES DE L'INGENIORAT

DEPARTEMENT : METALLURGIE

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : METALLURGIE

SPECIALITE : GENIE METALLURGIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Application du processus de TEMPCORE lors du laminage
des barres d'armature à chaud à L'AQS, BELLARA**

Présenté par : LAHMER KHALIL

Encadrant : Pr. ATOUI L'HADI

Université. Badji Mokhtar-Annaba

Jury de Soutenance :

ATOUI L'HADI	Professeur	Badji Mokhtar-Annaba	Président
LEMOUI ABDANACER	Professeur	Badji Mokhtar-Annaba	Examineur
BENCHIKHA TAHER	Docteur	Badji Mokhtar-Annaba	Examineur
HACINI MOHAMED	Docteur	Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma mère et ma sœur aussi à mes frères.

A mon Père source de courage et de volonté qui m'a soutenu tout le

Long de ma vie.

A ma famille la plus chère à ma vie.

Et tous mes collègues de l'université.

Tous mes amis, sur tout " Mohamed, amine, monssif ;

, fares, islam, raouf, okba "

Remerciement

J'aimerais avant tout remercier « الله »

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

Je profite l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements pour mon grand et respectueux professeur, Mr. ATOUI L'HADI d'avoir accepté de m'encadrer pour mon projet de fin d'études, ainsi que pour son soutien, ses remarques pertinentes et son encouragement.

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

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

Je remercie tous les travailleurs de laboratoire de l'AQS pour les explications et les documents Ce qu'ils m'ont donné tout la durée de stage.

Résumé :

Les propriétés généralement demandées aux armatures pour béton armé doivent répondre à des exigences particulières précisées dans des normes nationales, européennes et internationales. Actuellement, dans la pratique de la production de l'acier à béton, on tend à substituer différentes nuances d'armature par une armature unifiée ayant une valeur de limite d'élasticité minimale de 500 MPa. Le remplacement des ronds à béton de nuance 400MPa par cette armature conduit à une économie de métal de l'ordre de 10-20 % d'après les estimations de différents spécialistes.

Il existe généralement plusieurs techniques de fabrication de rond à béton, parmi ces techniques le procédé TEMPCORE dont la déformation à chaud suivie d'un refroidissement accéléré sous flux d'eau, qui se heurte cependant à la possibilité de satisfaire aux exigences des normes vis-à-vis des propriétés de résistance $R_{e} \geq 500$ MPa et de plasticité.

Abstract :

Properties which are required from an armature for the reinforced concrete should satisfy the requirements of National, European and International standards. At the present time, in practice of armature production, there is a tendency of replacement of various classes of reinforcing steels by the unified armature with the minimum value of yield strength of 500 MPa. Replacement of the armature of the 400 MPa class by such reinforcing steel brings the economy of metal of an order of 10-20 % according to the estimations of various experts.

There are generally several techniques for the manufacture of concrete reinforcing bars, among these techniques the TEMPCORE process, including hot deformation followed by accelerated cooling under water flow, which however encounters the impossibility of satisfying the requirements of the standards. With respect to resistance properties $R_{e} \geq 500$ MPa and plasticity.

ملخص :

يجب أن تفي الخصائص المطلوبة من حديد التسليح للخرسانة المسلحة بمتطلبات المعايير الوطنية والأوروبية والدولية. في الوقت الحالي ، في الممارسة العملية لإنتاج حديد التسليح ، هناك اتجاه لاستبدال فئات مختلفة من حديد التسليح بواسطة المحرك الموحد بأقل قيمة لمقاومة الخضوع تبلغ 500 ميغا باسكال. إن استبدال المحرك للفئة 400 MPa بواسطة حديد التسليح هذا يحقق الاقتصاد في المعدن بنرتيب 10-20 ٪ وفقًا لتقديرات خبراء مختلفين.

بشكل عام ، هناك العديد من التقنيات لتصنيع قضبان التسليح الخرسانية ، ومن بين هذه التقنيات عملية TEMPCORE ، بما في ذلك التشوه الساخن الذي يتبعه التبريد المتسارع تحت تدفق المياه ، والذي يواجه مع ذلك استحالة تلبية متطلبات المعايير فيما يتعلق بخصائص المقاومة $Re \geq 500$ MPa واللدونة.

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DU PROCESSUS DE TEMPCORE.....	4
Historique :	4
I. Procédé TEMPCORE :	6
I.1. Théorie du processus TEMPCORE :	6
I.2. Phénomènes physiques :	9
I.3. Mécanismes fondamentaux de la trempe TEMPCORE :	9
I.4. Description de l'acier TEMPCORE 500:	10
I.5. Caractéristiques des barres d'armature en acier TEMPCORE :	12
CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES BARRES D'ARMATURE	20
II.1. Généralité sur le rond à béton :	20
II.1.1. Définition de rond à béton :	20
II.1.2. Utilité de rond à béton :	21
II.1.3. But d'utilisation de rond à béton :	21
II.1.4. Usage de rond à béton :	22
II.2. Evolution des armatures pour béton armé :	23
II.3. Technologies utilisées dans la production des barres d'armature en acier :	23
II.4. Différence entre les barres TMT et les barres d'armature torsadées :	25
II.5. Techniques utilisées pour la caractérisation des barres d'armature :	27
II.6. Propriétés des barres d'armature :	30
II.6.1. Exigences des propriétés des barres d'armature :	30
II.6.2. Propriétés mécaniques des barres d'armature en acier :	32
II.6.3. Propriétés Microstructurales des barres d'armature:	36
II.6.4. Propriétés physiques des barres d'armature :	39
II.6.5. Compositions chimiques des barres d'armature :	41

II.7. Effet des éléments d'alliage sur les propriétés des barres d'armature :	42
II.8. Présentation des différentes caractéristiques du rond a béton de BELLARA :	46
II.8.1. Analyse chimique :	46
II.8.2. Analyse de la microstructure :	47
II.8.3. Évaluation de la dureté en profondeur des barres d'acier TEMPCORE 500 :	49
II.8.4. Essai de traction :	51
II.8.5. Résultats de l'essai de pliage :	53
CHAPITRE III : TECHNOLOGIE DU LAMINAGE DES BARRES D'ARMATURE A L'AQS BELLARA	56
Présentation succincte de l'usine de l'AQS BELLARA :	56
III.1. Métallurgie de laminage :	58
III.1.1. Définition :	58
III.1.2. Transformation de la billette :	59
III.1.3. Réchauffage :	59
III.2.1. Aspect métallurgique :	60
III.3. Différentes parties de laminoir des barres d'armature à l'AQS BELLARA:	63
III.3.1. Zone Parc à billette :	63
III.3.2. Zone de chauffage:	65
III.3.3. Zone train de laminage :	68
III.3.4. Zone de finissage :	74
CHAPITRE IV : DEFAUTS DES BARRES D'ARMATURE LORS DU LAMINAGE	81
IV.1. Défauts de laminage :	81
IV.1.1. Défauts géométriques :	81
IV.1.2. Défauts métallurgiques et microstructuraux :	82
IV.1.3 Défauts de surface :	82
IV.2. Défauts des barres d'armature lors du laminage :	82
IV.2.1. Défauts dus à un mauvais réglage du laminoir :	83
IV.2.2. Défauts apparaissant lors de la mise en forme :	83

IV. 3. Type de défauts apparus lors la production de rond à béton à l'AQS BELLARA:	84
CONCLUSION GENERALE :.....	93
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :.....	95

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1: Principe du processus TEMPCORE	8
Figure I.2 : Section en acier TEMPCORE avec les trois différents types de microstructures distinguables après l'attaque chimique.....	9
Figure I.3 : Modifications de la dureté et de la microstructure par rapport à la distance de la surface de la barre obtenue par le procédé TEMPCORE	11
Figure I.4 : Microstructure des barres d'armature en acier TEMPCORE	13
Figure I.5 : Microstructure et homogénéité de la microstructure des barres d'armature en acier TEMPCORE.	14
Figure I.6 : Cintrage de l'armature TEMPCORE avec une soudure croisée	17

Chapitre II :

Figure II.1 : Poutre en béton non armé	21
Figure II.2 : Poutre en béton armé	22
Figure II.3: Diagramme schématique du processus TMT de renforcement de l'acier barre ...	24
Figure II.4: (a) Coupe transversale typique d'une barre TEMPCORE et micrographies optiques du (b) noyau, (c) de la couche intermédiaire et (d) couche auto-trempée extérieure durcie	25
Figure II.5 : Courbe de traction	27
Figure II.6: Machine de traction	27
Figure II.7 : Principe de l'essai de pliage.....	29
Figure II.8 : Courbe contrainte-déformation d'une barre d'acier d'armature nervurée.....	33
Figure II.9 : Effet du travail à froid sur les barres d'armature en acier	34
Figure II.10: Courbe contrainte-déformation d'une barre d'acier d'armature torsadée	35
Figure II.11 : Microstructure des barres d'armature en béton réalisé avec la technologie TEMPCORE, ayant un diamètre de 32 m.....	36
Figure II.12 : Résultats des mesures de dureté liés à la section transversale des barres d'armature en béton fabriqués à l'aide de la technologie TEMPCORE.....	38

Figure II.13 : Microstructure de la barre d'armature en béton durci à froid ayant un diamètre de 12 mm	38
Figure II.14 : Résultats de la mesure de la dureté dans la section transversale de la barre d'armature en béton durci à froid	39
Figure II.15 : (a) : Influence du %C sur Re, Rm et A% . , (b) : Influence du %C sur la résilience	43
Figure II.16: Micrographie optique du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique, prise à l'extrémité de surface.....	47
Figure II .17: Micrographie optique du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique, prise au centre.	47
Figure II .18 : Micrographie optique de rond à béton de diamètre 25 mm après traitement thermique, prise à l'extrémité de surface.....	48
Figure II .19 : Micrographie optique de rond à béton de diamètre 25 mm, prise dans la 2ème zone d'extrémité de surface.	48
Figure II. 20 : Micrographie optique de rond à béton de diamètre 25 mm après traitement thermique, prise au centre.	49
Figure II .21 : Profil de dureté en fonction de la distance du rond à béton de l'extrémité vers le cœur (mm) de diamètre 25mm avant traitement thermique.....	50
Figure II. 22 : Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur (mm) du produit fini de diamètre 25mm.....	51
Figure II. 23: Courbe de traction du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique(ATT).....	51
Figure II. 24: Courbe de traction de produit fini de diamètre 25mm après traitement thermique(PF).	52
Figure II . 25 : Résultat de l'essai de pliage.	53

Chapitre III :

Figure III.1 : Étapes technologiques et bilan matière (Phase 1).....	57
Figure III.2 : Exemple : (a) de laminoir réversible et (b) de laminoir tandem.....	58
Figure III.3 : Évolution de la taille de grain austénitique en fonction de la température de réchauffage.....	60
Figure III.4 : Cinétique de recristallisation statique	61
Figure III.5 : Représentation de recristallisation :(a) Métal écroui, (b) formations des grains, (c) après recristallisations et germination et formation des nouveaux grains	62
Figure III.6 : Parc à billettes.....	65
Figure III.7 : Four de réchauffage des billettes.	66
Figure III.8 : Décalamine.	68
Figure III.9 : Calamine.....	68
Figure III.10 : Extracteur.....	69
Figure III.11 : Cisaille d'urgence.	69
Figure III.12 : Cages et tendeurs de laminage.....	70
Figure III.13 : Cage de laminage	71
Figure III.14: Guide d'entrée de produit laminier.	72
Figure III.15: Guide de sortie de produit laminier.....	72
Figure III.16: Cylindres de laminage.....	73
Figure III .17 : Thermex ouvert.....	75
Figure III.18 : 03 phases finales de rond à béton TEMPCORE	75
Figure III.19 : Traineur de thermex entre les 2 chambres.....	76
Figure III.20 : Traineur cisaille à froid de 96 m.....	76
Figure III.21 : Déviateur des barres.....	77
Figure III.22 : Système de refroidissement à l'air (COOLING BED).....	77
Figure III.23 : Cisaille à froid de 12 m.	78
Figure III.24 : Ligature en fardeaux.....	78

Figure III.25 : Etiquette métallique.	79
Figure III.26 : Zone de stockage.....	79

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Exemple :(a) de la pinçure et (b) d'un rond maigre.....	83
Figure IV.2 : Défaut de moustache	84
Figure IV.3 : Défaut d'empreinte.....	85
Figure IV.4 : Hors tolérance diamètre.	86
Figure IV.5 : Écrasement de diamètre.....	87
Figure IV.6 : Écrasement de verrous.....	87
Figure IV.7 : Hors tolérance de nervure.....	88
Figure IV.8 : Absence des verrous.....	88
Figure IV.9 : Défaut de chutes.....	89
Figure IV.10 : Défaut de fissure	89
Figure IV.11 : Défaut d'ondulation.....	90
Figure IV.12 : Défaut de barre non alignée.	90
Figure IV.13 : Défaut de taches d'huile.	91

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableaux I.1 : Composition chimique le la nuance d'acier TEMPCORE 500.....	11
Tableaux I .2: Dimensions et les masses des ronds à béton nervuré	12
Tableau I.3 : Comparaison des propriétés de flexion des armatures en acier TEMPCORE avec des barres en acier conventionnelles	16

Chapitre II :

Tableau II.1 : Comparaison des propriétés des barres d'armature réalisées à l'aide de diverses technologies	26
Tableau II.2 : Propriétés d'après la grandeur.	28
Tableau II.3 : Compositions chimiques de l'acier à béton HA soudable selon les Normes. ...	41
Tableau II.4 : Effet des éléments d'alliage utilisés dans les aciers sur les propriétés des barres d'armature	44
Tableaux II. 5 : Composition chimique le la nuance d'acier TEMPCORE 500	46
Tableau II. 6 : Composition chimique de la billette	46
Tableau II. 7 : Composition chimique de rond à béton	46
Tableau II. 8 : Profil de dureté en fonction de la distance de rond à béton de diamètre 25mm Avant traitement thermique.	49
Tableau II .10 : Résistance à la rupture R_m et la limite d'élasticité R_e de rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique (ATT).	52
Tableau II. 11: Résistance à la rupture R_m et la limite d'élasticité R_e de rond à béton de diamètre 25 mm.	52
Tableau II. 12 : Résumé de tous les résultats obtenus par l'essai de traction.	53

Chapitre III :

Tableau III.1 : Spécification mécaniques de la nuance de Billette.	64
Tableau III.2 : Composition chimique de la Billette.	64
Tableau III.3 : Fourchette de Température et Vitesse de laminage.....	70
Tableau III.4 : Diamètres des cylindres :	74

INTRODUCTION GENERALE

Durant la deuxième moitié du 19ème siècle les fers plats utilisés à l'origine furent progressivement remplacés par des barres rondes en fer, puis en acier. Depuis cette époque, les améliorations de la qualité des matériaux ont été apportées surtout avec l'apparition des ronds d'acier lisses, puis des barres à haute adhérence (HA), et la mise au point de ciments de meilleure qualité, et de toute une gamme d'adjuvants.

Du point de vue mécanique (résistance des matériaux) le béton est un matériau qui résiste bien à la compression, mais très médiocrement à la traction, voilà pourquoi il s'agit de renforcer le béton par des armatures orientées autant que possible suivant la direction des isostatiques de traction.

À présent, le génie civil demande de l'acier pour béton armé avec des qualités de plus en plus élevées, souvent contradictoires : bonne résistance mécanique et bonne plasticité. Ce fait se fonde essentiellement sur deux circonstances. La première est la nécessité de garantir la sécurité et la solidité nécessaire des bâtiments, dont le nombre d'étages augmente en permanence allant jusqu'aux gratte-ciel. La deuxième est le facteur économique qui joue aussi un rôle : plus l'armature est résistante, plus la consommation en aciers est faible.

Parmi les procédés de fabrication de rond à béton, on cite le procédé TEMPCORE qui a été développé au début des années 70 par le Centre de Recherche Métallurgique (CRM) groupe afin de fabriquer des barres d'armature en béton soudé à haute résistance «barres» en acier doux, sans ajouter d'éléments d'alliage coûteux. Il consiste à soumettre l'acier laminé à chaud à un traitement thermique en ligne en 3 étapes successives: en quittant le stand final du moulin, le produit est refroidi rapidement et énergiquement à travers une installation de refroidissement courte, où il subit un durcissement superficiel (couche de martensite). La dernière étape à lieu lorsque le produit repose sur le lit de refroidissement où la barre est soumise à un refroidissement normal jusqu'à la température ambiante (transformation de l'austénite résiduelle dans le noyau).

Dans ce contexte, le rond à béton produit par « Algerian Qatari Steel », constitue une opportunité réelle pour comprendre l'application du processus de TEMPCORE lors du laminage des barres d'armature à chaud.

INTRODUCTION GENERALE

Le mémoire présenté est structuré en quatre parties, d'une conclusion générale et une référence bibliographique. La première partie constitue une présentation du processus TEMPCORE. La deuxième présente les caractéristiques des barres d'armature. Dans La troisième partie, on a présenté la technologie de laminage des barres d'armature à l'AQS BELLARA. La quatrième partie est consacrée à la présentation des défauts des barres d'armature lors du laminage.

CHAPITRE I

Présentation du processus de TEMPCORE

CHAPITRE I : PRESENTATION DU PROCESSUS DE TEMPCORE

Historique :

Au début du XX Siècle, la révolution industrielle favorisait une économie florissante et un grand nombre de projets d'envergure eurent lieu durant cette période.

L'augmentation continuelle de la circulation automobile favorisa l'expansion des réseaux routiers et avec ceux-ci le nombre de ponts.

A cette époque, la main d'œuvre était relativement bon marché et, de ce fait, la construction de ponts en béton armé était beaucoup plus économique, pour de courtes et de moyennes portées, un très grand nombre de ponts ont donc été construits durant cette période.

L'apparition et l'évolution des aciers d'armature crénelés eurent lieu progressivement durant les années 1940 et 1950, à partir de 1950 le code américain AC1 spécifiait que l'utilisation d'armatures lisses sans ancrage mécanique était prohibée. Par conséquent la plupart des ponts construits avant 1950 comprennent donc des armatures lisses sans ancrage mécanique offrant très peu d'adhérence avec le béton.

Les barres d'armature lisses utilisées étaient de deux types: les sections circulaires et les sections carrées, ces barres n'offraient pas une adhérence intéressante. Cette lacune du point de vue de l'adhérence fut constatée au début des années 1940 et certaines barres crénelées apparurent alors sur le marché.

Cependant il fallu attendre l'année 1947 pour qu'apparaisse la première norme en Amérique du Nord ASTM A30547T concernant la fabrication des armatures crénelées d'abord très peu efficaces [1].

À la fin des années 60 et au début des années 70, les utilisateurs d'acier d'armature ont été orientés aciers de renforcement à haute résistance avec une ductilité adéquate, une bonne soudabilité, et donc les fabricants devaient développer des méthodes conduisant à des barres supérieures avec relativement faible Coût de production. Méthodes conventionnelles par laminage à chaud et travail à froid du carbone les aciers ne sont pas pris en considération en raison des propriétés les méthodes de micro alliage promettaient une certaine amélioration à un coût supplémentaire.

Le traitement thermique est venu au premier plan et le traitement thermique en ligne, en prenant avantage de la chaleur roulante, semblait être la voie économique vers le nouveau produit.

En 1967, une tentative a été faite pour produire une résistance élevée armature de barres d'acier par cette méthode. Une autre chaleur en ligne technique de traitement, nommée TEMPRIMAR, a été mise au point dans l'ancien République d'Allemagne[2].

Mais parmi la chaleur en ligne méthodes de traitement, le processus TEMPCORE est devenu le plus réussi et le plus populaire. Cette dernière méthode provient des laboratoires du Centre de Recherches Métallurgiques (CRM), et en 1972, le procédé TEMPCORE a été breveté en Belgique (Brevet belge 790.867 du 31-10-1972).

En 1974, les premiers essais à l'échelle industrielle ont été réalisés et ce fut le début de fabrication à l'échelle industrielle d'acier d'armature TEMPCORE.

En 1975, Economopoulos est publié un document intitulé "Application of the Procédé TEMPCORE à la fabrication de béton armé à haute limite d'élasticité bars "dans Metallurgical Reports CRM, dans lequel les principes du TEMPCORE est décrit avec les résultats des essais en laboratoire et industriels.

Dans le même périodique, ont fourni des détails sur la soudabilité des barres d'acier produites par le procédé TEMPCORE. En 1977, une étude a eu lieu montrant évaluation des propriétés mécaniques de ce type d'acier d'armature. Il a été démontré que le procédé est capable de produire une teneur de 500 à 600 MPa barres de renforcements déformés avec super ductilité et excellente soudabilité.

Le procédé TEMPCORE est l'un des procédés thermomécaniques qui a été suivi par l'usine sidérurgique BELLARA pour produire des barres d'armature soudables à haute limite d'élasticité à partir de billettes d'acier doux sans altérer leur ductilité et sans l'ajout de micro-éléments d'alliage.

I. Procédé TEMPCORE :

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 [3].

I.1.THÉORIE DU PROCESSUS TEMPCORE :

➤ Principe du processus :

TEMPCORE est un procédé de trempe directe et d'auto-trempe à partir de la chaleur du laminage. La présente description est exclusivement consacrée au traitement thermique des ronds à béton laminés à chaud [4].

Selon le procédé TEMPCORE la barre de béton du laminoir est soumise à un cycle spécial de traitement thermique en trois étapes :

✓ Première étape

La première étape est une opération de refroidissement rapide appliquée à la barre au moment où elle quitte le dernier poste de finissage. L'efficacité de l'installation de refroidissement utilisée dans cette première étape doit être telle que la vitesse de refroidissement jusqu'à une certaine profondeur sous la surface de la barre soit supérieure à la vitesse critique pour la trempe martensitique [5].

A l'issue de cette opération, la barre présente un noyau d'austénite entouré d'une couche composée d'un mélange d'austénite et de martensite, dont la teneur en martensite diminue de la surface vers l'intérieur. La durée visée de la première étape dépend de l'épaisseur souhaitée de la couche martensitique.

✓ **Deuxième étape**

Au cours de la deuxième étape, la barre quitte la zone de refroidissement drastique et est exposée à l'air. Le coefficient de transfert thermique de l'environnement étant très faible, et le gradient de température dans la section transversale de la barre étant très important, le noyau réchauffe la couche de surface trempée par conduction. Par conséquent, la martensite formée au cours de la première étape est soumise à un auto-revenu qui assure une ductilité adéquate tout en maintenant un haut niveau de limite élastique [6].

La deuxième étape est conventionnellement considérée comme terminée lorsque la température à la surface de la barre passe par un maximum, appelé "Température de revenu".

La durée de la deuxième étape varie considérablement en fonction du diamètre de la barre et des conditions de refroidissement appliquées lors de la première étape [7].

Au cours de la deuxième étape, l'austénite non transformée de la couche superficielle se transforme en bainite, tandis que le noyau reste austénitique. D'autre part, l'austénite sous jacente à la couche de martensite trempée peut commencer à se transformer en bainite, selon la composition de l'acier et les conditions de refroidissement.

✓ Troisième étape

La troisième étape se produit lorsque la barre repose sur le Cooling bed. Il s'agit d'une transformation quasi isotherme de l'austénite restante [8].

Le produit de cette transformation est un mélange de ferrite, de perlite et de bainite, selon plusieurs facteurs :

- la composition de l'acier ;
- le diamètre de la barre ;
- la température de finition de la séquence de laminage ;
- l'efficacité et la durée du refroidissement pendant la première étape.

