

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département De Génie Des Procédés

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

Thème

*Caractérisation microstructurale, mécanique et
électrochimique de l'acier rond à béton du complexe
sidérurgique Algerian-Qatari Steel (AQS) d'El Milia*

Réalisé par :
BELHIMER Insaf

Encadré par :
Dr : BENSABRA Hakim

Promotion 2019/2020

Dédicace

- ✚ A l'honorable et très chère mère RACHIDA qui me donne toujours l'espoir, pour ses encouragements pour son sacrifice.
- ✚ A celui qui me montre toujours comment surmonter les obstacles avec sagesse mon cher père SAMI.
- ✚ A mes deux frères ARAFAT et MOHAMMED REDA.
- ✚ A ma grande mère, notre bougie HAFSA.
- ✚ A mon époux HAMZA qui m'encourage à chaque fois que je perds l'espoir.
- ✚ A mes chers voisines ASMA, AMEL, SAMAH et ABIR.
- ✚ A ALAA qui m'a aidé pour la finalisation de ce travail.
- ✚ A BADIS et TOUFIK
- ✚ A tous les scientifiques de mon pays.

Insaf

Remercîments

✚ Je tiens d'abord remercier ALLAH qui a lui je rends grâce, pour la santé, le savoir et le courage qu'il m'a donné pour finaliser ce modeste travail.

✚ Je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon travail et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire, et particulièrement ;

- Mon encadreur le docteur Hakim BENSABRA pour avoir accepté d'être rapporteur de ce travail, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.
- Aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail ;
- A toute l'équipe de laboratoire d'analyse du complexe AQS, les personnels de laboratoire de recherche de l'université de Jijel (LIME) et l'équipe du laboratoire de physique ;
- J'adresse mes remerciements aussi à tous les enseignants du département de Génie des procédés de l'université de Jijel ;
- Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin pour achever mon travail.

Sommaire

| | |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

Chapitre I

Les aciers ronds à béton

| | |
|--|----|
| 1-Généralités..... | 03 |
| 2-Définition d'un acier..... | 03 |
| 3-Le diagramme d'équilibre fer-carbone | 03 |
| 3.1-diagramme d'équilibre stable..... | 03 |
| 3.2-diagramme d'équilibre métastable..... | 03 |
| 3.3-les points de transformations..... | 04 |
| 4-Composition chimique des aciers et rôle des éléments..... | 05 |
| 5-Constituants structuraux des aciers..... | 05 |
| 5.1-Constituants métallographiques d'équilibre..... | 06 |
| 5.1.1-La ferrite..... | 06 |
| 5.1.2-L'austénite..... | 06 |
| 5.1.3-La cémentite..... | 06 |
| 5.1.4-La perlite..... | 07 |
| 5.2-Constituants métallographiques issus des traitements thermiques..... | 07 |
| 5.2.1-La troostite..... | 07 |
| 5.2.2-La bainite..... | 08 |
| 5.2.3-La sorbite..... | 08 |
| 5.2.4-La martensite..... | 08 |
| 6-Les classes des aciers..... | 09 |
| 7-Les types de l'acier..... | 09 |
| 8-Utilisation de l'acier dans le domaine de construction..... | 09 |
| 9-L'acier rond à béton..... | 10 |
| 9.1-structure des aciers ronds à béton..... | 10 |
| 9.2-Propriétés des aciers d'armatures..... | 11 |

| | |
|---|----|
| A-Propriétés physiques..... | 11 |
| B-Propriétés chimiques..... | 11 |
| C-Propriétés mécaniques..... | 11 |
| 10-Types d'armatures..... | 12 |
| 11-Adhérences acier/béton..... | 13 |
| 12-Traitements thermiques..... | 14 |
| 12.1-La trempe..... | 14 |
| 12.1.1-Les types de la trempe..... | 14 |
| A-La trempe martensitique..... | 14 |
| B-La trempe bainitique..... | 15 |
| C-La trempe austénitique..... | 15 |
| 12.2-Lé revenu..... | 15 |
| A-Le revenu de détente..... | 15 |
| B-Le revenu d'adoucissement..... | 15 |
| 12.3-Le recuit..... | 15 |
| A- Le recuit d'homogénéisation..... | 16 |
| B- le recuit de régénération..... | 16 |
| C-Le traitement de recristallisation..... | 16 |
| 13-La mise en forme par déformation des aciers..... | 16 |
| 13.1-Le laminage..... | 16 |
| A-Laminage à chaud..... | 16 |
| B-le laminage à froid..... | 17 |
| 13.2-applications..... | 17 |
| 13.3-Caractéristiques..... | 18 |