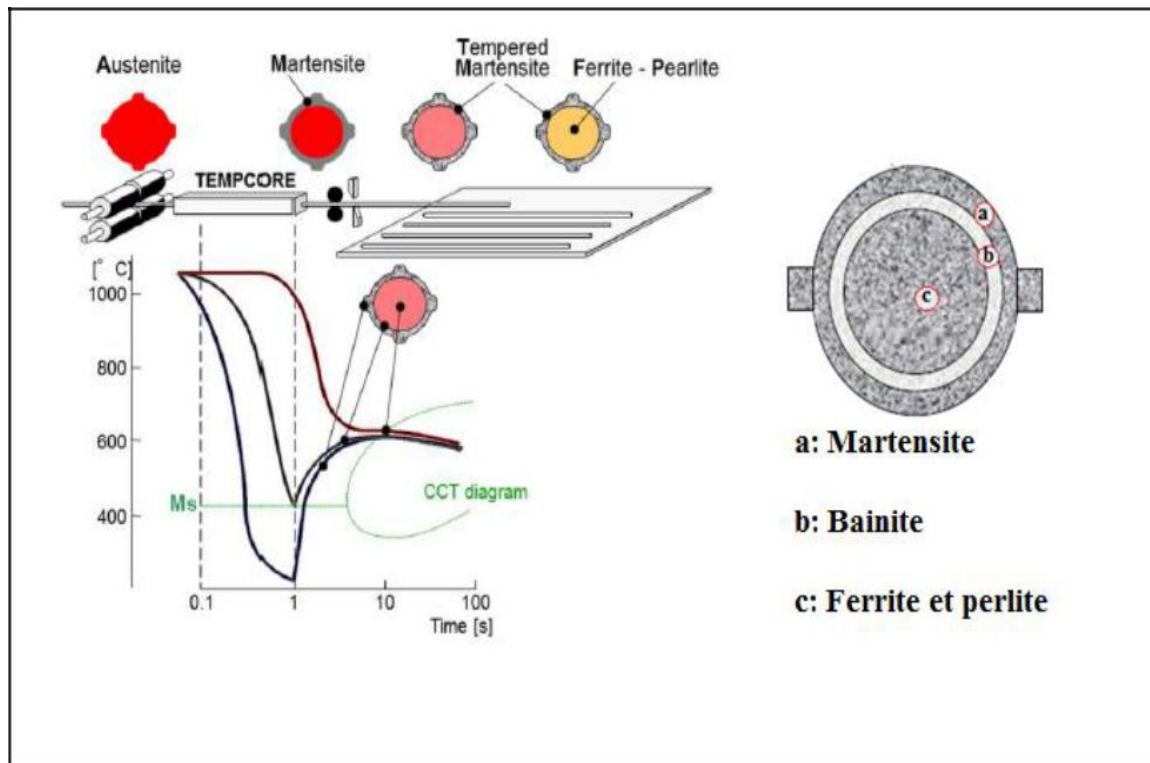


Figure I.1: Principe du processus TEMPCORE

I.2. Phénomènes physiques :

Les phénomènes physiques impliqués dans les trois étapes susmentionnées du processus TEMPCORE peuvent être divisés en trois catégories :

- a) les échanges thermiques entre la surface du bar et l'environnement ;
- b) la conduction thermique dans la barre ;
- c) les phénomènes métallurgiques tels que les transformations allotropiques.

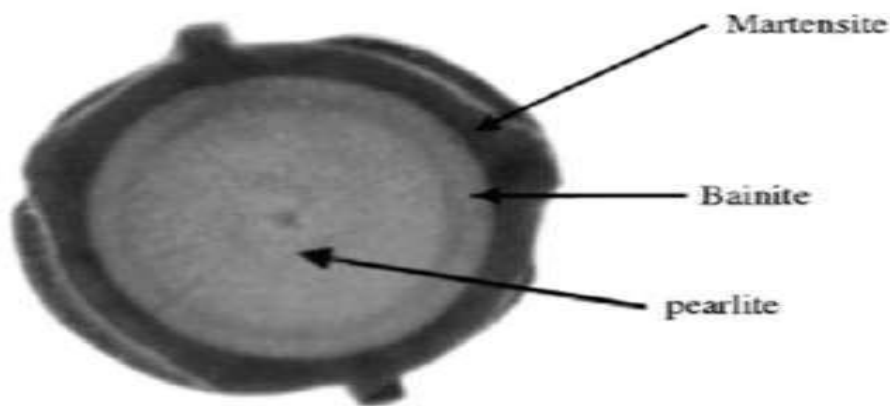


Figure I.2 : Section en acier TEMPCORE avec les trois différents types de microstructures distinguables après l'attaque chimique [9].

I.3. Mécanismes fondamentaux de la trempe TEMPCORE :

Les phénomènes impliqués ont été divisés comme indiqué précédemment en trois classes : les échanges thermiques de surface, la conduction thermique et la métallurgie physique. Les paramètres régissant le processus trois peuvent être considérées comme des variables de contrôle indépendantes du point de vue de l'exploitant du laminoir: le débit d'eau, le temps de trempe et la température de finition.

Les propriétés macroscopiques globales de la barre, en particulier ses propriétés en traction, dépendent de trois facteurs :

- ❖ Le pourcentage en volume de martensite : dépend de la température de départ de la transformation de la martensite (point M_s), elle-même fonction de la composition et du champ de température dans la section transversale de la barre sortant du dispositif de

trempe. On considère conventionnellement que la limite de la couche de martensite correspond à un cylindre circulaire du même axe que la barre et pour lequel la température minimale est égale au point M_s [10].

❖ Les propriétés de traction de la martensite : dépendent de la composition chimique et de la "Température de revenu" définie au point Cette température de revenu est elle-même fonction du champ thermique dans la section transversale de la barre sortant du dispositif de refroidissement TEMPCORE.

❖ Les propriétés de traction de la structure du noyau ferrite-carbures :

La composition chimique à travers les diagrammes TRC et les relations de microstructure ; les relations de propriétés.

Les conditions de refroidissement pendant la trempe et les étapes subséquentes de refroidissement.

Pour un diamètre de barre donné, le champ thermique peut être modifié en modifiant la température de la barre entrant dans le dispositif de trempe, la durée de l'étape de trempe et le coefficient de transfert thermique entre la surface de la barre et l'eau de refroidissement.

Le coefficient de transfert thermique est le facteur clé du procédé TEMPCORE ; il est exprimé en fonction de la température de surface de la barre, fonction dépendant principalement de la conception du dispositif de refroidissement, ainsi que du débit et de la température de l'eau de refroidissement [11].

I.4. Description de l'acier TEMPCORE 500:

L'acier TEMPCORE 500 est de haute ductilité et a une limite d'élasticité élevée. Sa composition chimique avec un maximum de $C_{eq} < 0,45$ garantit sa soudabilité.

L'acier TEMPCORE 500 se présente sous la forme d'un rond muni de deux séries de verrous. La hauteur de ces verrous décroissante du centre vers les extrémités. Sur l'un des chants, un verrou sur deux présente un écart d'inclinaison d'au moins 10° par rapport au verrou contigu.

1. Limite d'élasticité : ≥ 500 MPa (valeur caractéristique), ≥ 475 MPa (valeur minimale).
2. Rapport R_m/R_e : $\geq 1,08$ (valeur caractéristique), $\geq 1,06$ (valeur minimale).
3. A_{gt} (%) : $\geq 5\%$ (valeur caractéristique), $\geq 4\%$ (valeur minimale).
4. Absence de fragilité (essai de pliage-dépliage).

5. Masse linéique : $\pm 4,5\%$ [12].

Composition chimique de l'acier TEMPCORE 500 :

Tableaux I.1 : Composition chimique de la nuance d'acier TEMPCORE 500

C%	Mn%	P%	S%	N%	Cu%
≤ 0.22	≤ 0.98	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.012	≤ 0.8

$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \leq 0.45\%$ [12].

Évaluation de la dureté en profondeur des barres d'acier TEMPCORE 500 :

La dureté a des valeurs de 164 HV dans le noyau et de 262 HV dans la couche de surface, c'est-à-dire que la couche de surface est environ 60% plus dure que le noyau.

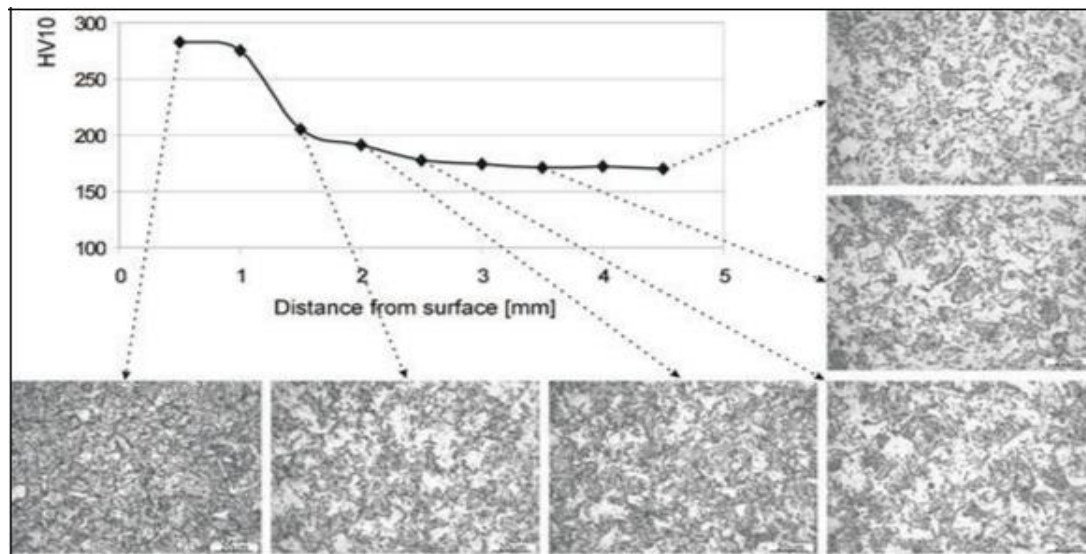


Figure I.3 : Modifications de la dureté et de la microstructure par rapport à la distance de la surface de la barre obtenue par le procédé TEMPCORE [13].

Tableaux I .2: Dimensions et les masses des ronds à béton nervurés [14]

Diamètre nominal (mm)	Aire de section transversale Nominale (mm ²)
6	28.3
8	50.3
10	78.3
12	113
14	113
16	201
20	314
25	491
32	804
40	1256

I.5. Caractéristiques des barres d'armature en acier TEMPCORE : [15]

Diverses propriétés caractéristiques des barres d'armature en acier TEMPCORE sont décrites ci-dessous :

I.5.1. Type d'acier :

Les aciers pour les barres d'armature TEMPCORE sont essentiellement des aciers simples à faible teneur en carbone spécifiés pour la limite d'élasticité, la ductilité, le carbone ou l'équivalent en carbone et le rapport rendement / traction. La teneur en carbone spécifiée maximale et minimale vise à assurer la soudabilité et la durcissabilité. Avec une teneur en carbone trop faible, la trempabilité de l'acier n'est généralement pas suffisante et donc une trempe plus sévère est nécessaire, ce qui affecte la conception du laminoir, par exemple la vitesse du laminoir, ainsi que la longueur et l'efficacité de la chambre de

refroidissement. L'acier au carbone avec une teneur en carbone dans la gamme de 0,13% à 0,24% et l'équivalent en carbone (CE) de moins de 0,45%.

I.5.2. Phases métallurgiques et microstructure :

La martensite trempée sous forme de paquets de plaques minces à morphologie martensitique caractérise la couche durcie. Un mélange de bainite et de ferrite polygonale se trouve dans la couche intermédiaire durcie et de la ferrite polygonale et de la perlite se développent dans le cœur.

La microstructure est généralement fine en raison d'un refroidissement relativement rapide dans le cœur et en raison du traitement thermomécanique impliqué dans le processus TEMPCORE, par exemple, les grains de ferrite polygonaux dans la région du cœur peuvent être aussi petits que 8 micromètres de diamètre et même 3 micromètres en diamètre lorsque la température de revenu inférieure est utilisée.

La microstructure de l'armature en acier TEMPCORE est illustrée à la figure I.4.

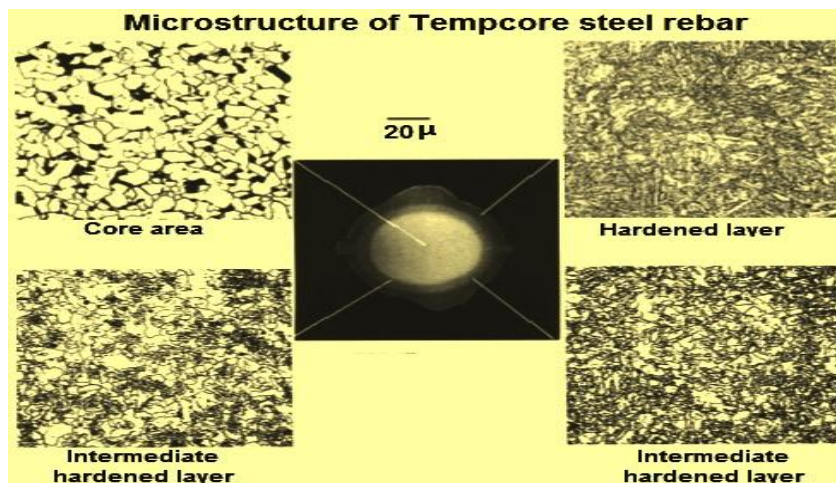


Figure I.4 : Microstructure des barres d'armature en acier TEMPCORE

Parfois, la ferrite se forme en raison de la température d'égalisation plus élevée. Il est possible que des températures de finition élevées et peut-être aussi une déformation de laminage insuffisante soit les principales raisons de la formation de ce type de microstructure. Une température de finition élevée et une déformation de laminage insuffisante entraînent de gros grains austénitiques en fin de laminage, et ainsi de la martensite et de la bainite grossières se développent dans la couche durcie et dans la couche durcie intermédiaire lors de la trempe ultérieure. La grande taille des grains d'austénite dans le

noyau empêche la collision de la ferrite aux joints de grains, permettant ainsi à la ferrite de se développer.

La coupe transversale gravée typique montrant les trois régions métallurgiques et les microstructures typiques et l'homogénéité de la microstructure des barres d'armature en acier TEMPCORE sont représentées sur la figure I.5.

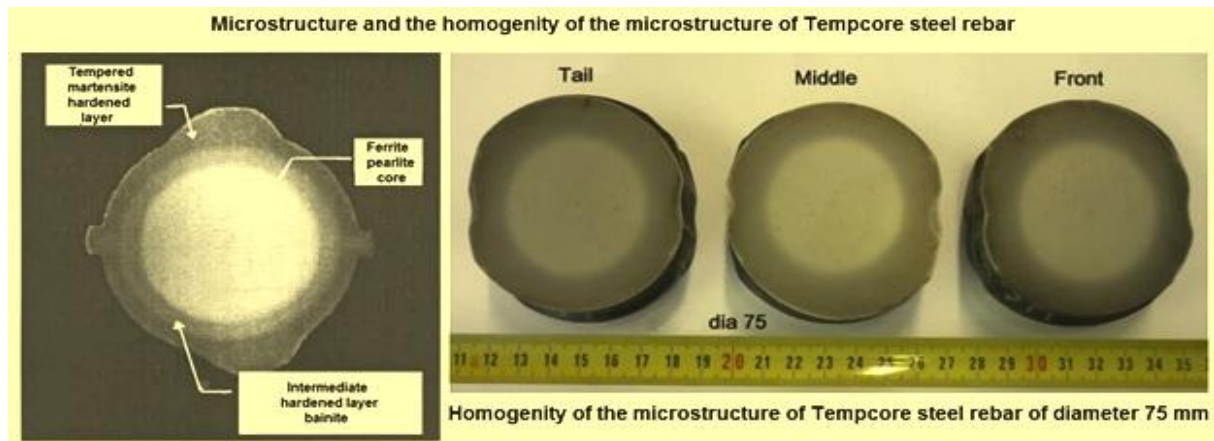


Figure I.5 : Microstructure et homogénéité de la microstructure des barres d'armature en acier TEMPCORE.

I.5.3. Effets des paramètres du procédé et de la composition de l'acier :

Naturellement, si la couche de martensite est plus épaisse, la chaleur retenue est moindre et donc la trempe est plus modeste de sorte que la barre présente une limite d'élasticité plus élevée et plus faible élongation.

Les paramètres du procédé et les compositions de l'acier jouent un rôle dans les propriétés finales. Normalement, si la couche de martensite est plus épaisse, la chaleur retenue est moindre et donc le revenu est plus modeste de sorte que l'armature présente une limite élastique plus élevée et un allongement plus faible.

Un temps de trempe plus long, une température de finition plus basse et une intensité de trempe plus élevée entraînent une couche martensitique plus épaisse et une température de revenu plus basse. Une teneur plus élevée en carbone et en manganèse augmente la trempabilité de l'acier, et donc plus de martensite se forme. De plus, la résistance de la martensite trempée augmente à mesure que la teneur en carbone augmente.

I.5.4. Propriétés de traction :

Le procédé TEMPCORE peut augmenter la limite d'élasticité pour une composition donnée de 150 MPa à 200 MPa sans perdre beaucoup d'allongement. Les propriétés de traction des barres dépendent des paramètres du procédé et de la composition de l'acier.

La plage de limite d'élasticité typique des barres d'armature en acier TEMPCORE est comprise entre 415 MPa et 550 MPa et l'allongement sur une longueur de jauge 5d est de 30% à 25% dans le même ordre. Les caractéristiques de la courbe de déformation sous contrainte typique montrent que :

- ✓ le module élastique est de 200 000 MPa,
- ✓ le rapport de la limite d'élasticité à la résistance à la traction est d'environ 0,85,
- ✓ la barre a un allongement important (25% à 30%), une grande déformation uniforme.

Les barres d'armature en acier TEMPCORE ont deux caractéristiques principales lorsque les propriétés de traction sont comparées à celles des barres d'acier conventionnelles. Ces caractéristiques sont :

- ✓ Un rapport plus élevé de la limite d'élasticité à la résistance à la traction, 0,85 contre 0,65 dans le cas d'une barre conventionnelle,
- ✓ Un allongement plus important, 25% contre 4,5% à 22% dans le cas d'une barre d'acier conventionnelle.

I.5.5. Formabilité :

Une autre propriété remarquable de l'acier d'armature TEMPCORE est qu'il a d'excellentes propriétés de flexion. Malgré la couche extérieure durcie, le diamètre de pliage minimal pour un pli simple à 180 degrés est spécifié comme 1d pour les barres de 12 mm à 28 mm de diamètre et 2d pour les barres de 32 mm et 36 mm de diamètre.

Certaines barres d'armature TEMPCORE (20 mm et 28 mm de diamètre) peuvent même être pliées sans mandrin. Les barres peuvent également résister à tous les tests de flexion et de flexion après vieillissement, répondant aux exigences standard.

En outre, l'opération de pliage nécessite moins d'énergie par rapport à d'autres types de barres d'armature en raison du faible rapport résistance à la traction / limite d'élasticité. On estime que 10% à 20% d'énergie est économisée en flexion.

La comparaison des propriétés de flexion des barres d'armature TEMPCORE avec des barres en acier conventionnelles est donnée dans le tableau I.3.

Tableau I.3 : Comparaison des propriétés de flexion des armatures en acier TEMPCORE avec des barres en acier conventionnelles

	Test de pliage	Valeurs D typiques	
		Aciers conventionnels (CE = 0,61%)	Barres en acier TEMPCORE (CE = 0,30%)
1	180 degrés de flexion	3	0,5
2	Flexion à 90 degrés et recourbement après vieillissement	6	3.2
3	Pliage à 90 degrés après soudage électrique bout à bout	15	4
4	Pliage à 90 degrés après soudage électrique croisé	Supérieur à 20	7

Remarque: La pliabilité est exprimée en termes de diamètre de pliage minimal D. (D est le rapport du diamètre de pliage minimal possible au diamètre des barres d'armature

I.5.6. Soudabilité :

La soudabilité de l'acier est très sensible à la composition chimique, en particulier à la teneur en carbone et à l'équivalent carbone (CE).

L'excellente soudabilité des barres d'armature en acier TEMPCORE est bien démontrée par le test de pliage sur une soudure croisée (Figure I.6). Il n'y a aucun signe de fissuration dans la soudure d'une barre de 20 mm de diamètre lorsqu'elle est courbée à un angle de 180 degrés sur un mandrin 3D. Les barres d'armature en acier TEMPCORE à basse température et / ou à l'état humide présentent une soudabilité remarquable. Aucun préchauffage et aucun post-chauffage n'est nécessaire.

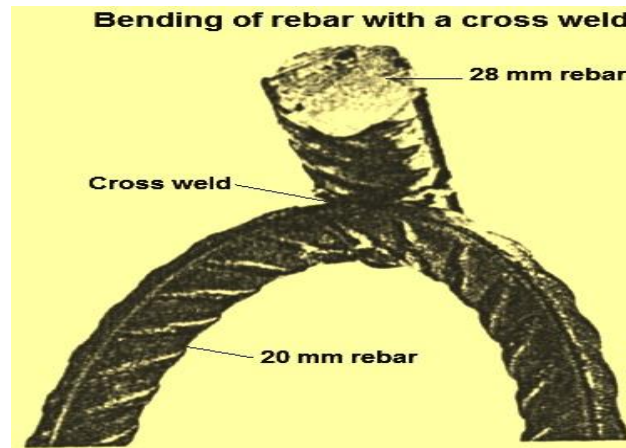


Figure I.6 : Cintrage de l'armature TEMPCORE avec une soudure croisée

I.5.7. Ténacité :

Les barres d'armature en acier TEMPCORE présentent une bonne ténacité à basse température, une sensibilité moindre aux dommages de surface, et la résistance à la fatigue et la sensibilité à la chaleur sont également très compétitives. Il a été démontré qu'à -60 C° , une barre d'armature de 20 mm de diamètre avec une coupe profonde de 1 mm absorbait 190 calories dans le test de chute de poids sans se casser. Les tests de chute de poids sur l'arc endommagé à 12 mm, 16 mm et 20 mm de diamètre Les barres d'armature en acier TEMPCORE montrent qu'il n'y a pas de rupture à -75 C° . De même, les barres endommagées par l'entaille et vieilles sous contrainte survivent dans le test de chute de poids à -60 C° .

I.5.8. Résistance à la fatigue :

Un nombre limité d'essais de fatigue ont été effectués sur les barres d'armature en acier TEMPCORE. Ces tests indiquent que les propriétés de fatigue des armatures en acier TEMPCORE répondent aux exigences des normes. Un essai de fatigue effectué sur des barres d'armature en acier TEMPCORE de 12 mm de diamètre a montré des propriétés de fatigue supérieures aux barres usinées à froid. Des recherches ont également été menées sur les propriétés de fatigue des armatures en acier TEMPCORE avec un intérêt pour les effets de la galvanisation. Tous les résultats des tests suggèrent que la résistance à la fatigue des barres d'armature en acier TEMPCORE est aussi bonne que celle d'autres types de barres d'armature en acier avec une limite d'élasticité équivalente.

I.5.9. Résistance thermique :

Les propriétés de résistance à la chaleur des barres d'armature en acier TEMPCORE sont importantes en raison de la possibilité de dommages par le feu.

Cette résistance a été évaluée de deux manières, à savoir :

- ✓ la perte de résistance à la traction à température ambiante après l'application de chaleur précédente,
- ✓ la perte de résistance à la traction à température élevée.

Il a été démontré qu'après chauffage dans des conditions de laboratoire à des températures comprises entre 250 C° et 900 C° pendant une demi-heure, la résistance à la traction à température ambiante augmente légèrement avec le préchauffage jusqu'à 500 C° et une baisse importante se produit au-dessus de cette température. Cette propriété est aussi bonne que les armatures torsadées à froid et meilleure que celles illustrées par certaines barres laminées à chaud. Les barres d'armature usinées à froid commencent à perdre de leur résistance entre 300 C° et 400 C°.

Conclusion :

La technologie TEMPCORE l'une des méthodes de production d'acier les plus efficaces a été développée par CRM GROUP, Belgique au début des années 70. Cette technologie produit des barres d'armature de haute qualité jusqu'à 75 mm de diamètre avec une flexibilité et une ductilité supérieures. Hautement soudable et fournissant des barres de renforcement en acier doux utilisant de l'eau au lieu d'ajouter des éléments d'alliage coûteux comme le vanadium, etc., ce qui est économiquement avantageux pour l'entreprise de fabrication. Ainsi, ils peuvent vous fournir des produits en acier de haute qualité à un taux inférieur.

Avantages des produits TEMPCORE :

1. Maintient une résistance et une durabilité élevées dans toutes les conditions thermiques, qu'elles soient très élevées ou très faibles.
2. Entièrement maniable.
3. Économique en raison du faible coût de fabrication.
4. Propriété de résistance sismique élevée.
5. Très ductile et élastique en raison de la nature de son noyau.

CHAPITRE II :
Caractéristiques des barres d'armature

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES BARRES D'ARMATURE

Introduction :

Les propriétés mécaniques des barres d'armature en acier jouent un rôle important dans la vie des structures de bâtiment telles que les gratte-ciel et les ponts. La force et la durabilité des structures en béton armé dépendent d'une grande mesure de certaines propriétés des barres d'armature telles que la résistance à la traction, la flexion, la fatigue, la soudabilité et la ductilité [16].