Chapitre II

Corrosion des métaux

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1-Généralités..... | 19 |
| 2-Définition de la corrosion..... | 19 |

| | |
|---|----|
| 3- Causes de la corrosion..... | 19 |
| 4-Classification de la corrosion..... | 20 |
| 4.1-Corrosion chimique (sèche)..... | 20 |
| 4.2-Corrosion bactérienne..... | 20 |
| 4.3-Corrosion bactérienne..... | 21 |
| 5-Morphologie de la corrosion..... | 21 |
| 5.1-Corrosion uniforme..... | 21 |
| 5.2-Corrosion localisée..... | 21 |
| A-Corrosion par piqûres..... | 21 |
| B-Corrosion intergranulaire..... | 22 |
| C-Corrosion sous contrainte..... | 22 |
| D-Corrosion par crevasses..... | 23 |
| E-Corrosion par érosion..... | 23 |
| F-Corrosion galvanique..... | 24 |
| G-Corrosion sélective..... | 24 |
| H-Fragilisation par l'hydrogène..... | 25 |
| 6-Facteurs de corrosion..... | 25 |
| 7-Thermodynamique de la corrosion électrochimique..... | 26 |
| 7.1-Potentiel d'équilibre d'une électrode..... | 26 |
| 7.2-Potentiel de dissolution ou de corrosion..... | 26 |
| 7.3-Diagramme de Pourbaix..... | 27 |
| 7.4-Diagramme potentiel-pH du fer..... | 28 |
| 8-Aspect cinétique de la corrosion électrochimique..... | 28 |
| 8.1-Généralités..... | 28 |
| 8.2-Courbe de polarisation..... | 28 |
| 8.3-Etude de la surtension..... | 29 |
| 8.4-Vitesse des réactions de corrosion..... | 30 |

| | |
|---|----|
| 9-Corrosion des aciers dans le béton..... | 31 |
| 9.1-Les types de corrosion dans le béton..... | 31 |
| 9.2-Les étapes de corrosion..... | 31 |
| 9.3-Dépassivation des armatures..... | 32 |
| A-Attaque par les chlorures..... | 32 |
| 9.4-Protection contre la corrosion dans le béton..... | 33 |

Chapitre III

Partie expérimentale

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1-But..... | 24 |
| 2-Matériau de l'étude..... | 24 |
| 3-Préparation des échantillons..... | 25 |
| 4-Milieus électrolytiques..... | 26 |
| 5-Techniques expérimentales..... | 27 |
| a-Etude microstructurale..... | 27 |
| b-Mesure de dureté..... | 27 |
| c-Analyse électrochimique..... | 29 |

Chapitre IV

Résultats et analyses

| | |
|--|----|
| 1-Analyse microstructurale et mesure de dureté..... | 41 |
| 1.1-Analyse microstructurale..... | 41 |
| 1.2-Mesure de dureté..... | 43 |
| 2-Analyse électrochimique..... | 44 |
| 2.1-Mesure du potentiel de corrosion..... | 44 |
| 2.2-Courbes de polarisation potentiodynamique..... | 47 |
| 2.3-Spectroscopie d'impédances électrochimiques..... | 48 |
| 3.Discussion des résultats..... | 50 |

Conclusion générale..... 51

Référence bibliographique

(

Liste des figures

Chapitre I

Les aciers ronds à béton

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : diagramme d'équilibre Fer-cémentite..... | 04 |
| Figure I.2 : La ferrite..... | 06 |
| Figure I.3 : L'austénite..... | 06 |
| Figure I.4 : La cémentite..... | 07 |
| Figure I.5 : La perlite..... | 07 |
| Figure I.6 : La troostite..... | 08 |
| Figure I.7 : La bainite..... | 08 |
| Figure I.8 : La sorbite..... | 08 |
| Figure I.9 : La martensite..... | 09 |
| Figure I.10 : La structure ferrito-perlitique..... | 11 |
| Figure I.11 : La structure perlito-ferritique..... | 11 |
| Figure I.12 : Rond lisse..... | 13 |
| Figure I.13 : Rond HA (crénelé)..... | 13 |
| Figure I.14 : Adhérence d'une armature à béton..... | 14 |
| Figure I.15 : cycle thermique de trempe..... | 15 |
| Figure I.16 : Procédé de laminage..... | 17 |
| Figure I.17 : Les applications des aciers laminés..... | 18 |

Chapitre II

Corrosion des métaux

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Schéma traduisant la cause de la corrosion atmosphérique du fer.. | 19 |
| Figure II.2 : La corrosion sèche..... | 20 |
| Figure II.3 : La corrosion bactérienne..... | 20 |
| Figure II.4 : La corrosion uniforme..... | 21 |
| Figure II.5 : Représentation schématique de la corrosion par piqûres | 22 |
| Figure II.6 : Corrosion intergranulaire de l'alliage 2024 T351, après 24 h d'immersion dans une solution 0,1 M de Na ₂ SO ₄ + 0,1 M de NaCl..... | 22 |
| Figure II.7 : Représentation schématique de la corrosion sous contrainte..... | 23 |

| | |
|--|----|
| Figure II.8 : Corrosion <i>par crevasses</i> d'un acier allié sous un joint..... | 23 |
| Figure II.9 : Corrosion par érosion dans une zone turbulente..... | 23 |
| Figure II.10 : Représentation schématique de la corrosion par érosion..... | 24 |
| Figure II.11 : Représentation schématique de la corrosion galvanique..... | 24 |
| Figure II.12 : La corrosion sélective..... | 24 |
| Figure II.13 : Fragilisation par l'hydrogène..... | 25 |
| Figure II.14 : Diagramme de Pourbaix du Fer..... | 28 |
| Figure II.15 : Courbe de polarisation..... | 29 |
| Figure II.16 : Diagramme de Tutti..... | 31 |
| Figure II.17 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorure..... | 32 |