L'acier présente un large éventail de caractéristiques mécaniques dont le facteur de résistance est la propriété dominante. La résistance mécanique est évaluée en termes de résistance ultime à la traction, module d'élasticité (E), pourcentage d'allongement et résistance aux chocs. Ainsi, toute augmentation des caractéristiques de résistance l'acier améliorera la fiabilité et la durabilité de la structure dans laquelle il est utilisé.

Les caractéristiques de faible résistance entraînent souvent une courte durée de vie de la structure, indésirable déviation et même effondrement. Le comportement ductile du béton armé les structures sont fortement influencées par les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour leur renforcement. En particulier, l'allongement total à la force maximale A_{gt} , et le rapport d'écrouissage K , de l'acier jouent un rôle décisif dans la détermination de la dissipation capacité des sections en béton armé et des éléments de structure [17].

Les barres sont fabriquées par coulée et / ou laminage à partir de billettes ou de lingots dans des usines par fusion de minerai de fer ou de chutes d'acier. Les barres sont ensuite nervurées à chaud ou tordu à froid.

II.1.Généralité sur le rond à béton :

II.1.1.Définition de rond à béton :

Les Ronds à béton ou " armatures pour béton armé " sont des ronds lisses ou crénelés destinés à la fabrication d'armatures pour béton.

Les aciers pour béton armé sont fabriqués à partir d'acier généralement élaboré dans des fours électriques à partir de ferrailles de récupération. Les billettes (demi-produit de section carrée de 100 à 200 cm²) coulées en continu sont ensuite laminées à chaud pour obtenir des barres et des couronnes, celles-ci pouvant être étirées à froid.

Les ronds à béton sont des aciers à haute adhérence dont la surface présente des saillies ou des creux. La surface de ces armatures présente des aspérités en saillies inclinées

par rapport à l'axe de la barre appelée verrous ou des aspérités en creux appelées empreintes qui sont destinées à favoriser l'adhérence des armatures au sein du béton. La résistance d'un élément en béton armé et la maîtrise de la fissuration supposent que l'acier ne puisse pas glisser à l'intérieur du béton, c'est-à-dire qu'il y ait adhérence parfaite entre les deux matériaux [18].

II.1.2. Utilité de rond à béton :

Pour comprendre l'utilité du rond a béton, il est bon de rappeler quelques points. Le béton est un matériau résistant à la compression mais ne supportant pas la traction. L'acier, quant à lui, est un matériau résistant à la fois à la traction et à la compression. C'est le mélange de ces deux matériaux qui donne ce qu'on nomme le béton armé. Par définition, le rond a béton est un matériau dans lequel des armatures métalliques ont été ajoutées afin d'obtenir un béton renforcé. La fusion des matériaux permet au béton armé d'être à la fois résistant à la compression ainsi qu'à la traction. Ce béton amélioré est fréquemment utilisé dans les ouvrages de génie civil.

II.1.3. But d'utilisation de rond à béton :

Lorsqu'une poutre en béton non armé est soumise à une sollicitation de flexion (figure II.1), on constate rapidement l'apparition de fissures importantes dans la zone inférieure de la poutre.

Les contraintes de traction développées dans la zone tendue de la poutre sont trop importantes et le béton rompt.

Par ailleurs le béton résiste parfaitement aux contraintes de compression développées dans la zone supérieure de la poutre.

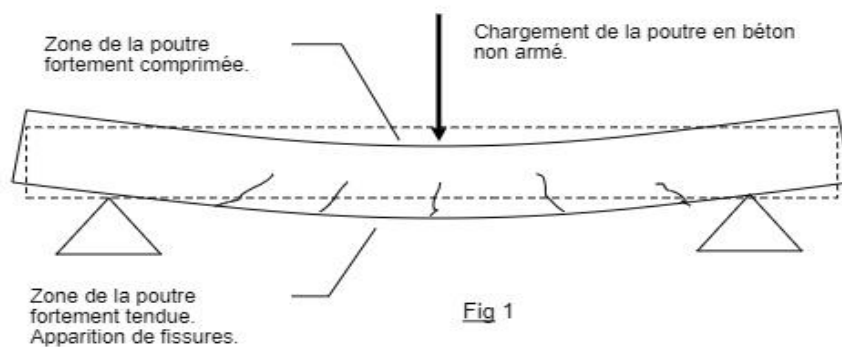


Figure II.1 : Poutre en béton non armé

La solution consiste à renforcer la partie tendue de la poutre par des armatures capables de supporter les contraintes de traction présentes (figure II.2).

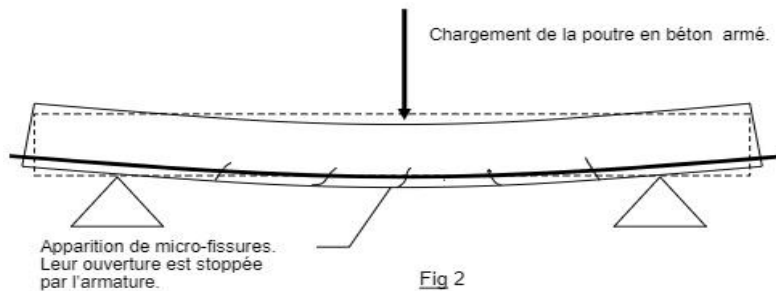


Figure II.2 : Poutre en béton armé

Cette association du béton et de l'armature ne peut fonctionner que s'il existe une parfaite adhérence entre les deux matériaux. Si l'armature est lisse et graissée, la poutre se comporte comme une poutre de béton seul.

Le béton armé est donc utilisé pour les ouvrages où le béton devra être résistant à la traction. Les aciers sont placés dans la zone où le béton sera confronté à un effort de traction, soit dans la partie inférieure.

Pour que le béton armé soit réellement efficace, il doit y avoir une réelle cohésion entre le béton et l'acier. Pour cela, l'acier doit être pourvu d'aspérités à sa surface afin de renforcer l'adhérence entre les deux matériaux [19].

II.1.4. Usage de rond à béton : [20]

Le béton armé est utilisé pour les ouvrages demandant une résistance élevée à la traction :

- Dalles : Les dalles en béton armé sont souvent constituées de treillis soudés déposés dans la partie inférieure de la dalle.
- Poteaux : Les poteaux sont armés par des armatures transversales et longitudinales installées afin de stabiliser la structure.
- Poutres : Les poutres sont renforcées par des armatures longitudinales ayant pour but de redonner au béton sa forme initiale après un effort de traction.
- Voiles
- Fondations

II.2. Evolution des armatures pour béton armé :

Aux premières heures du béton armé, les armatures étaient de simples tiges lisses de « fers à béton » de section circulaire dont la limite d'élasticité était habituellement comprise entre 215 et 235 MPa. En effet, les ingénieurs ont cherché à employer des aciers de limite d'élasticité plus élevée afin de réduire les sections d'armatures.

Cependant, le fonctionnement du béton armé suppose une « association » entre l'acier et le béton qui met en jeu l'adhérence des armatures au béton. Pour utiliser pleinement des aciers plus performants, il faut donc aussi que leur adhérence soit améliorée. On a par conséquent évolué vers des aciers qui sont à la fois à Haute Limite d'Élasticité (HLE) et à Haute Adhérence (HA). La haute adhérence résulte de la création d'aspérités en saillie ou en creux. Les aspérités en saillie inclinées par rapport à l'axe de la barre sont appelées « verrous ». Les aspérités en creux sont appelées « empreintes ».

Les aciers pour béton armé sont désignés par leur limite d'élasticité E (en MPa), leur nuance (doux, mi-dur, dur) et leur forme (lisse, haute adhérence). L'acier couramment utilisé dans le bâtiment est de désignation HA Fe E 500, soit un acier à haute adhérence (HA) présentant une limite élastique de 500 MPa [21].

La haute limite d'élasticité peut être obtenue par différents moyens:

- ✓ en jouant sur la composition chimique, en particulier en augmentant la teneur en carbone. Ce type d'acier présente des inconvénients notamment dans les domaines de l'aptitude au façonnage et au soudage. Il est maintenant abandonné en Europe;
- ✓ par écrouissage, par étirage et ou laminage à froid de barres ou fils d'acier doux;
- ✓ par traitement thermique (trempe et auto revenu) de barres ou fils d'acier doux.

II.3. Technologies utilisées dans la production des barres d'armature en acier :

La production des barres d'armature à haut rendement de qualité continue de bénéficier des chercheurs du monde entier.

En règle générale, les méthodes de production de barres d'armature en acier de hautes qualités classées en trois (3) catégories distinctes [22]:

- Barres d'acier d'armature produites par la technique de microalliage. Pour ces bars, la limite d'élasticité peut être augmentée en modifiant la composition chimique.

Ce sont généralement des barres nervurées.

- Renforcement des barres torsadées soumises à un écrouissage après laminage à chaud, pour par exemple par déformation à froid. Cette méthode permet la production de barres d'armature soudables en acier à faible teneur en carbone et en manganèse, mais cela conduit à une diminution de la ductilité et du diagramme contrainte-déformation sans rendement plateau.
- Barres d'acier d'armature produites par traitement thermo-mécanique (TMT) technique communément connue sous le nom de barres en acier trempé. Ce sont des barres nervurées alliées.

Les deux premiers procédés conventionnels largement utilisés ci-dessus présentent certains inconvénients d'avoir une faible ductilité en cas de barres torsadées et le coût d'ajout de micro-alliage dans le cas de barres nervurées. Ces inconvénients sont surmontés par le Processus de traitement thermomécanique (TMT), communément appelé TEMPCORE processus, qui est le processus de fabrication de l'acier trempé.

Le procédé TMT consiste à refroidir la barre d'acier d'armature par de l'eau sous pression émerge du stand de finition à une vitesse de refroidissement supérieure à $200 \text{ }^\circ\text{C} / \text{s}$ à l'intérieur d'une Installation de refroidissement par eau Thermex afin qu'une fine couche de martensite d'environ 4 mm des formes épaisses à la surface d'un diamètre de barre de 32 mm tandis que le noyau de la barre est encore austénite [23]. En sortant de l'unité Thermex, la barre peut se refroidir dans l'air calme illustré à la figure II.3.

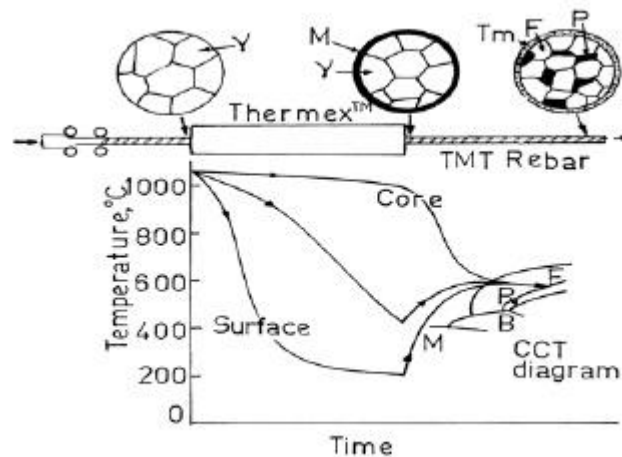


Figure II.3: Diagramme schématisé du processus TMT de renforcement de l'acier barre [24]

Le processus TEMPCORE a été largement accepté car il a la capacité de séparer les propriétés mécaniques requises du produit en acier en tant que condition laminée et élimine donc les coûts associés à la torsion ou à l'ajout de microalliages. Ce processus aboutit à un fer d'armature qui remplit les caractéristiques requises, c.-à-d. haute résistance avec un plateau

élastique, bonne soudabilité, flexibilité et ductilité. Il a été démontré par de nombreux chercheurs que les fils enroulés et l'acier des barres d'armature après refroidissement ont une structure en martensite sur la surface extérieure et de la perlite-ferrite dans le noyau.

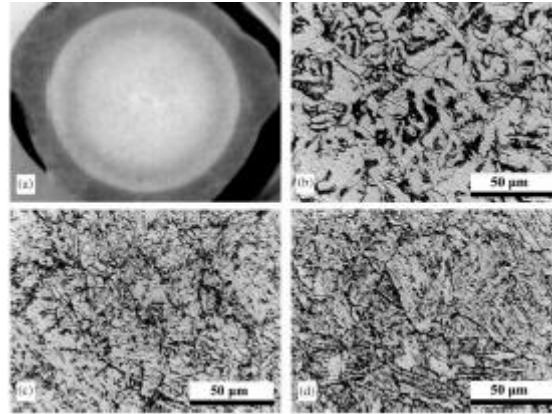


Figure II.4: (a) Coupe transversale typique d'une barre TEMPCORE et micrographies optiques du (b) noyau, (c) de la couche intermédiaire et (d) couche auto-trempée extérieure durcie [25]

II.4. Différence entre les barres TMT et les barres d'armature torsadées :

Les barres TMT et les barres CTD (déformées à froid) sont différentes dans leur fabrication, bien que les deux soient des barres de renforcement à haute résistance. Les barres d'armature torsadées sont essentiellement réalisées avec un processus technologique plus ancien de torsion à froid, tandis que les barres TMT utilisent la technologie moderne de torsion à chaud. Voici quelques détails qui pourraient vous aider à mieux comprendre le processus.

II.4.1. Barres TMT:

Le traitement des barres TMT se fait en 3 étapes: trempe, trempe automatique et refroidissement atmosphérique. Au cours de ce processus, les barres d'acier reçoivent un refroidissement court et intensif lorsqu'elles traversent le système de refroidissement à eau TEMPCORE spécialement résigné après le dernier stand de laminoir. La trempe soudaine convertit la couche superficielle de la barre d'acier en une structure durcie. De plus, comme il n'y a pas de torsion pendant ce processus, les contraintes de torsion ne créent aucun défaut de surface, ce qui rend les barres TMT plus résistantes à la corrosion. Les barres d'armature TMT font partie intégrante de chaque projet de construction. Pendant la construction, les barres d'armature TMT et le béton se complètent de manière à ce que la structure en béton armé de ciment (RCC) puisse être moulée dans la forme souhaitée, les barres d'armature fournissant la résistance à la traction requise pour résister à la charge.

II.4.2. Barres CTD:

Pendant la fabrication, les barres sont maintenues au refroidissement naturel et torsadées à température ambiante. En raison de ce processus, les grains à l'intérieur de la barre se transforment en cristal, ce qui fournit la force requise. Ce type de barres présente également quelques inconvénients. Le processus de torsion a un effet négatif sur la ductilité de l'acier. En outre, il brise l'oxyde bleu protecteur, laissant la barre CTD ouverte à la corrosion. Les tiges CTD sont appelées déformées torsadées à froid. La méthode de torsion des tiges augmente généralement la résistance à la traction des tiges. Une fois les tiges d'acier refroidies, la torsion est effectuée. Ici, à ce moment, les fibres les plus hautes et les plus hautes se cassent pendant qu'elles sont tordues, ce qui se traduit par la formation de microfissures sur la surface des tiges d'acier finies. Si ces fissures sont soigneusement observées au microscope, la largeur des fissures se situe davantage au niveau de la fibre la plus haute et diminue progressivement lorsqu'elle pénètre plus profondément dans la section. Ces fissures reçoivent de l'eau ou des molécules d'eau nocives pour l'acier ou peuvent être la principale cause de rouille. Par conséquent, l'utilisation de tiges CTD n'est pas recommandée [26].

Tableau II.1 : Comparaison des propriétés des barres d'armature réalisées à l'aide de diverses technologies [27]

Technologie utilisée	Traitement	Coût	Propriétés mécaniques	
			Plasticité (élongation)	Soudabilité
Processus de contrôle Thermomécanique (TEMPCORE).	Refroidissement rapide et contrôle de processus, refroidissement dans la température de roulement	Faible	Excellent	Faible teneur en carbone équivalent, très bon soudabilité
Laminage à chaud	Ajout des éléments d'alliage : C, Mn, V, Nb etc.	Haut	Haut	Haute teneur en carbone équivalent, soudabilité limité
Durcissement à froid	Filtrage à froid	Haut	Faible	bonne soudabilité

II.5. Techniques utilisées pour la caractérisation des barres d'armature :

II.5.1. Essai de traction:

Une façon simple de caractériser le comportement d'un acier est d'effectuer un essai de traction. La notion de résistance traduit à la fois la notion de résistance à la déformation (limite élastique= R_e) et la notion de résistance à la rupture en traction (R_m).

L'essai consiste à étirer un échantillon de métal appelé éprouvette, d'en mesurer son point de limite élastique et son allongement jusqu'à sa rupture.

Quand on étire un acier, on entre d'abord dans sa zone élastique : le métal peut revenir à ses dimensions primitives. Puis, on atteint le point de la limite élastique (R_e). Au-delà, le métal se déforme, s'écrouit, des microfissures apparaissent: l'allongement cesse d'être temporaire et devient permanent. Le métal est écroui, il est dans la zone dite de plasticité. Commence alors le phénomène de striction Z (diminution du diamètre de l'éprouvette) pour aboutir à la rupture de l'éprouvette [28].

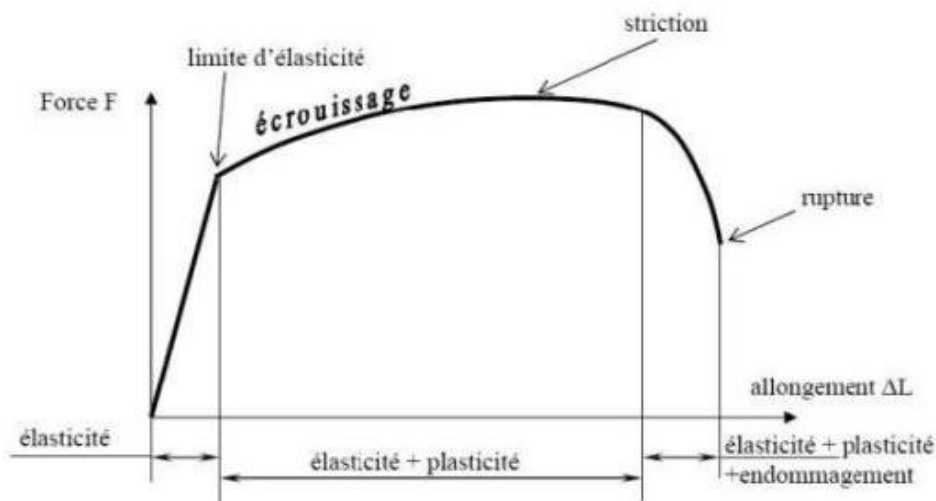


Figure II.5 : Courbe de traction



Figure II.6: Machine de traction

Cet essai prend de l'importance notamment pour les aciers de constructions (poutres, poutrelles...) soumis à de nombreuses sollicitations simples ou composées (flexion, torsion, traction, compression, température, vent...). Des microfissures peuvent apparaître, notamment en raison de défauts de surface (inclusions métalliques, piqûres de rouille, fissurations intergranulaires...) ou d'accidents d'usinage (entailles). Ces amorces de microfissures peuvent se propager plus ou moins vite en fonction de la microstructure du métal et réduisent la résistance à la fatigue de l'acier jusqu'à pouvoir entraîner sa rupture.

Cet essai permet de mesurer :

- la ductilité de l'acier, c'est-à-dire sa capacité à se déformer avant qu'il ne rompe.
- la limite élastique (R_e) qui représente le point à partir duquel la pièce est déformée de manière permanente.
- l'allongement à la rupture ($A\%$), l'allongement maximal admissible avant rupture.

Ainsi, l'essai de traction donne plusieurs valeurs très utiles pour l'utilisateur :

-le module de Young E , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en méga-pascals (MPa) ou giga pascals

-la limite élastique (R_e)

-la résistance à la traction R_m qui définit la limite à la rupture

-la striction Z

-l'allongement à la rupture A

Tableau II.2 : Propriétés d'après la grandeur.

Grandeur	Propriété
E : module de Young	Souplesse/rigidité. Souple, si E est faible. Rigidité si E est élevé
R_e : Limite élastique	Dureté. Mou, si R_e est faible. Dur, si R_e est élevé
A : Allongement à la rupture	Ductilité, malléabilité. Fragile, si A est faible. Ductile et malléable, si A est élevé

II.5.2. Essai de pliage:

Il permet d'apprécier la ductilité de l'acier et son aptitude au formage à froid. Il consiste à imposer à un échantillon de métal, dans des conditions spécifiées, un pliage jusqu'à un angle requis (en général 180°). On inspecte ensuite les tranches et surtout la face en extension. Pour une bonne aptitude au pliage à froid la face en extension ne doit pas en principe présenter de fissures, gerçures, ni déchirures [29].

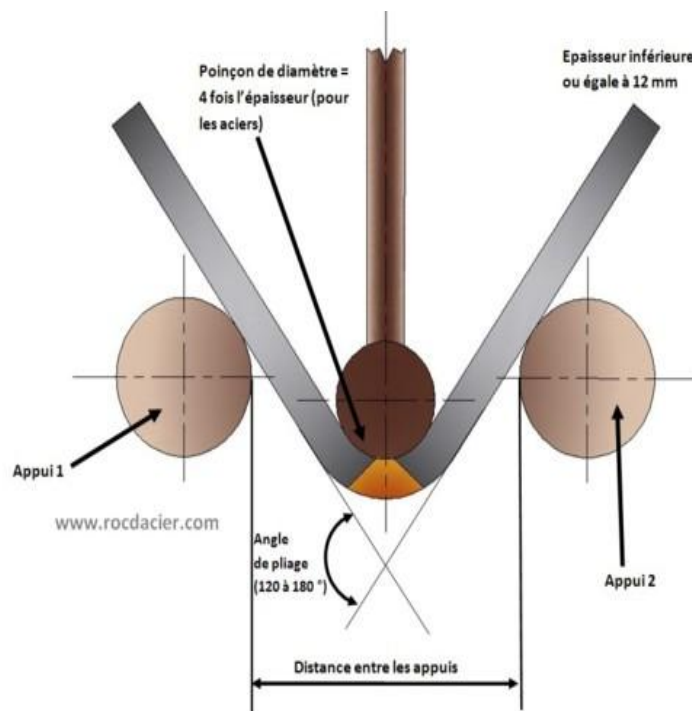


Figure II.7 : Principe de l'essai de pliage

II.5.3. Essai de dureté :

L'essai de dureté est un test mécanique des propriétés des matériaux utilisés dans la conception technique, l'analyse des structures et le développement des matériaux. L'objectif principal de l'essai de dureté est de déterminer l'aptitude d'un matériau pour une application donnée, ou le traitement particulier auquel le matériau a été soumis. La dureté est définie comme la résistance d'un matériau à la déformation permanente telle que l'indentation, l'usure, l'abrasion, la rayure. Principalement, l'importance des essais de dureté a à voir avec la relation entre la dureté et d'autres propriétés du matériau. Par exemple, l'essai de dureté et l'essai de traction mesurent la résistance d'un métal à l'écoulement plastique, et les résultats de ces tests peuvent être très proches les uns des autres. Le test de dureté est préféré car il est simple, facile et relativement non destructif.

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

Les essais de dureté peuvent être réalisés à l'aide de plusieurs appareils de mesure. La principale différence entre les divers essais réside dans la forme de la pointe [30].

II.6. Propriétés des barres d'armature :

Les barres d'armature en acier est produit à partir d'acier fondu, en le transformant en grandes billettes rectangulaires puis en le faisant passer à travers une série de matrices, qui façonnent l'acier en barres d'armature. Pendant le processus de formage, des déformations se forment à la surface des barres qui sont utilisées pour aider au transfert des charges entre le béton et l'acier d'armature. Il n'a pas besoin d'être directement attaché au coffrage et ne flotte pas dans le béton [31].

Les propriétés généralement demandées aux armatures doivent répondre à des exigences particulières précisées dans des normes. Actuellement, dans la pratique de la production de l'acier à béton, on tend à substituer différentes nuances d'armature par l'armature unifié ayant la valeur de limite d'élasticité minimale de 500 MPa. Il existe, généralement, plusieurs techniques de fabrication, y compris la déformation à chaud suivie d'un refroidissement accéléré sous flux d'eau, ainsi que la déformation à froid [32].

II.6.1. Exigences de propriété des barres d'armature :

La résistance ainsi que la ductilité, la soudabilité et la formabilité sont les exigences de qualité les plus essentielles des barres d'armature. Ainsi, la limite d'élasticité, ainsi que la résistance à la traction, est la première exigence pour l'acier d'armature dans les normes et la nuance de l'acier est classée selon la limite d'élasticité minimale spécifiée.

L'utilisation des barres d'armature en acier de qualité supérieure est économique car moins d'acier est nécessaire pour les mêmes conditions de chargement, et le coût total est réduit. Lorsque la limite d'élasticité garantie des barres d'armature est augmentée, le poids des barres d'armature à utiliser pour une construction civile donnée est réduit et, par conséquent, les coûts de renforcement sont réduits. Cette réduction de quantité réduit également les coûts de transport, de manutention et de fixation des barres lors de la construction civile.