Chapitre III

Partie expérimentale

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Spectromètre utilisé au niveau du complexe AQS..... | 35 |
| Figure III.2 : Echantillons bruts prélevés de l'AQS..... | 35 |
| Figure III.3 : Echantillons pour les essais de caractérisation électrochimique..... | 36 |
| Figure III.4 : Microscope optique métallographique..... | 37 |
| Figure III.5 : Duromètre universel du complexe AQS..... | 38 |
| Figure III.6 : Microduromètre AFFRI Model DM2D, laboratoire de physique de l'université de Jijel..... | 38 |
| Figure III.7 : Chaîne électrochimique..... | 39 |
| Figure III.8 : Montage pour la mesure de potentiel..... | 39 |

Chapitre IV

Résultats et analyses

| | |
|--|----|
| Figure IV.1 : Structure métallographique de l'acier billette..... | 41 |
| Figure IV.2 : Structure métallographique de l'acier laminé..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.3 : Mise en évidence de défauts de surface sur l'acier billette..... | 43 |
| Figure IV.4 : Mesure de dureté des échantillons sur différentes échelles de dureté : HRB, HRC et HV | 44 |
| Figure IV. 5 : Evolution du potentiel d'abandon de l'acier immergé dans la solution simulée du béton chlorurée pour une courte durée (1/2 heure)..... | 45 |
| Figure IV. 6 : Evolution du potentiel d'abandon de l'acier immergé dans la solution simulée du béton chlorurée pour une longue durée (8 jours)..... | 45 |
| Figure IV.7 : Courbes de polarisation de l'acier dans la solution simulée du béton chlorurée..... | 47 |
| Figures IV.8 : Exemple de spectre d'impédance obtenu sur le plan Nyquist avec le circuit électrique équivalent correspondant..... | 48 |
| Figure IV.9 : spectres d'impédances traduisant le comportement électrochimique de l'acier dans la solution simulée du béton chlorurée..... | 49 |

Liste des tableaux

Chapitre I

Les aciers ronds à béton

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : les points de transformation..... | 04 |
| Tableau I.2 : Classes des aciers..... | 09 |

Chapitre II

Corrosion des métaux

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 : Facteurs de corrosion..... | 25 |
|--|----|

Chapitre III

Partie expérimentale

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 : les teneurs des éléments présents dans les billettes..... | 34 |
| Tableau III.2 : les teneurs des éléments présents dans l'acier rond à béton..... | 34 |

Chapitre IV

Résultats et analyses

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1 : Paramètres traduisant le comportement électrochimiques de l'acier brut de coulée et l'acier laminé dans la solution simulée du béton chlorurée..... | 48 |
|---|----|

INTRODUCTION GENERALE

Les métaux et les alliages demeurent les matériaux les plus utilisés par l'homme depuis l'antiquité grâce à leurs propriétés assez variées, ils jouent un rôle capital sur le plan technologique, industriel et domestique.

Les aciers, qui sont à la base des alliages du Fer et du Carbone, constituent un bon palliatif quand il s'agit de conditions de mise en œuvre nécessitant des propriétés de résistance mécanique élevée. Ils trouvent son utilisation dans plusieurs domaines, à s'avoir : la construction mécanique, le transport, l'énergie etc.

Dans le domaine de bâtiment l'acier représente le matériau de construction le plus important, il est utilisé surtout comme armature pour les structures en béton armé et cela grâce aux bons compromis propriétés de ductilité, propriétés de dureté qu'il assure. Il s'agit ainsi de l'acier rond à béton.

Les aciers rond à béton sont des aciers à faible teneur en carbone, ils sont obtenus par déformation à chaud selon le procédé de mise en forme par laminage dans des ateliers LFR (Laminage Fil et Rond).

Les laminoirs LFR jouent un rôle très important dans le développement économique des pays comme le cas du complexe Algerian-Qatari Steel (AQS) d'El Milia. Il couvre le besoin du pays en matière de rond à béton d'une part, d'autre part il représente une source de devise important pour l'Algérie.

Problématique

Les propriétés mécaniques des aciers dépendent de leurs compositions microstructurale (nature, forme et taille des constituants structuraux qui dépend à son tour de la composition chimique ainsi que les différents traitements qui peut subir le matériau.

Le laminage à chaud des aciers c'est un procédé de fabrication qui est considéré comme un traitement thermique et mécanique à la fois, on l'appelle souvent un traitement thermomécanique, son influence sur la composition microstructurale et par conséquent sur ses propriétés mécaniques (dureté, ductilité, résilience), n'est plus à démontrer.

Donc lors de laminage à chaud de l'acier, ce dernier va subir des modifications microstructurale pouvant affecter ses différents propriétés.

Objectif et approche expérimentale

A travers cette approche expérimentale nous allons essayer de maîtriser le point sur les modifications de structures que subit l'acier après le laminage à chaud et évaluer les variations de dureté correspondantes à ses modifications.

Cette analyse microstructurale et mécanique sera enchaînée par une analyse électrochimique afin d'évaluer l'effet des changements structuraux sur les propriétés anticorrosion de l'acier rond à béton dans un milieu électrolytique simulant le milieu interne du béton contaminé.

En d'autres termes, l'objectif principal de l'étude est de faire la corrélation suivante : microstructure-propriétés mécaniques, propriétés anti corrosion.

Pour ce faire notre travail a été élaboré selon le plan suivant :

- Recherche bibliographique
- Modes et méthodes opératoires
- Traitements et analyses des résultats
- Conclusion générale.

1. Généralités

Les alliages de fer sont les plus employés dans l'industrie. L'acier et la fonte, dont le rôle est le plus grand, sont des alliages à base de fer et du carbone. Ils contiennent aussi des éléments dits « inévitables », qui ont comme origine le procédé d'élaboration, il s'agit généralement du silicium, du soufre, de phosphore et du manganèse. Pour obtenir les propriétés données, on introduit dans ces métaux des éléments d'alliage ^[1].

2. Définition d'un acier

L'acier est un alliage essentiellement composé du fer et du carbone. D'autres éléments peuvent être présents dans cet alliage tel que le Soufre et le Phosphore comme éléments détestables, et d'autres bénéfiques comme le Manganèse, le Chrome, le Nickel et le Molybdène.

Une faible variation de la teneur en carbone ou de sa forme de cristallisation peut modifier les propriétés de l'acier ^[2].

3. Le diagramme d'équilibre fer-carbone

C'est un diagramme qui représente la composition des phases et la structure de l'alliage Fer-Carbone en fonction de la température d'élaboration et à la pression atmosphérique.

Selon la forme du Carbone dans l'alliage, il existe deux différents types de ce diagramme :

- Le diagramme d'équilibre stable ou diagramme d'équilibre Fer-graphite.
- Le diagramme d'équilibre métastable ou diagramme d'équilibre Fer-cémentite.

3.1. Diagramme d'équilibre stable :

La formation d'une phase stable de graphite dans la fonte obtenue par deux procédés, le premier est la précipitation et le deuxième c'est la décomposition de la cémentite formée déjà ^[1].

3.2. Diagramme d'équilibre métastable :

C'est le diagramme d'équilibre Fer-Cémentite. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration variée du fer pur à la cémentite. Cette dernière correspond à 6.67% de Carbone ^[3].