Dans de nombreuses techniques d'assemblage de barres d'armature sur le chantier, le soudage des barres d'armature est une nécessité pour garantir la précision dimensionnelle requise. Dans de nombreux cas, les connexions liées ne sont pas assez solides tandis que les épissures mécaniques ne sont pas toujours applicables. Pour ces raisons, le soudage devient une exigence et une quantité considérable de soudage sur place à lieu. Par conséquent, la soudabilité des barres d'armature est également une préoccupation majeure. Il est bien connu que la soudabilité des barres d'armature nécessite une faible teneur en carbone (environ 0,25%) et un faible équivalent carbone (environ 0,45%) dans les aciers.

Une autre propriété importante est la capacité de flexion. Les barres d'armature présentant une bonne capacité de flexion permettent l'utilisation d'une conception optimale et, par conséquent, entraînent une réduction supplémentaire des coûts. En cas de présence de renforts de liaison nécessite une bonne capacité de rebondissement. En fait, certaines normes prescrivent que les barres d'armature doivent réussir des opérations de pliage et de pliage, et ce sur des mandrins de petit diamètre (jusqu'à 3 ou 4 fois le diamètre des barres d'armature) ou par temps froid (- 20 ° C).

Un autre aspect important pour la sécurité des constructions en béton est d'empêcher la perte de ductilité après le recourbement. Cela souligne à nouveau la nécessité d'une bonne capacité de recourbement. De plus, l'utilisation de barres d'armature à haute limite d'élasticité peut également permettre une réduction de la largeur des poutres principales ou de la taille des colonnes dans les immeubles de grande hauteur, ce qui peut ainsi réduire le coût du béton et de la manutention.

Une ductilité adéquate est nécessaire pendant la fabrication pour des raisons de sécurité. Ceci est particulièrement important pour les structures où la possibilité de tremblements de terre fait partie de la considération de conception. Du point de vue de la fabrication, où se produisent le pliage et le recourbement des barres d'armature, une bonne ductilité est très importante. Le souci de ductilité se retrouve dans toutes les normes.

Les autres exigences incluent la résistance à la fatigue, les propriétés à hautes et basses températures, les propriétés aux chocs, la résistance à la corrosion, mais celles-ci ne sont généralement pas spécifiées par diverses normes nationales, bien que la préoccupation augmente [33].

Par conséquent, on peut voir que du point de vue des barres d'armature et du point de vue des utilisateurs, les propriétés importantes que les barres d'armature doivent avoir sont :

- ✓ une haute limite élastique,
- ✓ une bonne soudabilité,
- ✓ une bonne flexion et la capacité de renouvellement,
- ✓ la ductilité.

II.6.2. Propriétés mécaniques des barres d'armature en acier :

Bien que la résistance à la traction de la barre d'acier soit considérée comme la plus propriété spécifique, elle fait partie d'une gamme de propriétés qui déterminent la capacité de l'acier à être utilisé efficacement et en toute sécurité dans toutes les conditions. En plus de la résistance à la traction qui confère de la résistance à la structure en béton armé, d'autres propriétés importantes inclure [34]:

- Performance d'adhérence: Pour permettre à l'unité de béton de posséder des propriétés de traction. Le béton non armé étant généralement fragile, la présence d'acier dans le béton améliorera les propriétés de traction.
- Ductilité et formabilité: pour assurer l'intégrité structurelle en présence de fissuration et permettre à l'acier de se plier sur de petits rayons avec une réponse précise.
- Performance en fatigue: pour permettre à la structure de supporter une charge cyclique provoquer un tel vent et tremblement de terre.
- Soudabilité: pour permettre l'assemblage de barres.

II.6.2.1. Résistance à la traction des barres d'armature en acier :

Les deux caractéristiques importantes qui déterminent le caractère de l'armature sont la limite élastique et le module d'élasticité des barres d'acier d'armature. En général, le module d'élasticité de l'acier est pris égal à $200 \text{ kN} / \text{mm}^2$.

De plus, la forme de la courbe contrainte-déformation de l'essai de traction de l'acier a une influence sur les performances des éléments en béton armé [34].

La relation contrainte-déformation est linéaire jusqu'au point limite (voir figure II.8) pour barres d'acier d'armature à trempe automatique où R_e et R_m sont des contraintes d'élasticité et de résistance respectivement.

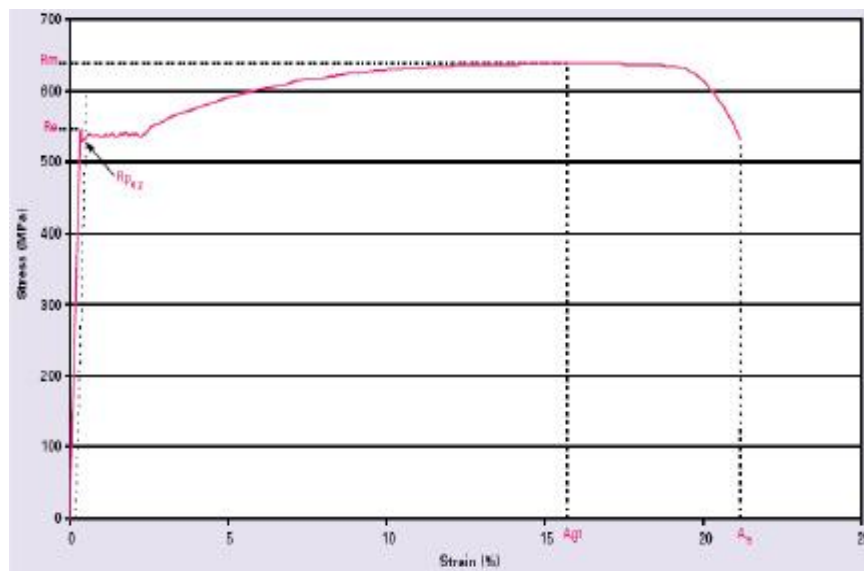


Figure II.8 : Courbe contrainte-déformation d'une barre d'acier d'armature nervurée [35]

Le processus de travail à froid implique l'étirement et la torsion de l'acier doux au-delà son plateau de rendement, puis relâcher la charge comme indiqué par la ligne mince dans la figure II.9 . Le produit final est la barre déformée torsadée à froid (CTD) familière.

Bien que l'étirement et la torsion à froid entraînent une déformation résiduelle dans l'acier, il se traduit par une résistance à l'épreuve accrue. Au rechargement, l'acier suit une trajectoire linéaire chemin élastique (avec le même module d'élasticité E , que l'acier doux d'origine).

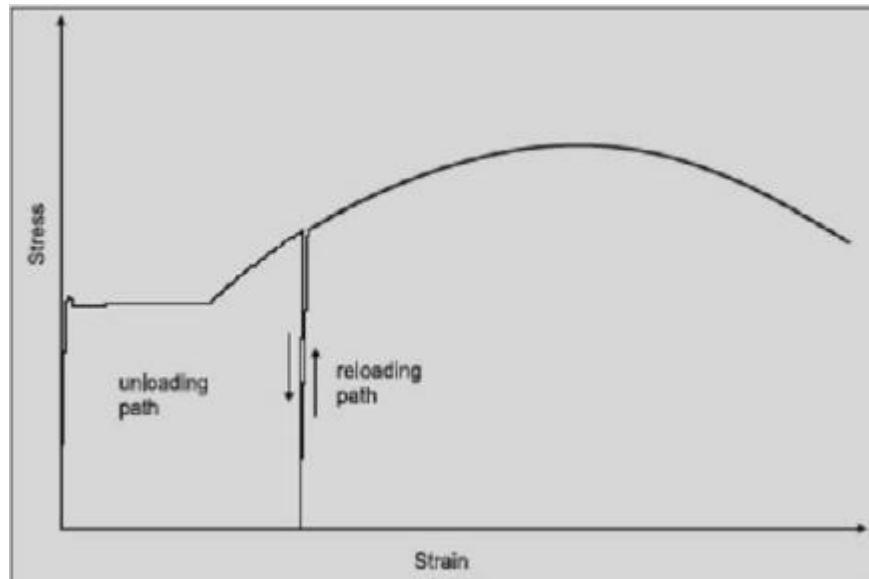


Figure II.9 : Effet du travail à froid sur les barres d'armature en acier [36]

Au point où le déchargement a commencé (le nouveau seuil de rendement élevé). Ce point de rendement n'est pas susceptible d'être bien défini si le point de déchargement se situe au-delà du rendement plateau de la barre en acier doux. Après le point limite, comme le montre la figure II.9, le matériau entre dans la plage de durcissement sous contrainte suivant le chemin indiqué par la ligne épaisse de la figure II. 9. Il convient de noter que, bien que le processus de travail à froid augmente efficacement la résistance à l'épreuve de l'acier, il réduit également la ductilité dans le matériau [36].

Après avoir subi une opération de torsion, la barre se comportera comme illustré à la figure II.10 et il n'a pas de plateau de rendement par rapport à l'acier d'armature trempé / nervuré barre.

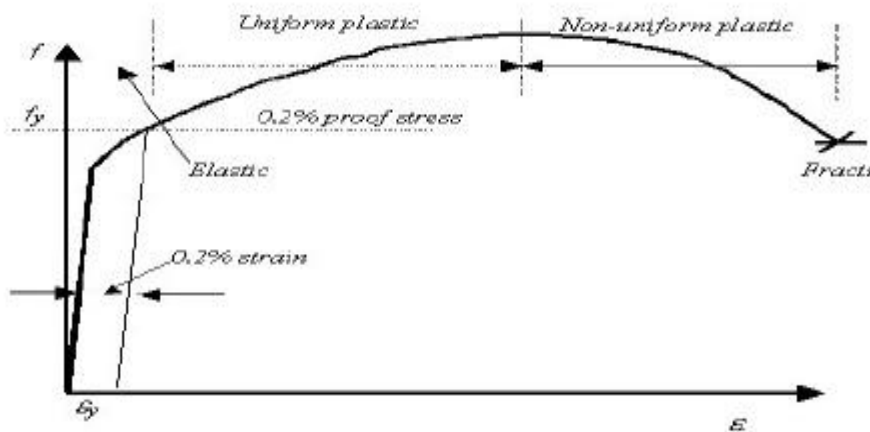


Figure II.10: Courbe contrainte-déformation d'une barre d'acier d'armature torsadée [36]

II.6.2.2. Ductilité des barres d'armature en acier :

La ductilité peut être déterminée par un essai de traction ou de flexion; plus le pourcentage d'allongement est élevé, plus le matériau devient ductile.

La durée de vie, la résistance et la ductilité des structures en béton dépendent dans une large mesure sur certaines propriétés des barres d'armature telles que le module d'élasticité, le rendement Contrainte, contrainte ultime et allongement. Les valeurs sont contrôlées en pratique par les spécifications de normes internationales telles que l'American Society of Testing Materials (ASTM). La plupart des armatures doivent être pliées avant d'être installées dans un Structure en béton. Parce que ce sont des aciers à haute résistance, et parce que les nervures sur la surface de la barre agissent comme des concentrateurs de contraintes, les aciers de renforcement peuvent se rompre en flexion si le rayon de courbure est trop serré. La présence de fissure en flexion le test révèle que le matériau est cassant, donc la ductilité est

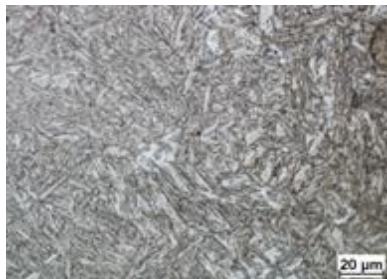
faible. Le test de flexion prédit la ductilité de la barre d'acier d'armature. Le spécimen est soumis à la séquence d'opérations prescrite et ne doit montrer aucun signe de fissure ou de rupture [37].

II.6.3. Propriétés Microstructurales des barres d'armature:

Selon la composition chimique, la microstructure de l'acier utilisé pour fabriquer des barres d'armature en béton contiennent de la ferrite, de la bainite, de la martensite ou leurs mélanges.

La microstructure des barres laminées à chaud est le mélange de ferrite et de perlite.

En relation avec des cycles de refroidissement strictement spécifiés, les procédures de durcissement thermique impliquant sur les barres en acier caractérisées par un rendement élevé sont responsables de la formation d'un réseau diversifié microstructure (dans la section de la barre) composée de la couche de martensite auto-tempérée, la couche de transition de bainite et la zone centrale composée de la microstructure ferritique-perlitique. L'exemple de microstructure présente dans les barres soumises au traitement TEMPCORE est présenté dans Figure II.11.



Surface, martensite trempée



Zone intermédiaire, Microstructure :
bainitique



Centre de barre, Microstructure :
ferritique – perlitique

Figure II.11 : Microstructure des barres d'armature en béton réalisé avec la technologie TEMPCORE, ayant un diamètre de 32 m

Les paramètres d'un cycle de refroidissement, c'est-à-dire la température, le temps et l'intensité du refroidissement affecter de manière significative la fraction volumique de l'individu couches, et, par conséquent, les propriétés mécanique d'une barre (liées au produit chimique composition de la chaleur de l'acier, dont la barre a été roulé).

Si les paramètres de refroidissement sont stables, les propriétés d'une barre trempée dépendent sur sa microstructure avant d'entrer dans le système de refroidissement. À son tour, le nom ci-dessus la microstructure dépend des paramètres de roulement, le chauffage de la charge et la qualité de coulées continues.

Un facteur affectant le durcissement des barres est la fraction volumique de la couche martensitique. L'épaisseur de la couche martensitique est la fonction de la composition chimique d'acier ainsi que l'intensité et temps de refroidissement.

Une augmentation de la vitesse de refroidissement s'accompagne d'une augmentation de la distance entre la surface de la barre et la couche de transition, par rapport à laquelle une température obtenue pendant le refroidissement correspond à la température M_s , déterminer la limite du martensitique zone.

Dans des conditions de refroidissement constantes, la profondeur de durcissement (épaisseur de couche) dépend de la teneur en carbone et en alliages et dopages éléments affectant la valeur de la température M_s et la valeur de la vitesse de refroidissement critique, c'est-à-dire le taux le plus bas auquel la structure martensitique peut être obtenue.

Une augmentation du contenu de carbone diminue la température M_s et, par conséquent, réduit la profondeur à laquelle la transformation martensitique peut avoir lieu.

D'autre part, une augmentation du contenu de carbone se traduit par une plus grande profondeur de durcissement résultant de la dureté accrue de l'acier étant la conséquence du démarrage retardé des transformations diffusives, c'est-à-dire ferritiques et perlitiques.

Dans des conditions de refroidissement constant, par rapport à la composition chimique des aciers utilisés pour les barres (TEMPCORE), une augmentation de la teneur en carbone est, agrégé, responsable de la réduction de l'épaisseur de la couche durcie [38].

Les barres se caractérisent par distribution uniforme des zones susmentionnées autour toute la circonférence.

Les résultats de dureté des mesures de profondeur révélées que les zones individuelles des barres de même diamètre ont été caractérisés par des épaisseurs et dureté. Figure II.12 présentes des mesures de dureté résultats liés à la coupe transversale de la barre.

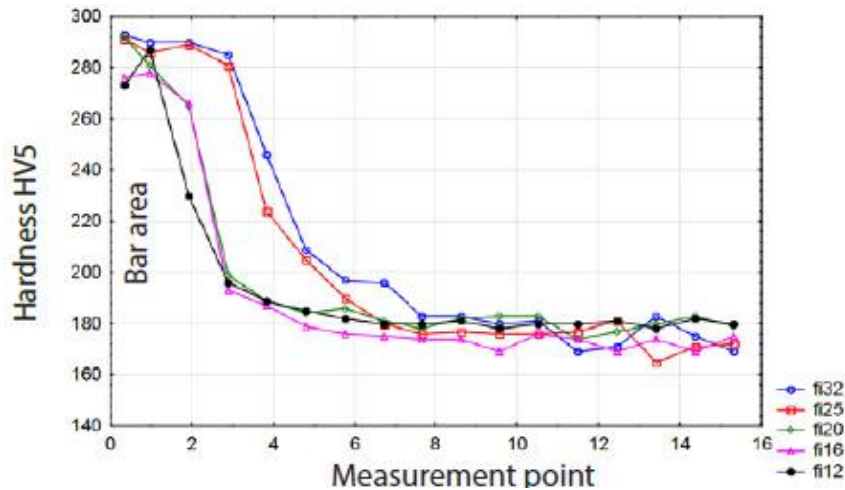


Figure II.12 : Résultats des mesures de dureté liés à la section transversale des barres d'armature en béton fabriqués à l'aide de la technologie TEMPCORE [39]

Différentes microstructures sont observés dans des barres faites en utilisant la technologie de durcissement à froid, la structure ferrite-perlite est présente dans la section transversale du bar entier. Cependant, dans les régions affectées par les rouleaux il est possible d'observer de manière significative grains individuels déformés (Figure II.13). À cause du froid serré, la dureté de l'acier augmente jusqu'à 242 HV5 (Figure II.14). En conséquence, les barres durcies à froid se caractérisent par une limite élastique supérieure à 500 MPa (B500A).



Zone externe de la barre



Zone centrale de la barre

Figure II.13 : Microstructure de la barre d'armature en béton durci à froid ayant un diamètre de 12 mm [39].

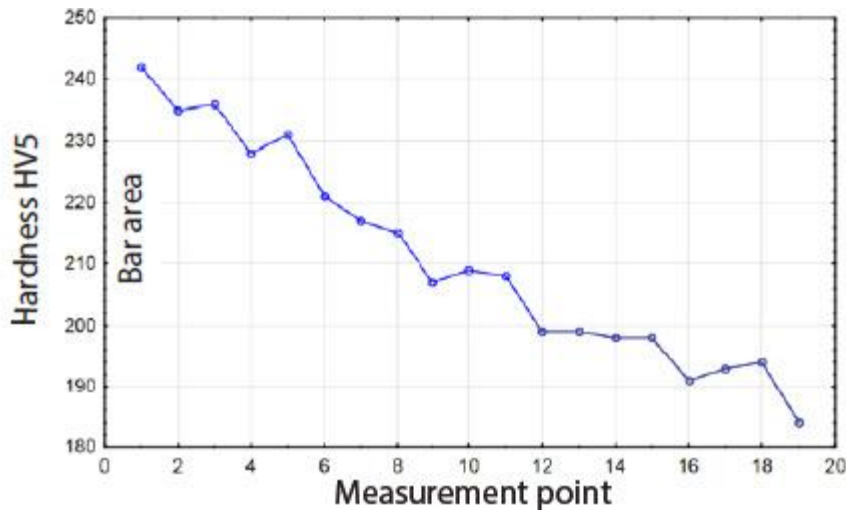


Figure II.14 : Résultats de la mesure de la dureté dans la section transversale de la barre d'armature en béton durci à froid [39].

II.6.4. Propriétés physiques des barres d'armature :

Il existe deux propriétés physiques importantes pour les barres d'armature en acier.

Adhérence :

Les armatures ne glissent pas à l'intérieur du béton. C'est le phénomène d'adhérence qui empêche ou limite ces glissements. Cette propriété physique permet la transmission des efforts et un fonctionnement rationnel : le béton suit alors les armatures dans leurs déformations. L'adhérence est améliorée lorsque la barre possède des nervures en saillies ou lorsque sa surface est rugueuse [40].

La résistance d'un élément en béton armé et la maîtrise de la fissuration supposent que l'acier ne puisse pas glisser à l'intérieur du béton, c'est-à-dire qu'il y ait adhérence parfaite entre les deux matériaux.

L'adhérence des armatures est fonction de leur forme, de leur surface (les saillies ou les creux améliorent l'adhérence) et de la résistance du béton.

Le fonctionnement du béton armé suppose une « association » entre l'acier et le béton qui met en jeu l'adhérence des armatures au béton. Pour utiliser pleinement des aciers plus performants, il faut donc aussi que leur adhérence soit améliorée.

On a par conséquent évolué vers des aciers qui sont à la fois à Haute Limite d'Élasticité (HLE) et à Haute Adhérence (HA). La haute adhérence résulte de la création d'aspérités en saillie ou en creux. La haute limite d'élasticité peut être obtenue par différents moyens :

- par écrouissage, par étirage et ou laminage à froid de barres ou fils d'acier doux;
- par traitement thermique (trempe et auto revenu) de barres ou fils d'acier doux.

L'adhérence est définie par deux coefficients :

- le coefficient de fissuration qui est pris en compte pour les calculs de fissuration du béton;
- le coefficient de scellement qui permet de dimensionner les ancrages des armatures.

Les valeurs de ces coefficients dépendent du type d'armatures (ronds lisses ou barres HA).

Soudabilité :

Une des propriétés principales de l'armature à béton est la soudabilité. On peut définir la soudabilité comme une propriété géométrique :

« La soudabilité d'un métal ou d'un alliage est l'aptitude de ce métal ou de cet alliage à être assemblé par fusion ou par tout autre procédé assurant la continuité de la matière ».

Un acier est dit « soudable » s'il est possible de l'assembler par soudure, par des procédés courants, sans altérer ses caractéristiques mécaniques. La soudabilité d'un acier est attestée par sa composition chimique. Les normes pour les aciers au carbone fixent les valeurs qui ne doivent pas être dépassées concernant les teneurs en carbone, soufre, phosphore, azote et cuivre, ainsi qu'une combinaison des teneurs en carbone, manganèse, chrome, molybdène, vanadium, nickel et cuivre appelée carbone équivalent. Les inox utilisés pour les armatures sont soudables.

Des essais permettent de vérifier l'aptitude au soudage qui, en amont, est maîtrisée au niveau de l'aciérie par des exigences relatives à la composition chimique de l'acier. Il est indispensable que les caractéristiques de résistance, d'élasticité et de ductilité soient maintenues au niveau de la soudure [41].

II.6.5. Compositions chimiques des barres d'armature :

Les aciers utilisés pour la production de l'armature de nuance 500MPa d'après toutes les normes sont de qualité ordinaire, bas carbone, peu chargés en éléments d'alliage et donc soudables.

En analysant les données présentées dans le tableau II.3, on peut constater, que les normes de différents états sont bien harmonisées selon la composition chimique et la valeur de carbone équivalent.

Toutefois, la valeur de carbone équivalent qui dépasse 0,50 (B500DWR selon ISO 6935-2) indique l'utilisation élevée de différents éléments d'alliage tels que Cr, V, Mo etc., qui compliquent la soudure mais permettent d'obtenir les caractéristiques de plasticité élevés (Agt=8% pour B500DWR). En outre, l'utilisation de ces éléments renchérit le produit fini.

Le fait que les aciers utilisés sont à bas carbone atteste la nécessité d'utiliser les traitements de durcissement pour obtenir la qualité de 500MPa [42].

Tableau II.3 : Compositions chimiques de l'acier à béton HA soudable selon les Normes.

Norme	Composition chimique, % masse max									
	C	Si	Mn	S	P	N	Cu	As	Céq	Céq, équation
ДСТУ ENV 10080	0,24	---	---	0,055	0,055	0,013	---	---	0,52	$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + V + Mo)}{5} + \frac{(Cu + Ni)}{15}$
ДСТУ 3760 :2006	0,25	---	---	0,045	0,045	0,012	---	0,08	0,3-0,52	
ГОСТ Р 52544-2006	0,24	0,95	1,7	0,055	0,055	0,13	0,55	---	0,52	
NF A35-016(019)-1(2)	0,24	---	---	0,055	0,055	0,014	0,85	---	0,52	
BS 4449 : 2005	0,24	---	---	0,055	0,055	0,014	0,85	---	0,52	
DIN 488-1: 1984		---	---	0,055	0,055	0,013	---	---	---	
EN 10080 :2005	0,24	---	---	0,055	0,055	0,014	0,85	---	0,52	
ISO 6935-2 : 2007 a)	1	0,22	0,6	1,6	0,05	0,05	0,012		50	
	2	0,32	0,55	1,5	0,04	0,04	0,012		0,61	

a) 1 : B500AWR, B500BWR, B500CWR ; 2 : B500DWR

II.7. Effet des éléments d'alliage sur les propriétés des barres armature :

Les propriétés mécaniques des barres armature en béton et leur stabilité microstructurale résultent du produit chimique conçu avec précision composition de l'acier et développé de manière appropriée technologie de fabrication.