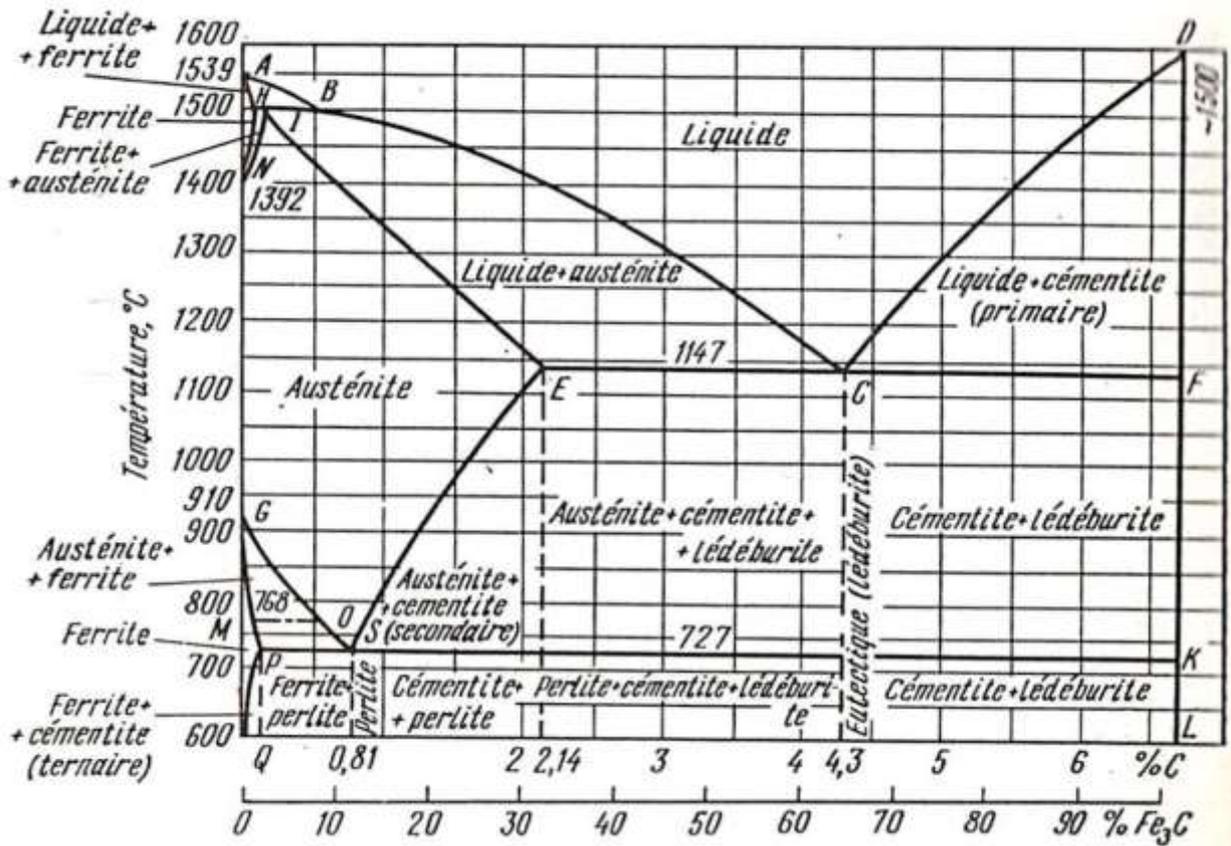


Figure I.1 : Diagramme d'équilibre Fer-cémentite [3].

3.3. Les points de transformation :

Le diagramme d'équilibre est constitué de plusieurs points et ligne dits de transformation. Certains points caractéristiques de diagramme d'équilibre Fer-Carbone sont présentés dans le tableau suivant [3] :

Tableau I.1 : les points de transformation.

| Point | T°C | % Carbone | Caractéristiques |
|-------|------|-----------|---|
| A | 1539 | 0 | T de fusion du Fer pur. |
| C | 1147 | 4,30 | Point de transformation eutectique L → γ + cémentite. |
| D | 1500 | 6,67 | T de fusion de la cémentite. |
| E | 1147 | 2,14 | Teneur limite de solubilité du C dans l'austénite. |
| G | 910 | 0 | Transformation polymorphe α ↔ γ. |
| H | 1499 | 0,10 | Teneur limite de solubilité du C dans la ferrite. |
| N | 1392 | 0 | Transformation polymorphe α ↔ γ. |
| P | 727 | 0,02 | Teneur limite de solubilité du C dans l'austénite. |
| S | 727 | 0,8 | Point de transformation eutectoïde γ → α + p. |

4. Composition chimique des aciers et rôle des éléments

Les aciers au carbone d'usage général, utilisés tels que, sans traitement ultérieur, constituent environ 85% de la production des aciers. Ce sont des matériaux produits en très grande quantité et dont le prix est relativement bas.

Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : Manganèse, Silicium, Soufre et Phosphore.

L'acier est un alliage composé essentiellement du fer avec d'autres éléments (Cu, Ni, Cr, Mo, Si) et voici quelques indications sur leurs influences spécifiques ^[4] :

➤ **Manganèse**

Utilisé lors de l'affinage de l'acier sous forme de ferromanganèse comme un élément désoxydant et comme désulfurant.

➤ **Silicium**

Élément soluble dans la ferrite. Il est utilisé comme agent désoxydant qui a un effet durcissant, mais il a tendance cependant à diminuer la soudabilité de l'acier ^[5].

➤ **Soufre et Phosphore**

Ils sont considérés comme des impuretés car ils rendent l'acier fragile et difficilement soudable, donc l'abaissement de son teneur est nécessaire et effectué par l'addition de manganèse, qui produit du sulfure de manganèse.

➤ **Chrome :**

Élément antigrahitisant, il stabilise les carbures en retardant leur décomposition thermique ainsi que l'oxydation interne et de ce fait améliore la tenue à chaud.

➤ **Molybdène :**

Il améliore considérablement la résistance au choc thermique

➤ **Cuivre et nickel :**

Éléments graphitisants de solidification surtout aux basses teneurs en Si (Ni : 0.35/Si ; Cu : 0.2Si), ils contribuent fortement à l'affinement de la perlite par leur action γ -gène. En outre le cuivre est fortement antiferritisant alors que le nickel a dans ce domaine un effet négligeable. Leur introduction conduit à une augmentation de la résistance et de la dureté (Cu > Ni).

5. Constituants structuraux des aciers

Selon la composition chimique (teneur en carbone et en éléments d'alliage) et les conditions de chauffage et de refroidissement (traitements thermiques ou thermomécaniques lors de processus de fabrication) les aciers présentent, dans les conditions de mise en œuvre, des structures métallographiques différentes ^[6].

Ces constituants sont subdivisés en deux grandes familles : Constituants métallographiques d'équilibre Constituants métallographiques issus des traitements.

5.1. Constituants métallographiques d'équilibre

5.1.1. La ferrite

Solution solide d'insertion du carbone et d'autres inclusions dans le fer α (cubique centré).

On distingue la ferrite α à basse température et à solubilité du carbone allant jusqu'à 0,02% et la ferrite δ à haute température et à solubilité limite en carbone allant jusqu'à 0,1% [7,8].