Fournir de l'acier avec des agents d'alliage est principalement visant à [43]:

- ✓ obtenir des propriétés mécaniques et propriétés plastiques, déclencher des changements spécifiques dans la microstructure,
- ✓ obtenir des propriétés physiques particulières,
- ✓ augmenter la trempabilité,
- ✓ faciliter les technologies de fabrication et améliorer résultats du traitement thermique.

L'un des principaux éléments chimiques affectant les propriétés des aciers sont le carbone. Une augmentation dans la teneur en carbone est accompagnée par une augmentation de la résistance à la traction, limite d'élasticité et la dureté ainsi que par une diminution de la ténacité, allongement et réduction de surface. Cependant, une augmentation significative de la teneur en carbone réduit la soudabilité de l'acier [43].

Influence du %C sur Re, Rm et A% :

La figure II.15.a montre l'influence de la teneur en carbone sur les courbes de traction uniaxiale de certains aciers non alliés. Lorsque la teneur en carbone augmente :

- ✓ Re et Rm augmentent.
- ✓ A% diminue.

Influence du %C sur la résilience :

La figure II.15.b montre l'influence de la teneur en carbone sur les courbes KV-T. Lorsque la teneur en carbone augmente :

- ✓ La température de transition ductile fragile augmente.
- ✓ La valeur de la résilience au niveau ductile diminue.

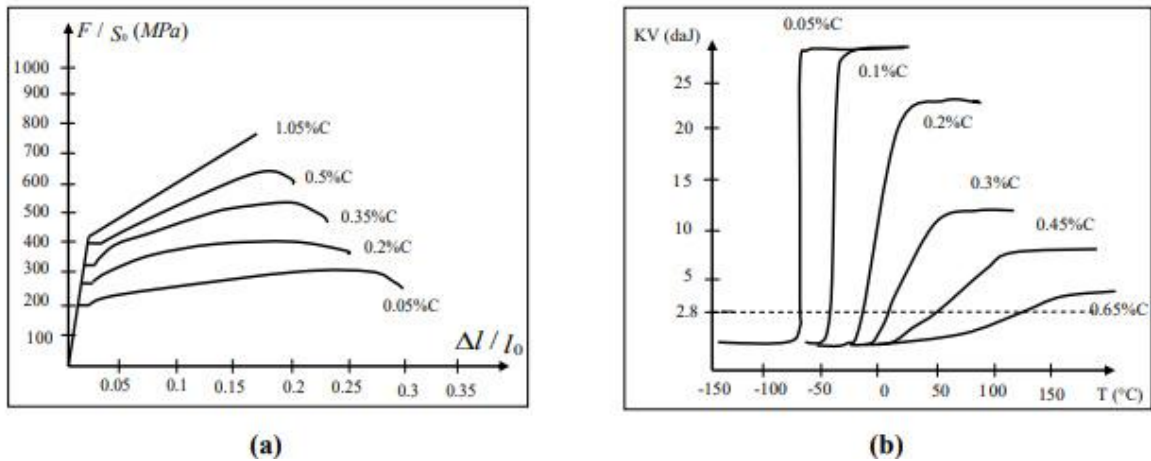


Figure II.15 : (a) : Influence du %C sur R_e , R_m et $A\%$. , (b) : Influence du %C sur la résilience [44].

D'autre part Avec l'augmentation de la teneur en carbone la phase ferrite diminue avec une augmentation correspondante de la phase perlite et d'environ 0,8% de carbone, il y aurait phase perlite seule. Il a été établi qu'avec l'augmentation de la phase perlite, la résistance à la traction de l'acier augmente tandis que la propriété d'allongement, c'est-à-dire la ductilité réduit. La résistance maximale à la traction est atteinte à environ 100% de phase perlite mais la ductilité sera alors proche de zéro, c'est-à-dire que l'acier serait fragile.

Pour avoir une barre d'armature en acier de propriétés souhaitables, la teneur en carbone est contrôlée et se trouve généralement dans une plage étroite de 0,15% à 0,25%. Le faible niveau de carbone est choisi pour empêcher la fragilisation de la barre pendant la déformation durcissement et développement de microstructures indésirables dans les zones affectées par la chaleur zone de cette barre pendant le soudage [45].

Un autre élément chimique affectant significativement les propriétés des aciers est le manganèse, responsable pour une augmentation de la dureté et de la résistance des aciers, tout en réduisant leur Propriétés plastique.

Les procédés métallurgiques impliquent également l'ajout de silicium, principalement utilisé comme désoxydant élément.

Le tableau II.4, montre les éléments couramment utilisé dans la fabrication des aciers en général et leurs effets sur les propriétés de l'acier [46].

Tableau II.4 : Effet des éléments d'alliage utilisés dans les aciers sur les propriétés des barres d'armature

éléments	Effet
Carbone (C)	Augmente la dureté et la résistance à la traction mais réduit la ductilité
Manganèse (Mn)	Améliore la trempabilité, la ductilité et la résistance à l'usure. Élimine la formation de sulfures de fer nocifs, augmentant la résistance aux températures élevées.
Nickel (Ni)	Augmente la résistance aux chocs et la ténacité, confère la résistance à la corrosion en combinaison avec d'autres éléments.
Chrome (Cr)	Améliore la trempabilité, la résistance à l'usure, augmente fortement la résistance à la corrosion à des concentrations élevées (> 12%)
Tungstène (W)	Augmente la dureté en particulier à des températures élevées en raison de la stabilité carbures, affine la taille des grains
Vanadium (V)	Augmente la résistance, la dureté, la résistance au fluage et la résistance aux chocs grâce à la formation de carbures de vanadium dur, limite la taille des grains
Molybdène (Mo)	Augmente la trempabilité et la résistance, en particulier à des températures élevées et dans des conditions dynamiques.
Silicium (Si)	Améliore la résistance, l'élasticité, la résistance aux acides et favorise les grosses tailles de grain, qui provoquent une augmentation de la perméabilité magnétique.
Titane (Ti)	Améliore la résistance et la résistance à la corrosion, limite la taille des grains d'austénite.
Cobalt (Co)	Améliore la résistance aux températures élevées et la perméabilité magnétique
Zirconium (Zr)	Augmente la résistance et limite la taille des grains
Bore (B)	Agent de durcissement hautement efficace, améliore la déformabilité et usinable
Cuivre (Cu)	Améliore la résistance à la corrosion

Aluminium (Al)	Désoxydant, limite la croissance des grains d'austénite
-------------------	---

Importance de l'ajout des éléments d'alliage :

L'une des principales raisons de l'ajout des éléments d'alliage aux aciers est une augmentation de propriétés mécaniques combinées à la simultanéité amélioration des propriétés plastiques.

L'augmentation maximale de la limite d'élasticité, sans l'augmentation de la température de transition dans l'état fragile, peut être obtenue dans un alliage non allié à haute teneur en carbone et aciers à grains fins contenant l'addition d'aluminium, réduisant le contenu de libre l'azote dans l'acier en formant des nitrures d'aluminium.

Une augmentation excessive de la teneur en aluminium conduit à la plus grande quantité d'inclusions d'oxyde dans l'acier tué et la présence de plastique sulfures laminés MnS. Le suivi de la granulométrie lors du travail du plastique à chaud et le traitement thermique est d'une grande importance.

Dans les aciers ferritiques-perlitiques permettent d'obtenir des grains en continuant la température réduite processus de laminage jusqu'à 750 ° C. Des températures plus basses à la fin du laminage des aciers contenant les micro-agents de Nb, V et Ti entraînent la formation de petits grains de ferrite et un rendement plus élevé valeurs en points. Cependant, une baisse de la température à la fin du processus de laminage augmente la température de transition à l'état fragile, induite par la distorsion importante des précipités ferrite ou précipités de revêtements de carbure le long des grains de ferrite. Une baisse de la température à la fin du processus de laminage contrôlé diminue légèrement la teneur en perlite de la microstructure en acier.

Le manganèse est responsable de l'affinage des grains de ferrite et des colonies de perlite, augmentant en même temps la limite d'élasticité. Comme les aciers normalisés ou laminés à chaud utilisés pour fabrication de barres d'armature en béton, le contenu de carbone et celle de manganèse sont souvent augmenté, mais au détriment de la détérioration soudabilité nominale [47].

II.8. Présentation des différentes caractéristiques du rond a béton de BELLARA :**II.8.1. Analyse chimique :****Composition chimique de l'acier TEMPCORE 500 :****Tableaux II. 5 :** Composition chimique le la nuance d'acier TEMPCORE 500

C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	N(%)	Cu(%)
≤0.22	≤0.98	≤0.05	≤0.05	≤0.012	≤0.8

Composition chimique de la billette :**Tableau II. 6 :** Composition chimique de la billette

C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Cu(%)	Al(%)	Ti(%)	Mo(%)	Ceq
0.19	0.98	0.19	0.02	0.016	0.04	0.004	0.001	0.003	0.372

Composition chimique de rond à béton :**Tableau II. 7 :** Composition chimique de rond à béton

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Cu%	Al%	Ti%	Mo%	Ceq
0.2	0.78	0.17	0.02	0.029	0.004	0.005	0.001	0.01	0.329

Le tableau II .6 illustre la composition chimique de la billette est conforme à celle de la norme de référence « l'acier TEMPCORE 500 ».toutes les teneurs se situent dans la fourchette tolérée.la présence de 0.19% de Silicium dans la composition de la billette augmente la limite d'élasticité de l'acier tout en améliorant la trempabilité. Le pourcentage de manganèse est plus grand par rapport à d'autres éléments d'alliages car nous avons cherché à améliorer les caractéristiques mécaniques et surtout la limite d'élasticité et former une couche de martensite dure en surface.

Le tableau II .7 illustre la composition chimique du rond à béton est également conforme à celle donnée par la nuance normalisée « TEMPCORE 500 ».Même si les pourcentages de manganèse et silicium assurent une légère baisse, autres teneurs restent acceptables par la norme. Cette légère diminution des teneurs en Si et Mn due probablement à une oxydation du rond à béton pendant le laminage.

II.8.2. Analyse de la microstructure :

a) Le rond à béton de diamètre 25mm avant traitement thermique:

Au niveau de la cage finisseuse 14 des échantillons sont prélevés pour l'observation métallographique.les microstructures faites sur microscope optique sont donnée par les figures II. (16,17).

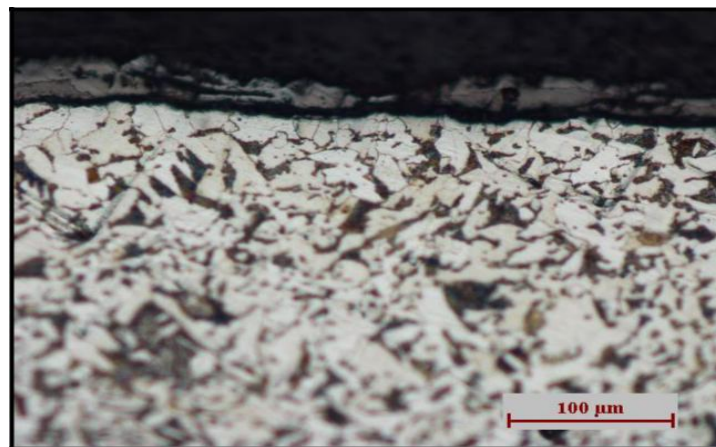


Figure II .16: Micrographie optique du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique, prise à l'extrémité de surface.

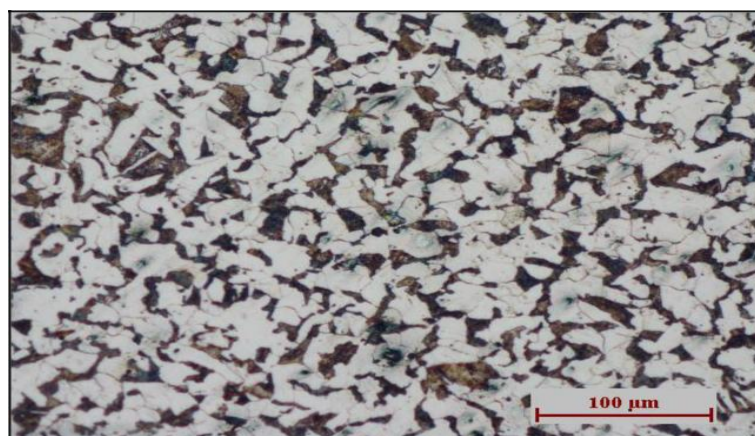


Figure II .17: Micrographie optique du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique, prise au centre.

Les figures II (16,17) illustrent la microstructure à l'extrémité de surface est presque la même au centre de rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique .cette dernière est essentiellement constituée de grains de ferrite et de quelque plage de perlite, il s'agit donc d'une structure ferrito-perlittique.

b) Le produit fini de diamètre 25mm après traitement thermique:

La désignation normalisée de la billette est FerE 500, cette billette est laminée en passant par différentes cages de réduction du train de laminage de « BELLARA ».Elle subit ensuite une trempe « procédé TEMPCORE » à la température de 850°C, refroidie à l'eau à une pression de 6 bar puis d'un traitement à l'air qui sert l'auto-revenu pour éliminer les effets néfastes de la trempe. Les microstructures faites sur microscope optique sont donnée par les figures 18, 19et20.

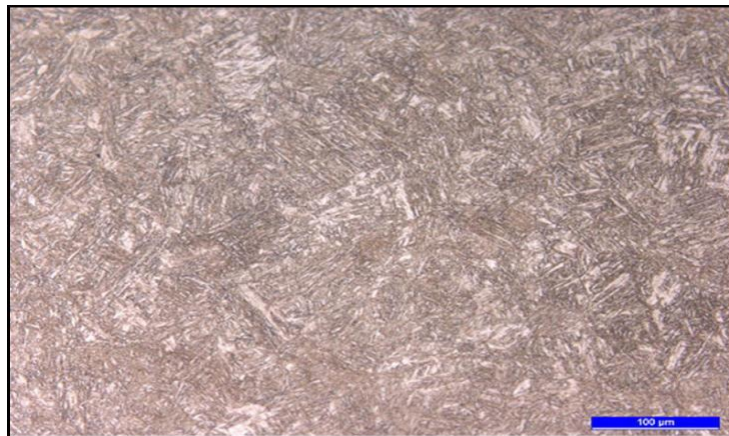


Figure II .18 : Micrographie optique de rond à béton de diamètre 25 mm après traitement thermique, prise à l'extrémité de surface.



Figure II .19 : Micrographie optique de rond à béton de diamètre 25 mm, prise dans la 2ème zone d'extrémité de surface.

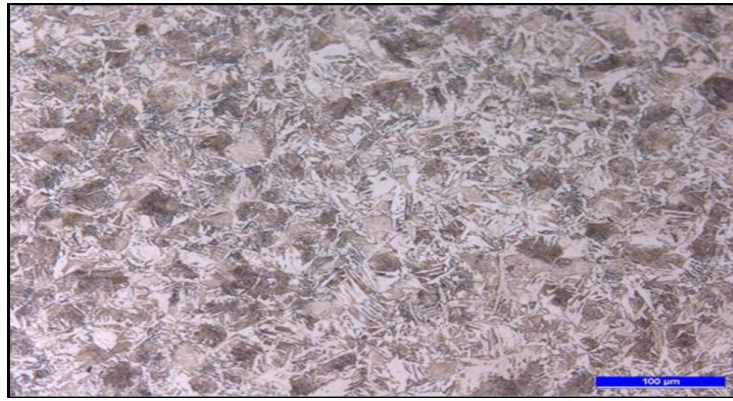


Figure II. 20 : Micrographie optique de rond à béton de diamètre 25 mm après traitement thermique, prise au centre.

L'évolution de la microstructure du rond à béton de diamètre 25 mm est présentée par les micrographies des figures II (18,19et20) .En partant de l'extrémité vers le centre du rond à béton on peut retrouver différentes microstructures suite au refroidissement.

La figure II .18 illustre la microstructure qui est essentiellement constituée de martensite en lattes, et la figure 19 illustre la microstructure est essentiellement constituée de bainite, et la figure 20 illustre une microstructure est essentiellement constituée de ferrite et de plage de perlite.

II.8.3. Évaluation de la dureté en profondeur des barres d'acier TEMPCORE 500 :

a)Le rond à béton de diamètre 25mm avant traitement thermique(ATT) :

Tableau II. 8 : Profil de dureté en fonction de la distance de rond à béton de diamètre 25mm Avant traitement thermique.

Point par rapport à l'extrémité de surface (mm)	Dureté(HV)
1	147
2	144
4	143
6	150
8	143
10	142
11	155
12	155

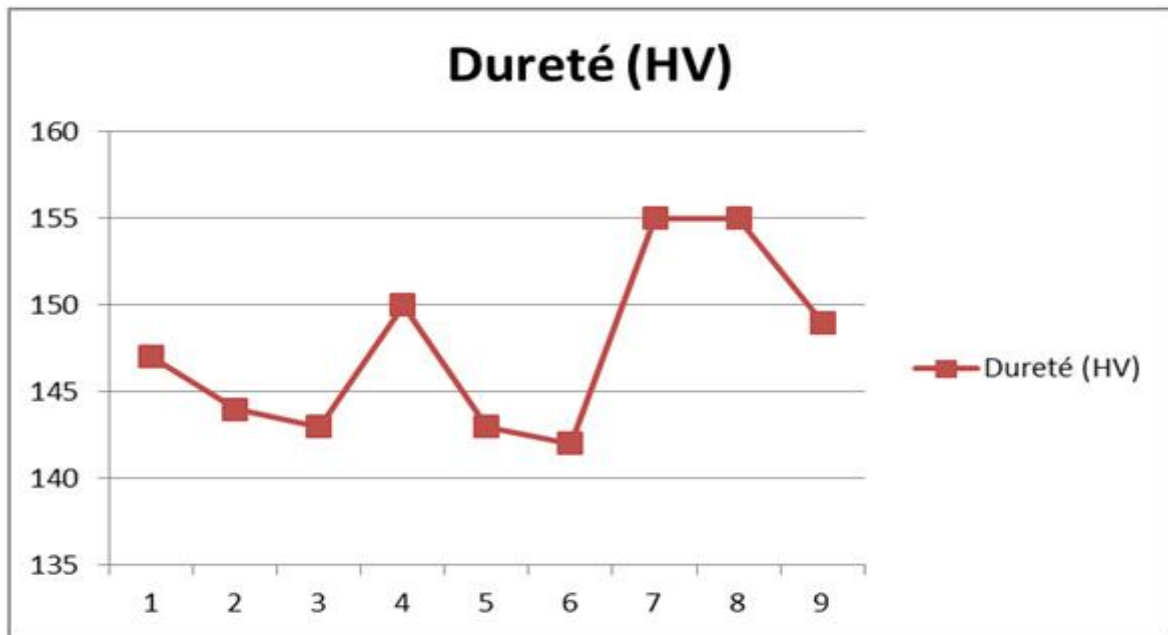


Figure II .21 : Profil de dureté en fonction de la distance du rond à béton de l'extrémité vers le cœur (mm) de diamètre 25mm avant traitement thermique.

La figure II .21 illustre la dureté du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique qui n'est pas homogène, causée par l'apparition du mélange de la ferrite et de la perlite dans la microstructure.

b) Le produit fini de diamètre 25mm après traitement thermique :

Tableau II. 9: Profil de dureté en fonction de la distance du produit fini de diamètre 25 mm.

Point par rapport à l'extrémité de surface (mm)	Dureté(HV)
1	221
2	219
4	212
6	196
8	181
10	170
11	156
12	152
13	141

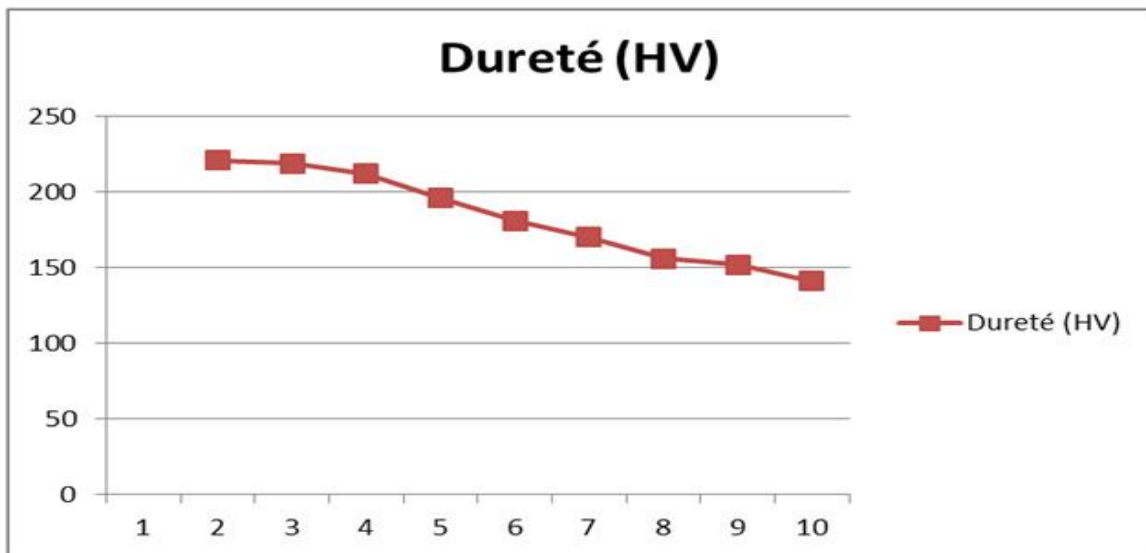


Figure II. 22 : Profil de dureté en fonction de la distance de l'extrémité vers le cœur (mm) du produit fini de diamètre 25mm.

La figure II .22 présente le profil de dureté HV selon la demi-section du rond à béton de diamètre 25 mm .l'allure décroissante de la couche s'explique par la présence de 3 couches successives et respectivement martensitique, bainitique et ferrito-perlitique à cœur.

II.8.4. Essai de traction :

a)Le rond à béton de diamètre 25mm avant traitement thermique(ATT) :

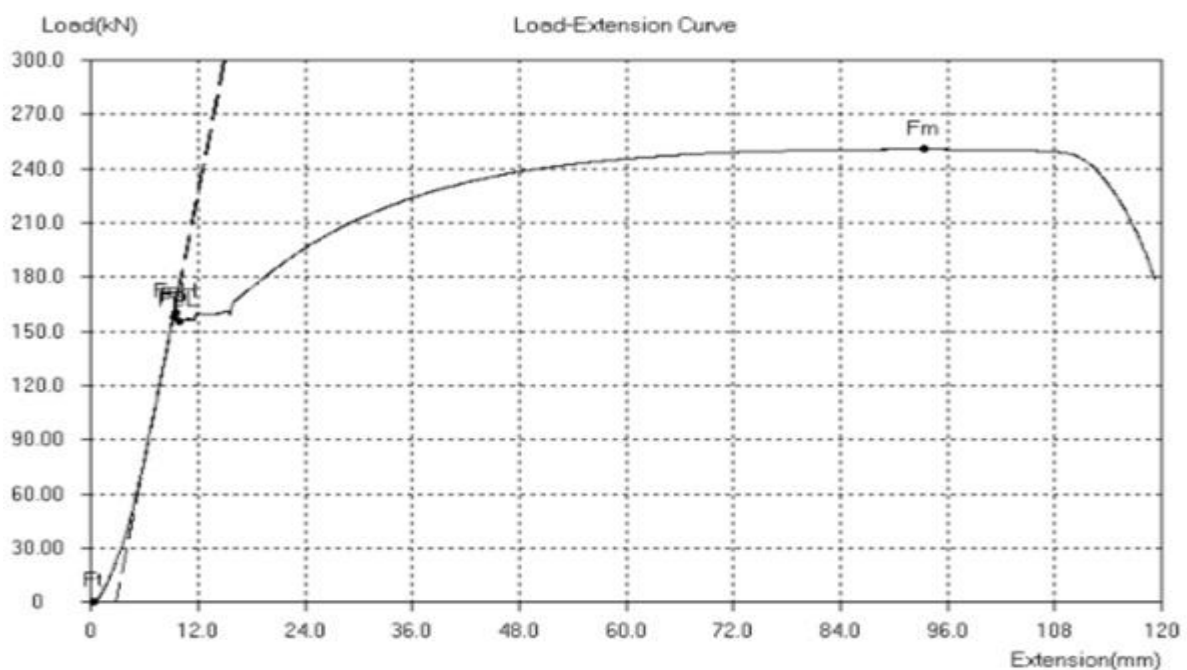


Figure II. 23: Courbe de traction du rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique(ATT).

Tableau II .10 : Résistance à la rupture R_m et la limite d'élasticité R_e de rond à béton de diamètre 25 mm avant traitement thermique (ATT).

R_m	511 MPa
R_e	326 MPa
R_m/R_e	1.57

b) Le produit fini de diamètre 25 mm après traitement thermique(PF) :

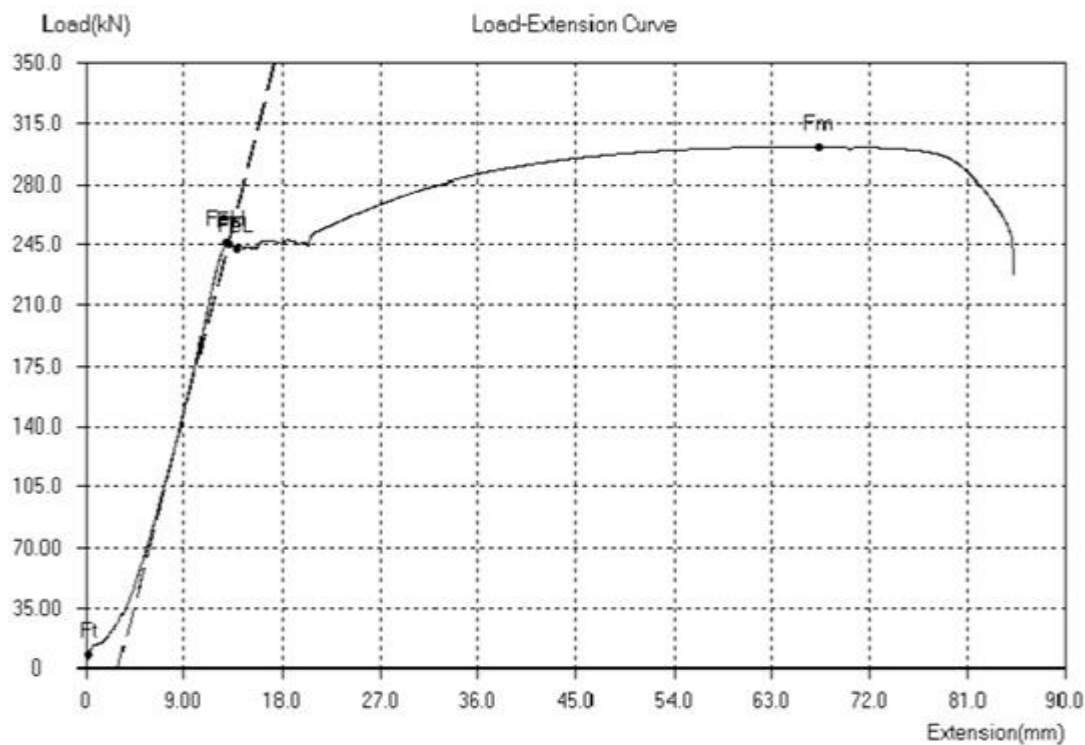


Figure II. 24: Courbe de traction de produit fini de diamètre 25mm après traitement thermique(PF).

Tableau II. 11: Résistance à la rupture R_m et la limite d'élasticité R_e de rond à béton de diamètre 25 mm.

R_m	614 MPa
R_e	502 MPa
R_m/R_e	1.22

Tableau II. 12 : Résumé de tous les résultats obtenus par l'essai de traction.

	R_m (MPa)	R_e (MPa)	A(%)	A_g (%)	A_{gt} (%)	R_m/R_e
Ø25mm (ATT)	511	326	32.15	16.7	16.9	1.57
Ø25mm(PF)	614	502	23.03	11.8	12.10	1.22

Le tableau II .12 regroupe les valeurs de la limite d'élasticité R_e qui est supérieure à 500 MPa après trempe à l'eau et auto revenu à l'air pour les produits finis par contre avant traitement thermique trempe à l'eau et auto revenu la limite d'élasticité est inférieure à 500 MPa.

D'après le tableau II.12 l'allongement A% des produits finis après traitement thermique trempe à l'eau et auto-revenu à l'air est inférieur à l'allongement A% des produits avant traitement thermique par ce que la limite d'élasticité R_e des produits finis après traitement thermique trempe à l'eau et auto revenu à l'air est supérieure à la limite d'élasticité R_e des produits avant traitement thermique.

II.8.5. Résultats de l'essai de pliage :

L'essai consiste à soumettre l'éprouvette à une déformation plastique par pliage, chaque diamètre un poinçon spécial et un distance entre les appuis et de pliage est supérieure à 120°.

Résultat de l'essai de pliage pour les produits finis après traitement thermique :

Les essais de pliage effectués sur tous les échantillons de diamètres 16 mm, 20 mm, 25 mm, 32 mm de produit fini ont montré qu'il y'a absence de fissures au niveau des échantillons. Nous pouvons dire que notre matériau est fortement ductile et en même temps résistant et qu'il est dépourvu de défauts susceptibles de provoquer des microfissures.

**Figure II .25** : Résultat de l'essai de pliage.

Le matériau est donc qualitativement bon et conforme puisqu'il y'a absence totale de fragilité et le matériau se caractérise par une bonne ductilité.

CHAPITRE III :
TECHNOLOGIE DU LAMINAGE DES
BARRES D'ARMATURE A L'AQS
BELLARA

CHAPITRE III : TECHNOLOGIE DU LAMINAGE DES BARRES D'ARMATURE A L'AQS BELLARA

Présentation succincte de l'usine de l'AQS BELLARA :

La Société ALGERIAN QATARI STEEL (AQS) envisage la construction d'un Complexe Sidérurgique dans la région de Jijel, dans les environs de la ville d'El Milia, au pôle sidérurgique de BELLARA. AQS est une nouvelle Entreprise Publique Économique, une société mixte algérois-qatarie Résultant d'un partenariat (joint-venture), née pour exécuter le nouveau complexe sidérurgique de BELLARA.

Description du Project :

Réalisation en 2 phases d'une Usine Sidérurgique pour une capacité de quatre (04) millions de tonnes reproduits sidérurgiques.

Phase 01 : Démarrage prévu en 2017 pour une production de deux (02) millions de tonnes de produits sidérurgiques par an (Ronds à Béton et fil machine) par la réalisation de :

- Une Unité de Réduction Directe de 2 500 000 tonnes de pré réduit à partir des Pellets importées.
- Deux Aciéries électriques pour la fabrication de 2 100 000 tonnes de billettes par an.
- Trois Laminoirs pour produire 1,5 MT de Ronds à Béton et 0,5 million de tonnes de fil à machine.
- Une Unité de Gaz Industriels.
- Une Unité de Production de Chaux.
- Une Unité de Production d'Eau Industrielle.
- Un Poste Electrique Haute Tension.
- Un Poste de Gaz Naturel Haute Pression.
- Les Installations de Manutention et Transport (Port et Site).
- Les Faisceaux Ferroviaires et Routiers (Port et Site).
- Les Ateliers Centraux de Maintenance.
- Les Magasins de Stockage des Pièces de Rechange et des Ferro-alliages.
- Les Locaux Sociaux.

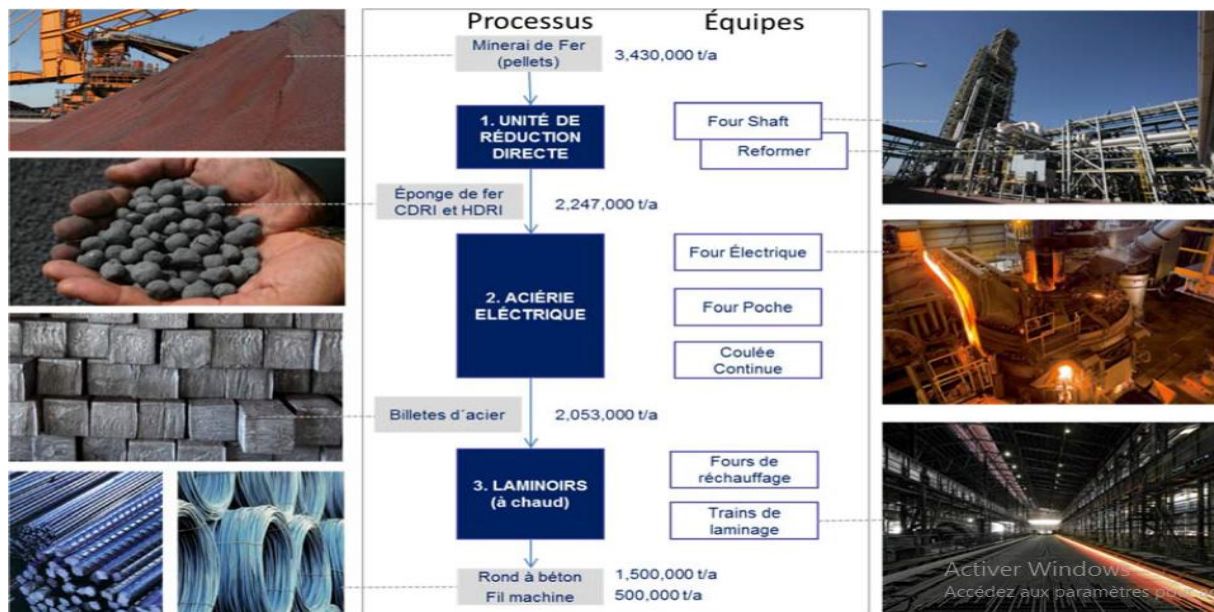


Figure III.1 : Étapes technologiques et bilan matière (Phase 1)

Phase 02 : avec une capacité de 2 millions de tonnes Début prévu pour 2019.

Introduction :

Le laminage est une opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à Réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils tournant autour de leur axe; c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement.

D'un point de vue métallurgique, c'est obtenir des caractéristiques mécaniques ou métallurgiques supérieures ; l'opération précédente, qui peut être la coulée, ne donnant pas une satisfaction sur ce point. Dans le cas du laminage à chaud, les structures de solidification sont détruites ou au moins modifiées. Les soufflures sont écrasées, allongées et même souvent ressoudées. Le laminoir produit le rond à béton de différent diamètre 16 mm, 20 mm, 25 mm ,32 mm et 40 mm.

Il Ya 3 étapes très important dans la production de rond à béton :

- 1- Avant le laminage : chauffage.
- 2- Etape de laminage : transformation plastique.
- 3- Après laminage : traitement thermique.

On distingue deux types de laminoir, les laminoirs réversibles et les laminoirs tandem. La Figure (III.2) illustre les deux types de laminoir présentés. Un laminoir réversible est composé d'une seule cage munie de deux cylindres disposant de plusieurs gravures. La barre effectue plusieurs passes dans un sens et dans l'autre alternativement. Des systèmes de retournement sont disposés de chaque côté de la cage afin d'alterner les directions de déformation.

On parlera d'un laminoir tandem lorsque celui-ci possède plusieurs cages successives et que le produit est en prise simultanément dans ces dernières. Un train de laminage permettant de laminier de grosses sections possède obligatoirement une alternance de cages horizontales et verticales afin d'éviter la torsion du produit [48].

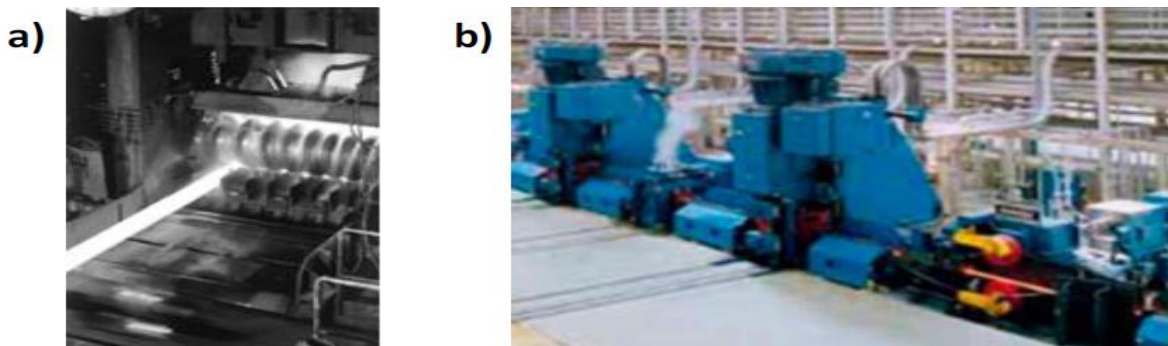


Figure III.2 : Exemple : (a) de laminoir réversible et (b) de laminoir tandem

III.1. Métallurgie de laminage :

III.1.1. Définition :

L'opération de mise en forme par déformation plastique est destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, par passage entre deux ou plusieurs outils axisymétriques tournant autour de leur axe, C'est la rotation des outils qui entraînent le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement.

Le laminage consiste à déformer et allonger un demi produit à la température de laminage, environ de (1200°C), entre deux cylindres tournant entraînés à la même vitesse périphérique dans des sens opposés (c'est -à- dire dans le sens des aiguilles d'une montre et le second dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) et espacés de telle sorte que le jeu entre eux assurera l'engagement de la section entrant [49]

III.1.2. Transformation de la billette :

Transformation de la billette par des opérations successives de laminage Soit entre le même cylindre soit dans une succession de pair de cylindre. Dans ces conditions, les cylindres laminent le semi produite et le délivrent en épaisseur réduite, accord en longueur. Cette déformation est assurée par des passages successives entre le même cylindre, dont le nombre est déterminé par le rapport entre le matériau d'entrée initial et la section transversale final du produit fini, de façon à aboutir à une forme géométrique utilisable (rail, rond) [50]

III.1.3. Réchauffage :

Le réchauffage des aciers au carbone et des aciers micro alliés a trois objectifs principaux :

Le premier : est d'ordre mécanique, est simplement de porter le métal à une température suffisante pour diminuer les efforts de formage, accroître la ductilité de l'acier de façon à pouvoir lui appliquer des déformations importantes, et de terminer le laminage dans le domaine austénitique.

Le second : objectif, qui est plutôt une conséquence favorable du premier, est de se placer dans le domaine austénitique avec, pour conséquences, d'effacer partiellement la structure très grossière issue de la solidification et de réduire les gradients de composition dus au phénomène de ségrégation.

Enfin : l'objectif essentiel de cette phase de réchauffage est la remise en solution des précipités apparus au cours de la solidification, en premier lieu parce qu'ils sont trop gros, et donc pas assez nombreux pour contribuer au durcissement de l'acier à température ambiante, et parce que les éléments tels que le niobium, le titane ou le vanadium jouent un rôle très important sur l'évolution de la structure au cours du laminage et de la transformation allotropique lorsqu'ils sont en solution solide. En peut voir également que la dissolution des précipités a un effet important sur la taille du grain austénitique de réchauffage [50].

Croissance des grains au réchauffage :

Une des conséquences métallurgiques de la dissolution des précipités est la croissance du grain de réchauffage. En effet, lors de l'austénitisation ($T > A_{c3}$), les grains austénitiques apparus aux anciens joints de grains ferritiques ont tendance à croître sous l'effet de la température. Néanmoins, l'énergie motrice de cette croissance étant relativement faible, les précipités issus de la solidification, même grossiers et donc peu nombreux, bloquent les mouvements des nouveaux joints de grains. Au fur et à mesure de la dissolution des

précipités, les joints retrouvent leur mobilité et les grains peuvent croître. Ces phénomènes sont visibles sur la (figure III.3) pour les aciers 1 et 2 contenant des éléments dispersoïdes ; les zones de croissance rapide de la taille des grains se situent dans les domaines de température correspondant à une remise en solution partielle des précipités où coexistent des grains fins encore bloqués par des précipités et des grains plus gros. Il est souhaitable de se placer hors de ces domaines de température caractérisés par des structures hétérogènes, tout en restant à des températures modérées de façon à limiter l'« explosion » des grains [50].

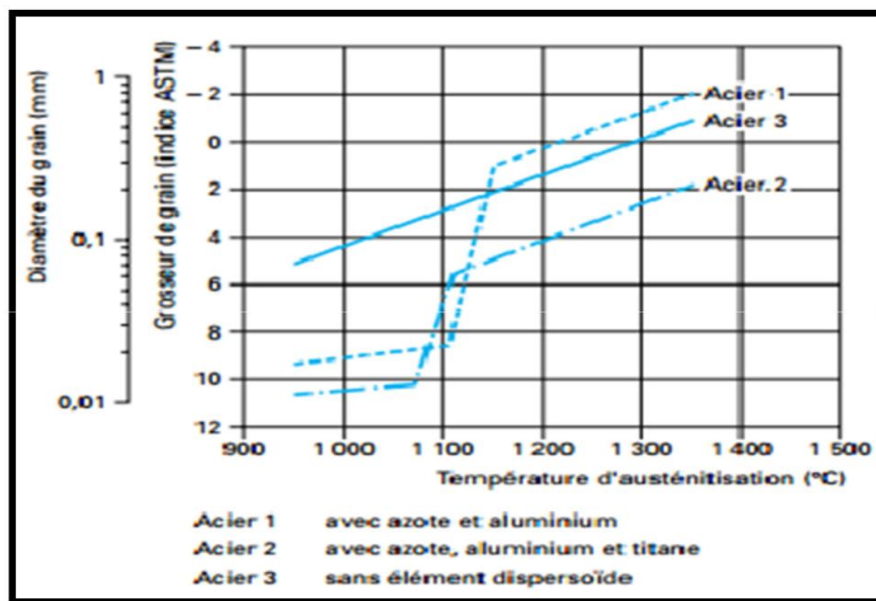


Figure III.3 : Évolution de la taille de grain austénitique en fonction de la température de réchauffage [50].

III.2.1. Aspect métallurgique :

III.2.1.1 Ecroissage et restauration du métal pendant la déformation :

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable. La présence des dislocations et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie stockée sous forme de dislocations. Dans le présent travail nous traitons la déformation plastique, dans ce cadre le nombre de dislocations va rapidement croître ce qui va conduire au durcissement de l'acier, et est couramment appelé : Phénomène d'écrouissage.

A la création de ces dislocations vont être opposés différents mécanismes conduisant à leur élimination et donc à l'adoucissement du matériau, ce sont les phénomènes de restauration et recristallisation. Il est également nécessaire de distinguer l'adoucissement qui se produit simultanément à la déformation, restauration ou recristallisation dynamique, de celui qui intervient après la déformation, c'est la restauration et recristallisation statique ou post-dynamique [50].

III.2.1.2. Recristallisation statique :

Comme il a déjà été évoqué ci-dessus, la recristallisation procède par germination et croissance de nouveaux grains. La recristallisation complète est atteinte lorsque les grains écrouis ont été intégralement éliminés et remplacés par des grains exempts d'écrouissage. La recristallisation statique se produisant après l'arrêt de la déformation, sa cinétique est de ce fait exprimée en fonction du temps.

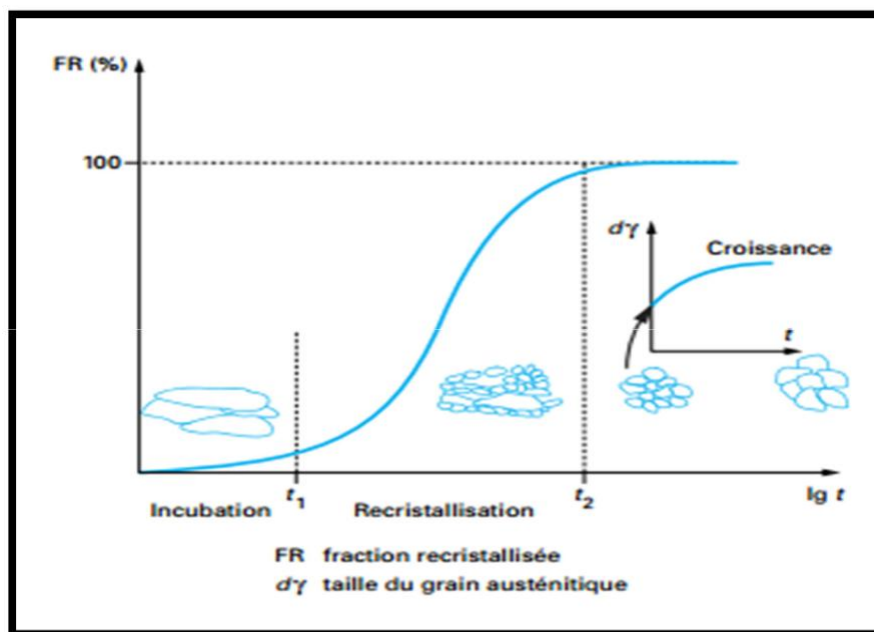


Figure III.4 : Cinétique de recristallisation statique [50]

III.2.1.3. Recristallisation dynamique :

Comme pour la recristallisation statique, la recristallisation dynamique en phase austénitique procède par germination et croissance de nouveaux grains. La première spécificité de la recristallisation dynamique réside dans le fait que l'environnement du nouveau grain recristallisé continue de s'écrouir avec le ralentissement de sa croissance. La recristallisation dynamique conduit donc à un affinement très important de la structure, au moins jusqu'à l'arrêt de la déformation. La seconde spécificité du phénomène est que la structure peut recristalliser plusieurs fois de suite au cours de la déformation. Contrairement au cas de la recristallisation statique, l'avancée de la recristallisation dynamique ne dépend pas du temps mais de la déformation appliquée [50].

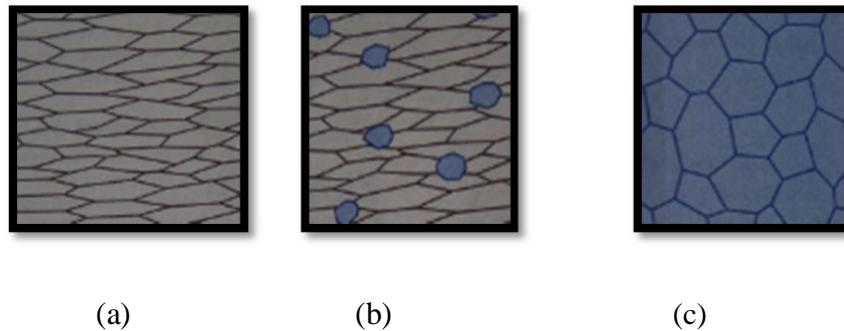


Figure III.5 : Représentation de recristallisation :(a) Métal écroui, (b) formations des grains, (c) après recristallisations et germination et formation des nouveaux grains

➤ **Bénéfices de l'acier laminé à chaud :**

L'acier laminé à chaud requiert généralement moins de traitement que l'acier laminé à froid, ce qui le rend beaucoup moins cher. Parce que l'acier laminé à chaud est autorisé à refroidir à température ambiante, c'est en fait normalisé ce qui signifie qu'il est exempt de contraintes internes qui peuvent provenir de la trempe ou du durcissement à froid.

L'acier laminé à chaud est idéal quand les tolérances dimensionnelles ne sont pas aussi importantes que la force globale du matériel, et où la finition de surface n'est pas une préoccupation majeure. Quand la finition de surface est un souci, la mise à l'échelle peut se faire par ponçage, sablage ou décapage par bain d'acide. Une fois la mise à l'échelle faite, diverses brosses ou finitions miroir peuvent être aussi appliquées. L'acier décalaminé offre aussi une meilleure surface pour la peinture et autres revêtements de surface. [51]

➤ **Laminage contrôlé :**

Laminage contrôlé est un type de traitement thermomécanique qui intègre déformation contrôlée et de traitement thermique . La chaleur qui amène la pièce à usiner au-dessus de la température de recristallisation est également utilisée pour effectuer les traitements thermiques de sorte que toute la chaleur le traitement ultérieur est inutile. Les types de traitements thermiques comprennent la production d'une structure de grains fins; le contrôle de la nature, la taille et la distribution de différents produits de transformation (tels que la ferrite , de l' austénite , perlite , bainite et martensite dans l' acier); induire un durcissement de précipitation ; et, commande de la ténacité . Pour ce faire, le processus doit être étroitement surveillé et contrôlé.

Les variables communes dans laminage contrôlé comprennent la composition du matériau de départ et de la structure, les niveaux de déformation, les températures à différents stades, et les conditions de refroidissement. Les avantages de laminage contrôlé comprennent de meilleures propriétés mécaniques et des économies d'énergie [52].

Ce type de laminage est celui utilisé dans l'usine de BELLARA.

III.3. Différentes parties de laminoir des barres d'armature à l'AQS BELLARA:

L'unité de production du rond à béton, se compose de quatre zones, ont de différentes fonctions sont nommées comme suit :

1. Zone parc à billettes.
2. Zone de chauffage.
3. Zone train de laminage.
4. zone de finissage.

III.3.1. Zone Parc à billette :

Le parc à billette a deux modalités de fonctionnement:

III.3.1.1. Chargement à chaud:

De cette façon, les billettes sont transportées en continu de la zone de chargement à chaud à l'intérieur du four à l'aide de l'élévateur. Celui-ci prélève le matériau de la table à rouleaux de la coulée continue et le soulève jusqu'à la table à rouleaux d'entrée du four de réchauffage.