Figure I.2 : La ferrite [8].

5.1.2. L'austénite

Est une solution solide du carbone dans fer gamma (cubique à faces centrés) et d'autres. L'austénite est stable à haute température, elle peut exister à la température ambiante que dans un état métastable [1,7].



Figure I.3 : L'austénite [8].

5.1.3. La cémentite

Dite aussi carbure du fer (Fe_3C), est une combinaison chimique du fer et du carbone dont la teneur en carbone peut atteindre 6,67%, c'est une phase métastable.

La température de fusion de la cémentite n'est pas connue exactement du fait qu'elle peut se décomposer et on adopte que sa fusion a lieu à peu près à 1550°C [1,7].



Figure I.4 : La cémentite [9].

5.1.4. La perlite

Elle représente un mélange eutectoïde d'environ 88% de ferrite et 12% de cémentite sous forme de fines lamelles alternées [8].



Figure I.5 : La perlite [8].

5.2. *Constituants métallographiques issus des traitements thermiques*

5.2.1. La troostite

C'est une perlite extrêmement fine obtenue pour des vitesses de refroidissement assez importantes ; les nodules de troostite qui se développent à partir des joints de grains sont constitués par des très fines lamelles de ferrite-cémentite non séparables en microscopie optique. Fréquemment associée à la bainite et à la martensite dans les aciers trempés [3,8].



Figure I.6 : La troostite [8].

5.2.2. La bainite

Mélange de fines plaquettes de carbures Fe_3C et ϵ ($Fe_{2,4}C$) dans une matrice de ferrite.

Elle représente une morphologie aciculaire est obtenu après des vitesses de refroidissement élevées, et accompagne souvent la martensite dans les aciers trempés [3,8].



Figure I.7 : La bainite [8].

5.2.3. La sorbite

Structure typique des aciers trempés et revenus, issue de la décomposition de la martensite et de l'austénite résiduelle. Mélange de globules de cémentite dans une matrice de ferrite, d'autant plus fin due la température de revenu est basse [8].

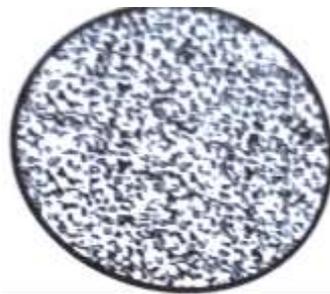


Figure I.8 : La sorbite [8].

5.2.4. La martensite

Solution solide de fer sursaturée en carbone, très dure et fragile. Elle est obtenue seulement si la vitesse de refroidissement est supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique [8].

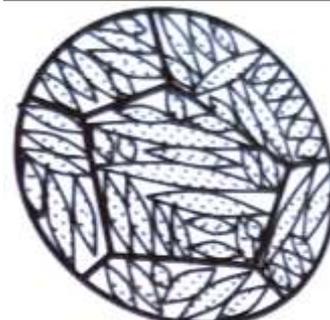


Figure I.9 : La martensite [8].

6. Les classes des aciers

Selon la teneur de Carbone, les aciers peuvent être classés comme suit, **Tableau I.3** :

Tableau I.2 : Classes des aciers ^[10]

| Nuance | % de carbone (C) | Emplois |
|---------------------------------|-------------------|---|
| Extra-doux | $0,1 < C < 0,15$ | Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge |
| Très doux | $0,15 < C < 0,2$ | Pour les constructions métalliques, acier pour tubes. |
| Doux | $0,2 < C < 0,25$ | Charpentes métalliques, profilés, constructions mécaniques courantes, boulons, fils ordinaires |
| Demi-doux | $0,25 < C < 0,3$ | Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées. |
| Demi-dur | $0,3 < C < 0,35$ | Petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission. |
| Dur | $0,35 < C < 0,45$ | Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées. |
| Tés dur | $0,45 < C < 0,55$ | Fils, taillanderie (haches, bêches ...) |
| Extra dur | $C < 1,5$ | Outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts. |
| Acier 'stubs' ou carbone | | Petits outils, poinçons, axes |

7. Les types de l'acier

La classification des divers types d'aciers peut se faire selon leur composition chimique ou leur domaine d'utilisation. La classification selon le domaine d'utilisation permet de considérer les quatre familles suivantes ^[5] :

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.
- Les aciers à outils.
- Les aciers inoxydables.

8. Utilisations de l'acier dans le domaine de construction

Malgré l'apparition du béton, fer, fonte et acier demeurent des matériaux modernes de la construction. Nous trouvons ces matériaux ^[10] :

a. Sous forme de matériaux ouverts :

- Ossatures métalliques enrobées de béton : poutrelles diverses.
- Barres d'aciers pour armer le béton.
- Menuiseries métalliques, persiennes.

- Tuyaux et plaques de fonte, tuyaux d'acier pour canalisations.
- Serrurerie et fer forgé.
- Ferrures diverses, clous, feuillards...

b. Sous forme d'outillage et matériel de chantier :

- Petit outillage en acier dur.
- Pelles, pioches, brouettes, étais, coffrages, échafaudages, tubulaires, échelles.
- Gros matériel : grues, bétonnières, compresseurs, pompes ; palplanches, engins de terrassement.