Le dispositif servant à déposer le matériau, qui se trouve à la sortie de l'élévateur, pose le matériau sur la table à rouleaux à l'entrée du four (inutilisé).

III.3.1.2. Chargement à froid:

De cette façon, les billettes froides sont chargées à partir de la zone de chargement à froid; le pont-roulant décharge les billettes sur le longeron mobile de chargement à froid. Celui-ci bouge pas-à-pas après chaque cycle de déchargement sur la table à rouleaux. 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 du chargement à chaud ou à froid se fait à partir du système de supervision.

III.3.1.3. Spécification mécaniques de la nuance de Billette :

La billette est un produit semi-fini de section 150×150 mm et de longueur de 12m destiné à la fabrication de rond à béton, de fil machine et de profilé. La fabrication se base sur le principe du laminage à chaud.

Tableau III.1 : Spécification mécaniques de la nuance de Billette.

Résistance à l'écoulement, R_e N/mm (minimum)	Ration R_m/R_e (minimum)	Allongement A% (minimum)	Masse d'un mètre courant (kg)
500	1.8	14	177.44

III.3.1.4. Composition chimique de la Billette :

Tableau III.2 : Composition chimique de la Billette.

C%	Mn%	Si%	S%	P%	Cr%	Ni%	Cu%	N%	Céq
0.190	0.96	0.164	0.003	0.011	0.013	0.012	0.016	0.0014	0.36
0.228	1.15	0.220	0.021	0.027	0.026	0.037	0.070	0.0109	0.41



Figure III.6 : Parc à billettes.

III.3.2. Zone de chauffage:

Le four est destiné pour réchauffer les billettes programmées à fin de produire le rond à béton. Cette opération sert à augmenter l'élasticité du métal par conséquent on minimise l'effort de laminage et pour avoir une meilleure réduction de la section des billettes, afin d'obtenir le diamètre demandé.

Pourquoi faut-il chauffer l'acier?

Quand l'acier est froid, sa résistance aux déformations dues au laminage est très élevée. Quand l'acier est chaud, il devient plastique quand la température augmente et la résistance aux déformations diminue. "Un four de réchauffage est un grand four revêtu de réfractaires, où les billettes arrivent à la température de laminage".

III.3.2.1. 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 : $T= 950^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $T=1050^{\circ}\text{C}$.

Zone de maintien : $T=1050^{\circ}\text{C}$ jusqu'à $T= 1250^{\circ}\text{C}$.

- Le déplacement de la billette à l'intérieur du four se fait à l'aide d'un longeron mobile, actionné par un seul vérin de montée et un seul vérin de translation.
- Le défournement est automatique, à l'aide d'une tige défourneuse. La billette est défournée par une voie à rouleaux de 20 m de long, avant d'atteindre la première cage. Cette voie à rouleaux, est équipée d'un éjecteur de billettes.

III.3.2.2. Fonctionnement de four :

Deux carburants primaires sont disponibles pour chauffer les billettes jusqu'à la température de laminage (1000°C - 1220°C). Bien qu'il soit possible d'utiliser d'autres hydrocarbures, le gaz naturel (méthane) et divers types de mazout sont le standard pour le réchauffage de billettes.

Quel que soit le carburant utilisé, il faut le mélanger avec l'oxygène dans l'air pour créer l'effet de combustion.

Pour une bonne combustion et une transmission de chaleur, il faut que le mélange du fioul et d'air se fasse correctement. Si on mélange trop d'air avec le carburant, il en résulte un mélange "maigre", et la flamme sera plus basse, comme la température. Si l'on mélange trop peu d'air avec le carburant, on obtient un mélange "riche". Dans ce cas, la combustion n'est pas complète ce qui donne une température plus basse de l'acier billettes et crée une situation dangereuse à cause des gaz explosifs dans la conduite d'évacuation du four, Le meilleur mélange de carburant et d'air change pour chaque carburant, (en raison de la valeur calorifique de chaque carburant). Dans le cas du gaz naturel, un pied cubique de gaz mélangé avec dix pieds cubiques d'air donne 1055.060 KJ de chaleur.



Figure III.7 : Four de réchauffage des billettes.

III.3.2.3. Formation de la calamine Fe₂O₃ :

La formation de calamine présente plusieurs désavantages dans un laminoir :

- Excès de calamine oxydante provoquant des défauts de laminage.
- La calamine se comporte comme un isolant, empêchant la transmission de chaleur dans les billettes.
- La calamine cause une réduction du rendement (perte de métal).

Les facteurs affectant la formation de calamine sont les suivants:

Le temps, la température, et l'air (O₂) Pratiquement, le temps que les billettes passent dans le four est déterminé par le taux de production dans le laminoir.

Dans des conditions idéales, la billette devrait atteindre la température du laminage, puis être déchargée du four.

Quand on allume les fours avec un manque d'air (trop de carburant), ceci réduit l'atmosphère. La calamine se formant dans une atmosphère qui se réduit est étanche et adhère fortement à l'acier. Dans le cas de retards sur le laminoir, il faut réduire les températures dans le four par activant une stratégie de retard du four.

III.3.2.4. Décarburation :

La décarburation, un processus faisant que les atomes de carbone sont prélevés des surfaces extérieures de l'acier. Un processus ayant lieu dans les aciers au carbone, quand ils sont chauffés à une température suffisante dans une atmosphère adéquate.

1. Température: lorsque la température augmente, le taux de décarburation augmente et la décarburation n'a pas lieu en dessous de 800 °C.
2. Temps: le taux de décarburation augmente au fur et à mesure que le temps passe. La durée d'exposition de la surface de l'acier à la température augmente le taux de décarburation.
3. Atmosphère: l'une des influences majeures sur la décarburation est l'atmosphère à laquelle est exposé l'acier.

La décarburation du produit se fait sur tous les aciers au carbone. La profondeur de décarburation est importante, il faut en réduire la valeur pour que ce ne soit pas un problème. Une barre de grand diamètre aura une plus grande profondeur de décarburation qu'un fil de diamètre réduit.

III.3.2.5. Façons de minimiser la formation de la calamine et la décarburation :

1. Procédure de chauffage : chauffer le plus tard possible et minimiser le délai de la zone de saturation.
2. Rapport d'allumage : travailler à de bas niveau d'oxygène libre pour formation minimale de calamine.
3. Pression du four : maintenir une pression positive du four pour réduire l'oxygène.
4. Brûleurs d'équilibrage : éviter toute surchauffe/chauffe insuffisante localisée.
5. Fermeture portes : garder les portes du four fermées, pour réduire l'oxygène.
6. Retards : répondre aux retards par la réduction de la température du four.
7. Communication : le personnel du laminoir doit informer l'opérateur du four des temps de retard évalué, des temps d'arrêts prévus, et des temps de démarrage.

III.3.3. Zone train de laminage :

III.3.3.1. Décalamine :

Au défournement de la billette, La décalamine enlève la calamine avec collée aux surfaces des billettes produite pendant l'opération de chauffage à l'intérieur du four, avec une pression d'eau 240 bar.



Figure III.8 : Décalamine.



Figure III.9 : Calamine.

III.3.3.2.Extracteur :

L'extracteur situé après la décalamine pour guidage de la billette et donner une vitesse initiale avant le laminage.



Figure III.10 : Extracteur.

III.3.3.3. Cisaille d'urgence :

A l'entrée de train de laminage on a une cisaille pour le cisaillement d'urgence de la billette s'il y a un problème dans le lingé de laminage.



Figure III.11 : Cisaille d'urgence.

III.3.3.4. Cages de laminage :

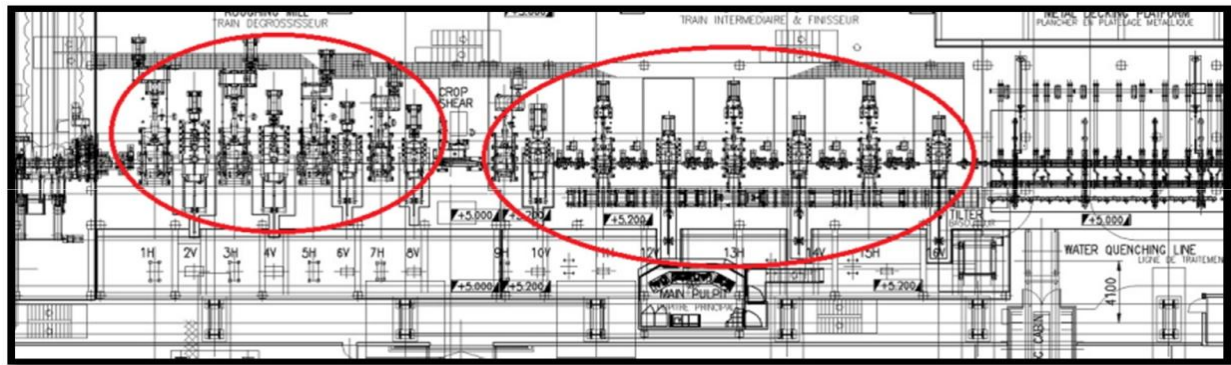


Figure III.12 : Cages et tendeurs de laminage.

Le train de laminage est composé de trois sections de laminage : dégrossisseuses, intermédiaires et finisseuses où la section de la billette enfournée est réduite dans les cages successives ayant alternativement des cylindres horizontaux et verticaux. Le traitement thermique en aval de la cage finisseuse refroidit à l'eau la barre laminée pour obtenir les caractéristiques mécaniques requises pour les ronds à béton destinés à la construction.

Conditionnement : Après le refroidissement, les installations du finissage conditionnent les barres laminées suivant les spécifications des clients par la découpe en longueur finale et la mise en fardeaux.

✓ Paramètres importants pour le laminage :

- Température
- Pourcentage de réduction
- Vitesse de déformation

Tableau III.3 : Fourchette Température et Vitesse de laminage

	Unité	Dégrossisseur	Intermédiaire	Finisseuse
Température	Degré/c	1000-1100	950-1050	850-950
Vitesse	m/s	0.1-1	1-10	10-120

III.3.3.4.1. Les cages :

Le laminoir est composé à 16 cages

Dégrossisseuses : les cages (1 - 2 - 3 - 4 - 5)

Intermédiaires : les cages (6 - 7 - 8 - 9 - 10)

Finisseuses : les cages (11 - 12 - 13 - 14 - 15 - 16)

Chaque cage constitue les équipements suivants:

- Moteur électrique.
- Réducteur de vitesse.
- Deux cylindres.
- Deux allonges.
- Système de refroidissement pour les paliers des cylindres.

Dans l'entrée et la sortie de chaque cage on observe un guide pour préciser l'entrée de la billette et éviter les problèmes dans la serai de laminage.



Figure III.13 : Cage de laminage

III.3.3.4.2. Guide d'entrée :

Le guide d'entrée est déterminée par l'orientation et la stabilité du métal laminé dans les cannelures sur le cylindre de laminage.

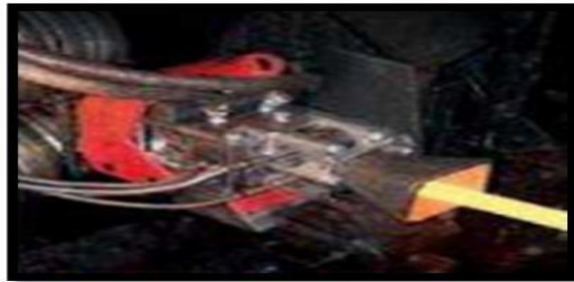


Figure III.14: Guide d'entrée de produit laminé.

III.3.3.4.3. Guide de sortie :

Le guide de sortie sert à la réception de la barre laminée puis la dirigée vers la cannelure du cylindre de la cage suivante afin de stabiliser la barre.

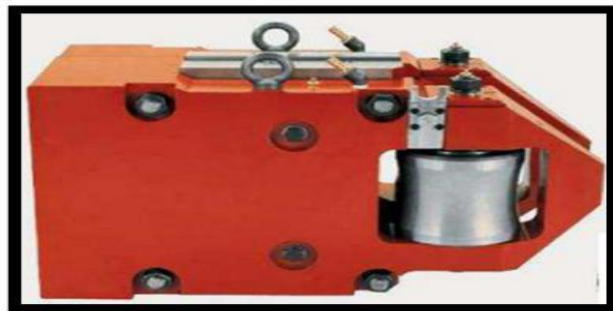


Figure III.15: Guide de sortie de produit laminé.

III.3.3.4.4. Rôle des cages :

Le rôle des cages est de faire réduire la section de la billette en plusieurs passes jusqu'à l'obtention du produit fini selon la gamme de production demandée.

Les avantages de la configuration des cages horizontales et verticales sont :

- Elimination des boîtes de retournement ou de torsion dans le train.
- Très bonne qualité du produit fini.
- Les cages horizontales et verticales de même taille sont convertibles et interchangeables.

- Réglage symétrique du jeu entre cylindres (écartement entre cylindres).
 - Les paliers sont protégés à l'aide des brides de labyrinthe avec double joint D'étanchéité contre l'infiltration d'eau et la calamine.
- ✓ Après la cage 8 on a une cisaille volante pour copier la tête et la crue de métal pour :
- « Eliminer les déchireurs à la tête.
 - « Pour une bonne précision d'entrée de métal a la cage 9.
 - « Pour un produit bien fini.
 - « Pour éviter la casse des cylindres

III.3.3.4.5 Cylindres de laminage :

Définition :

Les cylindres de laminage sont les outils essentiels de ce procédé de mise en forme, ils sont soumis à de fortes sollicitations cycliques tant mécaniques que thermiques. L'optimisation de leur durée de vie est donc particulièrement cruciale car leur détérioration influe de manière pénalisent sur la qualité de surface des produits ainsi que sur les arrêtes des installations industrielles, dans un souci multiple d'augmenter la durabilité des outils, la qualité des produits et de réduire le cout, il est nécessaire de contribuer à la maîtrise de ces dégradation et en particulier à celle de l'usure.



Figure III.16: Cylindres de laminage.

Tableau III.4 : Diamètres des cylindres :

Cages	Diamètre maximal (mm)	Diamètre minimal (mm)
1 -2 - 3	650	560
4- 5	550	470
6- 7 -8- 9 -10	450	388
11-12-13 -14-15-16	350	315

III.3.4. Zone de finissage :

III.3.4.1. Thermex:

La ligne de refroidissement rapide et trempe des barres est placée, d'habitude, entre la dernière cage du laminoir et le lit de refroidissement. Le but de Thermex est de refroidir rapidement la barre chaude et de la tremper lorsqu'elle arrive du laminoir, de façon à éviter des traitements couteux hors ligne. L'eau de refroidissement vient à partir des pompes. Le refroidissement se fait selon le diamètre des profils et leur caractéristique mécanique voulue.

Suivant les conditions de laminage, la limite d'élasticité 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 bar en fonction de diamètre de rond à béton, entre les 2 chambre il y a un traineur pour garder la même vitesse dans les 2 chambres.

-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 caractéristiques mécaniques du produit fini et obtenir un métal dur en surface et ductile en cœur.



Figure III .17 : Thermex ouvert.

Traitements Thermiques :

Traitement à l'eau (Thermex QTB) et traitement à l'air (cooling bed) :

La trempe : est obtenue en exposant les barres d'acier, qui à la fin du processus de laminage ont une très haute température, à une pulvérisation d'eau froide au niveau de thermes QTB, ce qui provoque un refroidissement très rapide de la surface de la barre entraînant une transformation martensitique à la même température. L'acier martensitique non 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 (cooling bed) jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante.



Figure III.18 : 03 phases finales de rond à béton TEMPCORE

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 perlite simple et d'une zone de transition en bainite.

III.3.4.2. Traineur de TERMEX :

Situé entre le TERMEX et la cisaille de 96m, le traineur assure une vitesse constante de la barre pendant le laminage, sa vitesse dépasse 5% la vitesse de la barre.

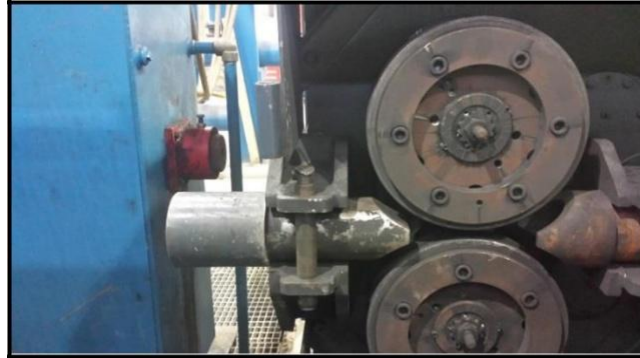


Figure III.19 : Traineur de Thermex entre les 2 chambres

III.3.4.3. Traineur cisaille à froid de 96m:

Il est pour but de tirer le métal vers la cisaille de 96 m.



Figure III.20 : Traineur cisaille à froid de 96 m.

III.3.4.4. Cisaille à froid de 96m:

A partir des opérations programmées, la cisaille travail à l'aide d'une photocellule qui détecte la longueur du métal qui, d'une longueur de 96 mètre; 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 COOLING BED (refroidissement à l'air libre).

III.3.4.5. Déviateur des barres :

Utilisé pour dévié les barres de rond à béton au système de refroidissement à l'air (COOLING BED).



Figure III.21 : Déviateur des barres.

III.3.4.6. Système de refroidissement à l'air (COOLING BED) :

La température de rond à béton à l'entrée de COOLING BED est environ de 450 °C, le but de COOLING BED est de maintenir la barre bien alignée et aussi pour adoucir le produit fini et améliorer les caractéristique mécanique (le traitement thermique auto-revenu).

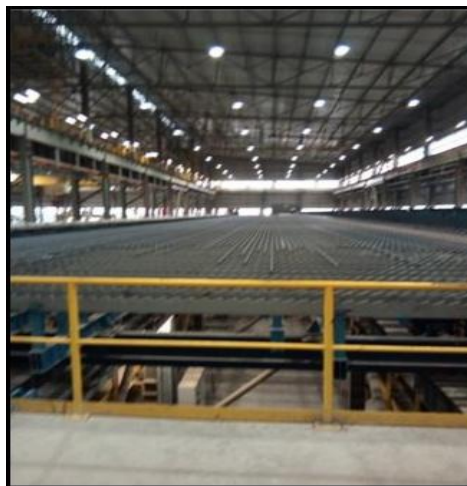


Figure III.22 : Système de refroidissement à l'air (COOLING BED).

III.3.4.7. Cisaille à froid de 12 m :

Elle sert à couper les barres en longueurs commerciale en générale 12 m.



Figure III.23 : Cisaille à froid de 12 m.

III.3.4.8. Ligature en fardeaux :

Le produits fini obtenu sous forme de barres, est conditionné et ligaturé sous forme de fardeaux.



Figure III.24 : Ligature en fardeaux.

III.3.4.9. Etiquetage :

Une étiquette métallique est attachée manuellement au moyen de fil de fer à l'extrémité de chaque fardeau.

Poids L'étiquette comporte les informations suivantes :

- N° de coulée.
- N° de fardeau.
- Date.

- Diamètre du produit.
- Grade
- Longueur des barres.



Figure III.25 : Etiquette métallique.

III.3.4.10. Zone de stockage :

Chaque fardeau est pesé et acheminé vers l'aire de stockage appropriée. Le poids des fardeaux moyens, sont comprises entre 3 tonnes et 3,5 tonnes (Poids max 5T) elles seront expédiée pour la vente directe.



Figure III.26 : Zone de stockage.

CHAPITRE IV :
Défauts des barres d'armature lors du
laminage

CHAPITRE IV : DEFAUTS DES BARRES D'ARMATURE LORS DU LAMINAGE

Introduction :

Le laminage permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques du produit fini en agissant sur les défauts issus de l'élaboration de l'acier et de la coulée continue. Prenons le cas de la ségrégation qui peut être atténuée lors de la mise en forme de la barre par le phénomène de diffusion limitée. La déformation subie par la barre lors des passes successives permet également de refermer les porosités et de déformer voire fragmenter certaines inclusions [53].

IV.1. Défauts de laminage :

IV.1.1. Défauts géométriques :

Les machines et les outils (cylindres, cages...) ne sont pas infiniment rigides, se déforment, et cèdent élastiquement sous les efforts appliqués. Cela perturbe aussi la géométrie des produits, créant des problèmes de profil et de planéité des produits plats. Des problèmes de réglage des outils de production peuvent avoir des conséquences du même ordre.

Des défauts géométriques peuvent apparaître à la suite de la déformation locale du rouleau en contact avec la tôle dans l'emprise. Les contraintes de pression dans le contact sont relaxées par l'élargissement de la tôle qui est fort si les rapports épaisseur/largeur et épaisseur/longueur de contact sont grands (c'est le cas du laminage à chaud). Cet élargissement est faible car inhibé par le frottement des outils dans le cas du laminage à froid. Les contraintes de contact, donc les déformations des cylindres, seront très fortes si on lamine des produits minces parce que les effets du frottement seront exacerbés par le grand rapport surface/volume. Le rôle des efforts de tension et contre tension imposées par les moteurs de bobinage est dans ce cas primordial pour minimiser ces défauts. A ces défauts d'origine mécaniques se superposent des déformations d'origine thermiques, liées à la dilatation, qui conduit à une hétérogénéité du diamètre du cylindre le long de son axe. Ces dilatations peuvent entraîner des hétérogénéités d'épaisseur des produits finaux [54].

IV.1.2. Défauts métallurgiques et microstructuraux :

Les défauts microstructuraux sont très dépendants de l'alliage considéré. Ce sont des tailles de grains hétérogènes, des textures cristallographiques mal orientées, des inclusions non métalliques, des porosités, des fissures. Certains de ces défauts sont hérités des structures de coulée.

Les discontinuités (porosités, fissures et criques), qui relèvent des phénomènes et mécanismes d'endommagement des matériaux, sont engendrées par la conjugaison d'états de contrainte de tension et de l'existence d'hétérogénéités : d'où un couplage mécanique/métallurgie à l'échelle microscopique [54].

De plus les paramètres de structure granulaire et de texture évoluent autant par la déformation elle-même que lors des recristallisations induites par la déformation à chaud (recristallisation dynamique) ou lors des traitements thermiques (recristallisation statique). Leur prévision passe par l'utilisation des modèles de métallurgie physique appropriés, eux-mêmes couplés à la thermomécanique [54].

IV.1.3 Défauts de surface :

Parmi les défauts de surface se distinguent les défauts de type chimique comme la corrosion, incrustation d'oxyde, pollutions par les lubrifiants ou des défauts de rugosités. Ce dernier cas est très directement contrôlé par la mécanique du contact produit-cylindre. Des microfissures peuvent provenir de contraintes de traction superficielle, des porosités peuvent être la conséquence du piégeage de lubrifiants (poches d'huile) ou de phénomènes de corrosion, du rebouchage incomplet de trous initiaux induits par un décapage par exemple.

Pour minimiser ces déformations ou corriger ces défauts, on peut recourir à des actionneurs de profil, en pratique des vérins d'équilibrage du cylindre de travail ou de cambrage des cylindres d'appui. Le pilotage de ces actionneurs n'est toutefois pas aisé. D'autres techniques de correction peuvent être utilisées : la translation des cylindres de travail (roll shifting) [54].

IV.2. Défauts des barres d'armature lors du laminage :

Malgré les bienfaits du laminage sur la santé interne des produits issus de la coulée continue, des défauts peuvent apparaître si l'outil de production est mal maîtrisé.

Les défauts observés en laminage peuvent être classés en deux catégories [55] :

Les défauts dus à un mauvais réglage du laminoir

Les défauts apparaissant lors de la mise en forme

IV.2.1. Défauts dus à un mauvais réglage du laminoir :

Un mauvais réglage du train de laminage peut engendrer un grand nombre de défauts qui auront des conséquences non négligeables sur la qualité du produit fini. Parmi ces défauts on retrouve :

- la pincure : elle se produit lorsque la levée entre les cylindres n'est pas assez élevée, ce qui a pour conséquence un débordement de l'acier entre les cordons dû à une arrivée trop importante de matière (Figure IV.1).
- le rond maigre : il est la conséquence d'une levée entre les cylindres trop importante et un manque de matière apparaît sur les bords libres (Figure IV.1).
- les cannelures marquées en creux : des morceaux de la cannelure des cylindres se détachent et donc un marquage sur la barre laminée apparaît. Ce défaut est dû à un mauvais refroidissement des cylindres.
- le cintrage : ce défaut est fréquent lors du laminage de profilés. Il est dû à un mauvais réglage des outillages (vitesse de rotation des cylindres non identique dans une même cage) ou à un refroidissement hétérogène.

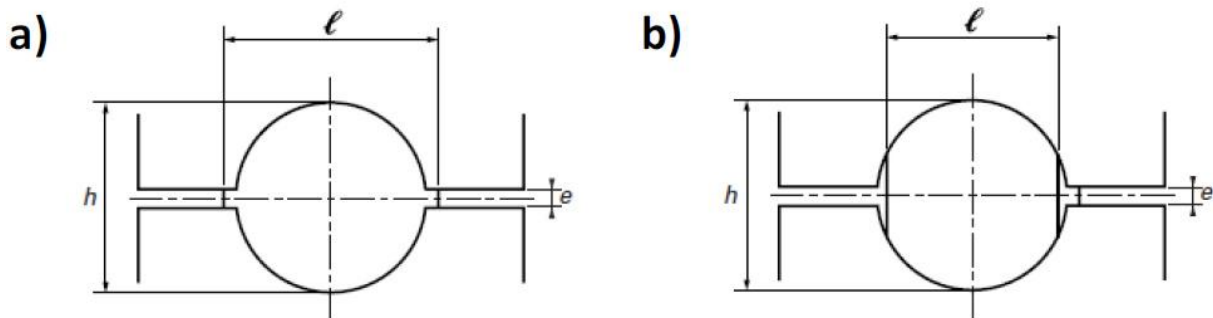


Figure IV.1 : Exemple : (a) de la pincure et(b) d'un rond maigre [56]

IV.2.2. Défauts apparaissant lors de la mise en forme :

Les défauts recensés lors du laminage apparaissent généralement en peau de la barre laminée [57] :

- les criques de forgeabilité : ces criques apparaissent lorsque la température de laminage est trop faible ou qu'elles sont déjà présentes sur le bloom issu de la coulée continue. Lors du laminage, ces défauts ont tendance à s'allonger.

- les tapures de refroidissement : c'est une rupture du métal provoquée par des tensions qui sont dues à un gradient de température trop important entre le cœur et la peau du produit laminé. Ce défaut est perpendiculaire à la surface de la barre et se propage jusqu'à cœur.

- les tapures de réchauffage : c'est l'inverse de la tapure de refroidissement. Si la température en peau de la barre augmente trop rapidement et que le cœur reste froid alors la dilatation va créer des tensions conduisant à une rupture du métal en partant du cœur.

- la décarburation : c'est la réduction de la teneur en carbone de la surface qui se produit en présence d'oxygène et avec une température élevée. La décarburation apparaît à chaque étape de chauffage. Les aciers avec une forte teneur en carbone y sont fortement sensibles.

IV. 3. Type de défauts apparus lors la production de rond à béton à l'AQS BELLARA:

Lors de la production de rond à béton dans l'usine sidérurgique BELLARA les producteurs rencontre des défauts, parmi ces défauts nous mentionnons :

1) Moustache :

Définition : C'est un défaut longitudinal sur l'un ou les deux cotés du métal.

Identification : Visuelle.

Origine :

- Ce défaut se produit dans la 16 ème cage quand le jeu entre les galets est non convenable (diminution du jeu, T° plus élevée ou excès de métal) ;
- Mauvais centrage de la boîte à Rx entrée cage 16 par rapport au calibre.

Remède :

- Réglage du jeu des cylindres suivant la gamme ;
- Changement de la boîte d'entrée cage 16 ;
- Recentrer la boîte d'entrer cage 16 ;
- Réglage de la température.

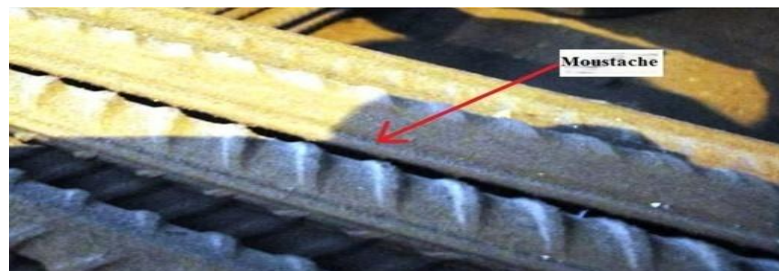


Figure IV.2 : Défaut de moustache.

2) Empreintes :

Définition : Ce sont des bosses ou des caves qui sont apparaissent sur la surface laminée du métal.

Identification : Visuelle.

Origine :

- Dépôt de métal entre les cages N° 9 jusqu'à la cage N° 16 (dépend du diamètre laminé) ;
- Dépôt de métal sur le calibre de la cage 16.

Remède :

- Passage du projet pour réglage métal de la cage N° 9 jusqu'à la cage N° 15 sauf la cage N°14 (pour le profil (N12 – N14- N16) ;
- Contrôle de tous les éléments de guidage (alignement) jeu de galet plus changement de cannelure dans la 16ème cage.



Figure IV.3 : Défaut d'empreinte.

3) Replure :

Définition : Ce sont des écailles fines qui se produisent sur la surface laminée.

Identification : Visuelle.

Origine :

- T° du four non uniforme ;
- Non respect du système de refroidissement cage ;
- Mauvais état de surface des calibres ;
- Désaxage des cylindres cages finisseuses 13 – 14 – 15.

Remède : - Réglage de la température et le système de refroidissement des billettes ;

- Changement des cannelures ; Réglage désaxage des cylindres.

4) Hors tolérance diamètre :

Définition : Quand le diamètre du métal dépasse les écarts de tolérance supérieure ou inférieure on dit que le métal est hors Tolérance en plus ou en moins.

Identification : Visuelle.

Origine :

- Mauvais réglage jeu des cylindres des cages finisseuse ;
- Usures des calibres ;
- Mauvais remplissage métal des calibres finisseurs.

Remède :

- Réglage du jeu des cylindres dans les cages finisseuses ;
- Changement des calibres usés ;
- passage projets sur cages finisseuses (13, 14, 15,16) et contrôle dimensions.

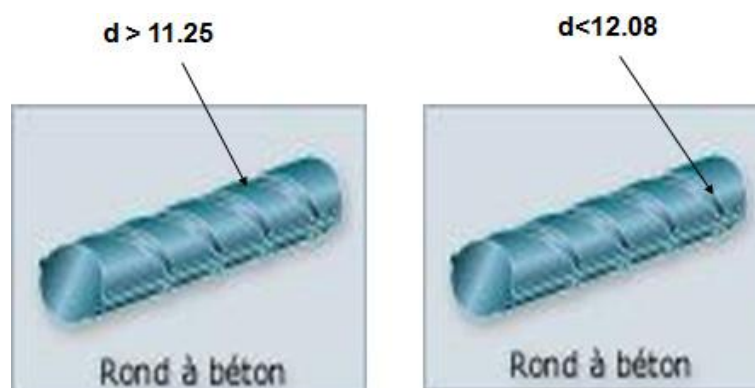


Figure IV.4 : Hors tolérance diamètre.

5) Ecrasement du diamètre :

Définition : Métal laminé des tolérances demandées.

Identification : Visuelle et mesure au pied à coulisse.

Origine :

- Diminution du jeu dans les cages finisseuses ;
- Mauvaise retournement a la sortie cage N° 15 ;
- Mauvais réglage des vitesses de laminage ;

- désaxage des cylindres cage 16.

- Remède :**
- Réglage du jeu dans la cage finisseuse ;
 - Réglage du retournement sortie cage N° 15 ;
 - Réglage des vitesses de laminage ;
 - Eliminer le désaxage des cylindres de la cage 16.

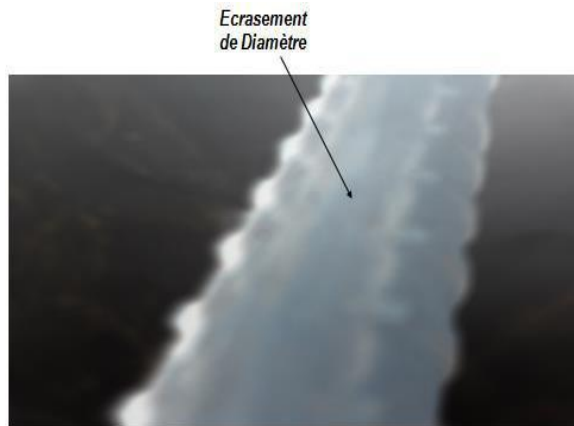


Figure IV.5 : Écrasement de diamètre.

6) Écrasement de verrous :

Définition : Absence définitive des verrous.

Identification : Visuelle.

- Origine :**
- Défaut dans les cannelures ;
 - Usure crans verrou cage 16 ;
 - Usure des cannelures dernières cages finisseuses ;
 - Faible débit métal en cage 16.

- Remède :**
- Changement des cannelures avec réglage du jeu ;
 - Remplir le calibre de la cage 16 en laminant des projets sur les cages finisseuses (13, 14, 15,16) et en vérifiant les dimensions.

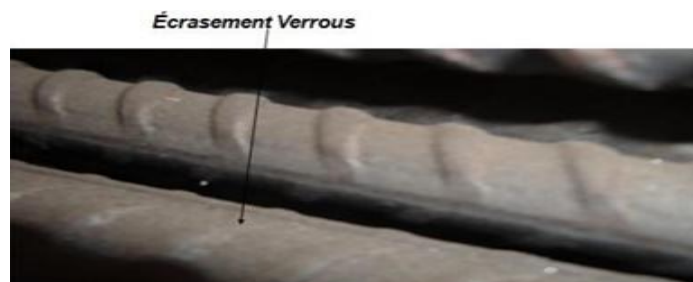


Figure IV.6 : Écrasement de verrous.

7) Hors tolérance de nervure :

Définition : la hauteur de la nervure n'est pas respectée

Identification : Visuel & Mesure au Pied à Coulis

Origine :

- Mauvais réglage du jeu entre les cylindres de la cage finisseuse
- calibre de la cage finisseuse utilisé

Remède :

- Réglage du jeu de la cage finisseuse
- changement de calibre de la cage finisseuse



Figure IV.7 : Hors tolérance de nervure.

8) Absence de verrous :

Définition : Absence total des verrous sur la barre,

Identification : Visuel

Origine : Absences de crantage dans la cannelure de la dernière cage

Remède : Changement cannelures de la dernière cage Finisseuse



Figure IV.8 : Absence des verrous.

9) Chutes :

Définition : Barres inférieures à 12000mm après cisaille 51 (la norme +100-0).

Identification : Visuelle et mesure.

Origine :

- Défaut de coupe au niveau de la cisaille 51 ;
- Défaut d'optimisation de longueurs ;
- Longueurs des billettes.

Remède : - Réglage des paramètres des coupes au niveau de la cisaille 51.



Figure IV.9 : Défaut de chutes.

10) Fissures :

Définition : C'est une ouverture ou une entaille longue et étroite sur la surface laminée du métal.

Identification : Visuelle.

Origine :

- Mauvaise qualité interne des billettes ;
- Désaxage des cylindres ;
- Boîte déchireuse défectueuse.

Remède :

- Respecter le tonnage prévisionnel des cannelures et des cages ;
- Eliminer le désaxage des cylindres des cages ;
- Réglage du refroidissement du train selon la gamme.



Figure IV.9 : Défaut de fissure.

11) Ondulation :

Définition : Arc ondulé non rectiligne sous forme de vague.

Identification : Visuelle.

Origine - Non respect des pressions d'eau pour le premier et le deuxième tronçon du thermex ;

- Mauvais état de la voie à rouleau après thermex.

Remède : - Remise en état partiel de la voie à rouleaux après thermex ;

- Respect des pressions d'eau pour le premier et le deuxième tronçon du thermex

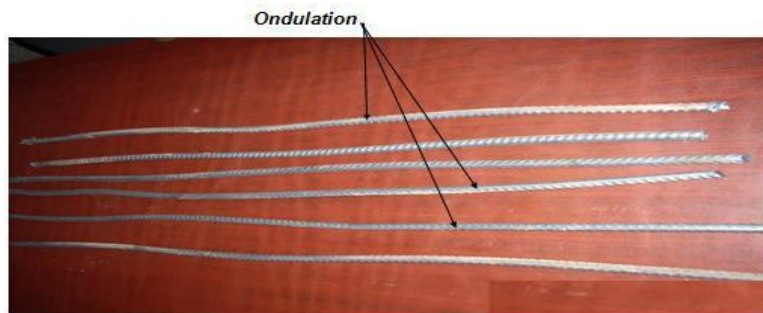


Figure IV.10 : Défaut d'ondulation.

12) BNA : (Barre non alignée)

Définition : Désalignement des barres

Identification : Visuel

Origine : - Mauvais fonctionnement de la Voie à rouleau après cisaille à froid

- Coincement des barres au niveau table de comptage

Remède : - Bon fonctionnement de la Voie à rouleau après cisaille à froid

- Eviter les coincements des barres au niveau table de comptage



Figure IV.11 : Défaut de barre non alignée.

13) Tâche d'huile :

Définition : Des barres tachées par l'huile

Identification : Visuel

Origine : - Eclatement du flexible d'huile zone Formation Fardeau (FF)

-L'huile des ponts roulants

Remède : - Élimination des fuites d'huile

-Entretien des ponts roulants

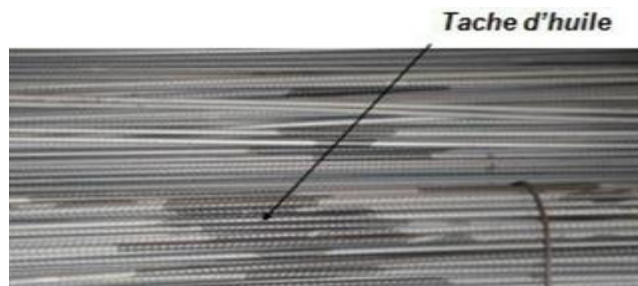


Figure IV.12 : Défaut de taches d'huile.

Les taux des différents défauts cités ci-dessus durant la production des barres d'armature ne m'ont pas été remis par les services de qualité.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :

Le procédé TEMPCORE utilisé à BELLARA est une méthode économique pour produire des barres d'armature à une haute résistance. Comparé aux barres torsadées, le processus TEMPCORE a une évidence avantages à économiser le coût du traitement de torsion mécanique qui est cher surtout pour les barres de petit diamètre. Un autre avantage L'effet de la trempe est très important et évite l'introduction des éléments D'alliage (Vanadium, Niobium) qui sont couteux et difficiles à maîtriser leurs concentrations au cours de l'élaboration.

Le procédé TEMPCORE est un procédé de traitement thermique en ligne qui implique une trempe et auto-tempérant. L'acier ordinaire à faible teneur en carbone est utilisé dans le processus conduisant à avantages offerts par la couche extérieure martensitique durcie et trempée, douce noyau ferrite-perlite et chimie simple. Les aciers d'armature TEMPCORE sont caractérisés par des propriétés uniques :

- ✓ Haute résistance grâce à la couche extérieure trempée de Martensite.
- ✓ Haute ductilité grâce au noyau ferrite-perlite qui permet le pliage, la galvanisation et le redressement sans fissures ni perte de propriétés de traction.
- ✓ Maintient la résistance et la ductilité même à des températures très élevées ou basses.
- ✓ Absence de fragilisation par l'âge de déformation et entièrement soudable.
- ✓ Possède des propriétés de résistance sismique.

D'après les analyses et l'observation métallographique des échantillons avant et après traitement thermique, nous pouvons conclure que la technologie TEMPCORE est suffisante, ce qui signifie qu'il permettra d'obtenir dans la couche superficielle de la barre une structure constituée de martensite (éventuellement aussi de la bainite), qui se transforme après auto-revenu en martensite de revenu. L'optimisation des paramètres du processus TEMPCORE (à la production de rond à béton) permet d'obtenir de très bonnes propriétés de résistance.

CONCLUSION GENERALE

Le Complexe sidérurgique de BELLARA est doté de la technologie la plus avancée au monde et comprend neuf unités de production respectueuses de l'environnement, qui garantissent une efficacité maximale de la production et une qualité des produits conforme aux normes internationales. L'AQS a commencé la production et la commercialisation des produits en acier de rond à béton et de fil machine à la fin de l'année 2017. La capacité de production initiale du Complexe est d'environ 2 millions de tonnes par an de rond à béton et fil machine de différents diamètres. La deuxième phase du programme d'investissement sera consacrée à la production d'autres types d'aciers spéciaux utilisés dans de nombreuses industries amenant ainsi la capacité de production à plus de 4 millions de tonnes par an.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] OLIVER GAILLET .Etude de la longueur d~ancrage minimale pour les aciers de flexion lisses Dans les poutres en béton armé. Thèse de Maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, 1999.
- [2] A comparison between the TEMPRIMAR and TEMPCORE processes for production of high strength rebars." in HSLA steels, metallurgical and applications, Proceedings of an international conference on HSLA steels, Beijing, ASM, 909- 912.
- [3] J. Nikolaou, et al, Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes.
- [4] H. Khalifa, G. M. Megahed, R. M. Hamouda, and M. A. Taha, "Experimental Investigation and simulation of structure and tensile properties of TEMPCORE treated rebar," *Elsevier B.V.*, 2015.
- [5] J. F. Noville and M. Crm, "TEMPCORE ®, the most convenient process to produce low cost high strength rebars from 8 to 75 mm Contact data Summary Key Words Principle of the TEMPCORE process TEMPCORE tailor-made design High strength (weldable) grades & gain in steel composition," vol. 21, no. June, pp. 15–19, 2015.
- [6] P. Simon, "Optimization of. TEMPCORE installations for," vol. 69, no. 2, pp. 1–6, 1990.
- [7] G. Rehm, "Assessment of Concrete Reinforcing Bars made by the TEMPCORE Process(1)," no. 6, pp. 300–307, 1977.
- [8] P. F. Louren, "Study of steel bars for use in reinforced concrete produced by the'TEMPCORE' process," no. October, 2012.
- [9] Study of steel bars for use in reinforced concrete produced by the"TEMPCORE" process.
- [10]J. Santos and A. A. Henriques, "Strength and Ductility of Damaged TEMPCORE Rebars,"*Procedia Eng.*, vol. 114, pp. 800–807, 2015.
- [11]A. Archive, O. Data, and N. S. H. Group, "The TEMPCORE Process," vol. 1985, no. August, 2016.

[12] Association française des certifications des armatures de béton www.afcab.org. Org. inf@afcab, Pour les aciers TEMPCORE 500, Fabriqués sur le site de LONATO DEL GARDA (IT).

[13] ARCER, Comisión Asesora - Monografía 1: Aceros con características especiales de ductilidad para hormigón armado. Madrid: ARCER, 2000.

[14] Tosyali industrie de fer et l'acier Algérie

[15] <https://www.ispatguru.com/tempcore-process-for-the-production-of-tmt-reinforcement-bars/>.

[16] Allen D. E., "Statistical study of the mechanical properties of reinforcing bars," tech. rep., Division of Building Research, National Research Council of Canada Ottawa, April 1972.

[17] Barbara M., Walter S. and Renzo V., "Dual-phase steel rebars for high-ductile R. C. structures, Part 1: Microstructural and mechanical characterization of steel rebars," Engineering Structures, 2007.

[18] <https://www.isoltop.com/Rond-a-b%C3%A9ton>

[19] <https://docplayer.fr/36273883-Le-beton-arme-principe-et-generalites.html>

[20] <https://www.isoltop.com/Rond-a-b%C3%A9ton>

[21] <https://www.toutsurlebeton.fr/mise-en-oeuvre/les-armatures-pour-beton-arme/>

[22] Dotrepe J.C., "Mechanical properties of quenched and self-tempered reinforcing steel at elevated temperatures compared with recommendations of Eurocode 2-part1-2," Materials and structures, 1997.

[23] Bimal K.P. and Surendera K.J., "Impact toughness of high strength low alloy

TMT reinforcement ribbed bar," Bull. Mater.Sci: Indian Academy of Science, 2002.

[24] Popli A.M. and Sahu A.K., "Microstructure and properties of thermomechanically strengthened reinforcement bars: A comparative assessment of plain-carbon and low alloy steel grades," Journal of Materials Engineering and Performance, 1997.

[25] Nikolaou J. and Papadimitriou G.D., “Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened),” 2004.

[26] <https://medium.com/@rebarpeople0/what-is-the-difference-between-tmt-and-twisted-rebars-393e046d8532>

[27] <https://bsrm.com/wp-content/uploads/2016/03/Presentation-Dr.-Fahmi-da-Gulshan-1.pdf>.

[28] <http://www.aciersspeciaux.fr/propri%C3%A9t%C3%A9s-m%C3%A9caniques>

[29] <https://www.google.fr/search?q=principe+de+l%27essai+de+pliage+fer+a+beton&tbm>

[30] <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap4/site/html/6.html#6>

[31] <http://www.crsi.org/index.cfm/basics/rebar-properties>

[32] TABALAIEV K. Étude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformation à froid. Thèse de doctorat, Matériaux de Lyon, 2010

[33] <https://www.ispatguru.com/tempcore-process-for-the-production-of-tmt-reinforcement-bars/>

[34] “Dubai Municipality Note No. 008, Advisory Note on Reinforcing Steels, pp1-18, Jan 1991.”

[35] “The CARES Guide to Reinforcing Steels, Manufacturing Process Routes for Reinforcing Steels.” www.ukcares.co.uk/Guides/Part2, Cited: 20 August 2008.

[36] Singh B. and Kaushik S.K., “Influence of steel-making processes on the quality of reinforcement,” The Indian Concrete journal, 2002.

[37] “The CARES Guide to Reinforcing Steels, Properties of reinforcing steels.” www.ukcares.co.uk/Guides/Part3, Cited: 15 August 2008.

[38] Garbarz B., Żak A., Kuziak R., Wojtas J. et al. inni: Pręty żebrowane do zbrojenia betonu klasy 500 TECOR wytwarzane przez Hutę Ostrowiec SA z zastosowaniem technologii umacniania cieplnego. Prace IMŻ, 2001.

- [39] Marek St. Węglowski (PhD (DSc) Eng.) – Instytut Spawalnictwa, Testing of Materials Weldability and Welded Constructions Department. Fabrication of Reinforcement Bars in Unalloyed Steel.
- [40] <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G12.63-71.pdf>
- [41] <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-G12.63-71.pdf>
- [42] TABALAIEV K. Étude de la structure et des propriétés de l'acier à béton après déformation à froid. Thèse de doctorat, Matériaux de Lyon, 2010.
- [43] Łomozik M.: Metaloznawstwo i spawalność metali. Instytut Spawalnictwa, Gliwice, 1997.
- [44] HIDOURI Abdelmoumen, COURS DE MATERIAUX METALLIQUES, Technologie à ISET Gafsa, 2016-2017.
- [45] Balogun S., Esezobor D., Andeosun S. and Sekunowo O., “Challenges of Producing Quality Construction Steel Bars in West Africa: Case Study of Nigeria Steel Industry,” Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2009.
- [46] Kopeliovich D., “Effect of alloying elements on the mechanical properties of steels.” www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=effect-of-alloying-elements-on-steel-properties, Cited: 26 Septembre 2009.
- [47] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa. Stal. Wydawnictwo WNT, Warszawa 2004.
- [48] BATAILLE Claude, Laminage des produits longs - Cylindres, calibrage, défauts, Techniques de l'Ingénieur, M7903, 2003.
- [49] M7900 Laminage des produits longs Définitions et paramètres (technique de l'ingénieur)
- [50] M 7890 Métallurgie du laminage à chaud (technique de l'ingénieur)
- [51] <https://belgium.arcelormittal.com/fr/>
- [52] [https://fr.qwe.wiki/wiki/Rolling_\(metalworking\)#Surface_defect_types](https://fr.qwe.wiki/wiki/Rolling_(metalworking)#Surface_defect_types)
- [53] D. WILSON Alexander, The influence of thickness and rolling ratio on the inclusion behavior in plates steels, Metallography, Vol. 12: pp. 233-255, 1979.
- [54] M 3065 Laminage - Objectifs et modélisation (technique de l'ingénieur)

[55] BATAILLE Claude, Laminage des produits longs - Cylindres, calibrage, défauts, Techniques de l'Ingénieur, M7903, 2003.

[56]BATAILLE Claude, Laminage des produits longs - Cylindres, calibrage, défauts, Techniques de l'Ingénieur, M7903, 2003.

[57] : BUESSLER P., CHONE J., & ESTIVALET M.C., Evolution des défauts de surface au cours du laminage des produits longs, IRSID, 1988.