9. L'acier rond à béton

C'est un type des aciers qui est destiné à la construction. Il a une composition chimique (teneur des éléments chimiques) bien déterminée. Il se combine avec de béton pour lui améliorer la résistance à la traction. L'ensemble acier et béton nous donne ce qu'on appelle *béton armé*.

9.1. Structure des aciers ronds à béton :

Selon la composition chimique (teneur en carbone surtout) et les conditions de chauffage et de refroidissement les aciers de construction présentent, dans les conditions de mise en œuvre, deux structures métallographiques distinctes ^[11] :

• Structure ferrito-perlitique :

La très grande majorité des aciers d'usage général est livrée et employée à l'état ferrito-perlitique. Ils sont constitués de grains de ferrite juxtaposés avec des pseudo-grains de perlite-agrégat constitué lui-même de particules de ferrite et de particules de carbure de fer Fe_3C ^[12].

Ce type de structure est obtenu sous les conditions d'un refroidissement relativement lent ainsi qu'une faible teneur en carbone. La structure ferrito-perlitique confère à l'acier de bonnes propriétés de ductilité et des caractéristiques de dureté médiocres.

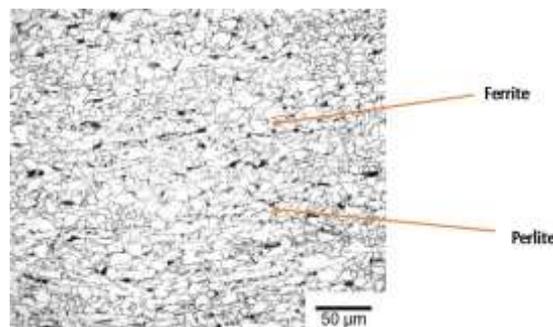


Figure I.10 : La structure ferrito-perlitique.

- **Structure perlito-ferritique :**

Contrairement à la précédente, la structure perlito-ferritique contient plus de perlite que de ferrite, elle est la conséquence d'une teneur relativement élevée du carbone et une vitesse de refroidissement plus élevée. Les aciers ferrito-perlitique présentent un bon compromis entre la caractéristique de ductilité et de dureté.

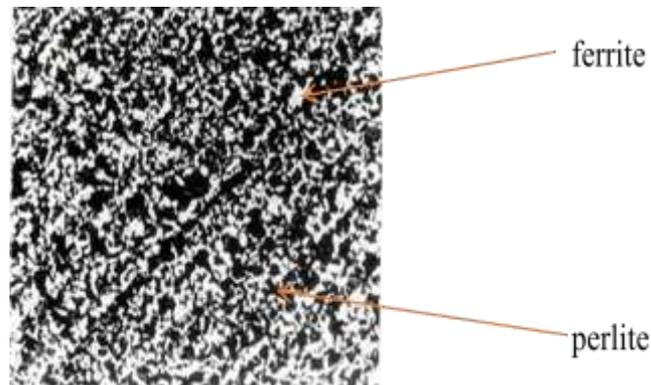


Figure I.11 : La structure perlito-ferritique.

9.2 Propriétés des aciers d'armatures

Les aciers utilisés dans le domaine de bâtiment doivent présenter certaines caractéristiques particulières, à savoir :

A. Propriétés physiques

La dilatation linéique est la caractéristique physique la plus importante pour le constructeur métallique. Témoin de l'augmentation des dimensions de l'acier, ce coefficient peut être donné par rapport à une température précise (vrai) ou entre deux températures (moyen). L'acier est également un bon conducteur thermique, notion à considérer dans le cas des échanges de chaleur entre extérieur et intérieur.

B. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques des aciers d'armatures sont liées par les additifs au mélange de base. L'addition de cuivre donne un acier semi-inoxydable, le chrome augmente la résistance, le nickel fournit des aciers durs et inoxydables ; enfin le tungstène, le molybdène, le vanadium, permettent d'obtenir des produits de qualités remarquables et variées s'adaptant aux besoins de toutes les industries.

c. Propriétés mécaniques :

Plusieurs propriétés mécaniques sont connues dans le domaine des matériaux tel que :

- La flexion.
- La résistance à la traction.

- La dureté.
- La limite d'élasticité.
- L'allongement à la rupture.
- Le module d'élasticité (d'Young)
- La résilience.

10. Types d'armatures :

Les produits sidérurgiques les plus utilisés pour constituer les armatures des constructions en béton armé sont :

- Les fils et les barres ronds lisses qui peuvent provenir, soit de ronds laminés à chaud, soit de fil machine redressé.
- Les barres à haute adhérence (barres HA) laminées à chaud.

Les aciers d'armatures, étant livrés prêts à l'emploi, sont donc sous des formes (géométriques) correspondant aux besoins des utilisateurs.

Une barre lisse ou barre à haute adhérence (barre HA) appelée aussi crénelée est caractérisée par un diamètre nominal. Les diamètres nominaux normalement utilisés dans le domaine de la construction appartiennent à la gamme suivante ^[13] :

Ronds lisse: 6 8 10 12 13 14 20 25 32 40 mm



Figure I.12 : Rond lisse

Barre HA (crénelé) : 6 7 8 9 10 12 14 16 20 25 32 40 mm

A chaque diamètre nominal correspond une section nominale et un périmètre nominal.



Figure I.13 : Rond HA (crénelé)

11. Adhérence acier/béton

L'adhérence est une caractéristique importante dans le rond à béton. L'aptitude d'une armature à rester solidaire du béton qui l'enrobe, en dépit des forces qui tendent à la faire glisser dans le sens de son axe.

Les caractères d'adhérences dépendent des formes géométriques et des conditions de fabrication des armatures ^[14].

Pour une armature lisse l'adhérence n'est due qu'à une réaction de type chimique ou physique, elle est donc faible. Pour améliorer l'adhérence des fils lisses, ceux-ci forment un treillis de sorte qu'au moins dans une direction l'acier est en «butée» dans le béton,

Figure I.14a. Les armatures les plus courantes possèdent des nervures qui agissent comme de petites butées et induisent une adhérence de type mécanique, Figure I.14b.

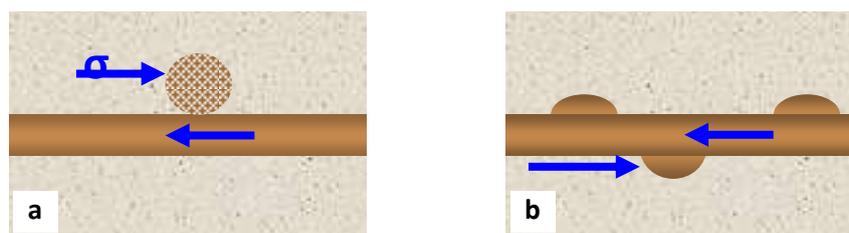


Figure I.14 : Adhérence d'une armature à béton.

12. Traitements thermiques

Le traitement thermique donne aux éléments en acier des propriétés mécaniques bien déterminées, parmi elles on cite :

- ✓ La dureté plus élevée.
- ✓ La moindre fragilité.
- ✓ L'augmentation de la résistance.

Ces propriétés sont obtenues par chauffage et maintien puis refroidissement postérieur de l'acier suivant un régime de température bien déterminé [15].

Parmi les traitements les plus appliqués aux aciers on distingue :

12.1 La trempe :

La trempe des aciers est une opération de durcissement qui consiste à chauffer le métal à une température dite d'auténisation pour un intervalle de temps donnée suivi d'un refroidissement brusque, Figure I.15. Le refroidissement est effectué dans un bain d'eau, d'huiles ou autres liquides caloporteurs.

La trempe est un traitement thermique qui permet d'augmenter la résistance et la dureté de l'acier mais diminue sa résilience. L'acier trempé donc est très fragile, ceci le rend peu apte aux utilisations pratiques.

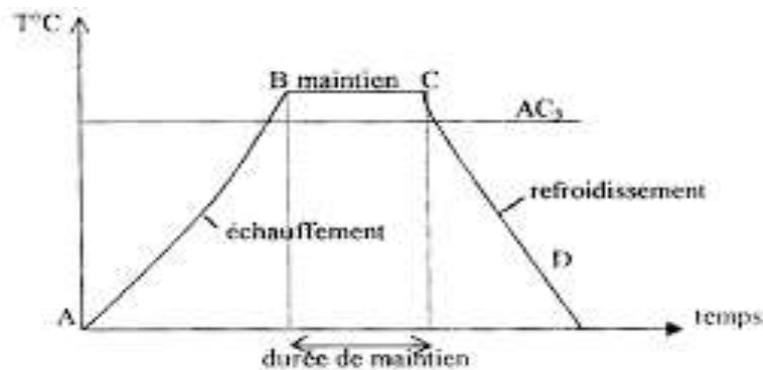


Figure I.15 : cycle thermique de trempe [16].

12.1.1. Les types de la trempe

Trois types de trempe distingués :

- La trempe martensitique.
- La trempe bainitique.
- La trempe austénitique (hypertrempe).

A- La trempe martensitique

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique M_s , généralement de l'ordre de 180 à 250 °C. Le refroidissement

rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite ^[16].

B- La trempe bainitique

Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240 °C à 450 °C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bainitique dépend de la microstructure désirée (et la dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier ^[15].

C- La trempe austénitique

Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir les aciers austénitiques et consiste à chauffer les pièces vers 1100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 °C à 800 °C. Il est généralement effectué à l'eau ^[15,16].

12.2. Le revenu

Au cours du revenu, il y avait une décomposition de la martensite et retour pareil à une structure comportant les constituants d'équilibre ferrite et carbures.

C'est une opération qui s'effectue après la trempe son principe est basé sur le chauffage de l'acier entre 150 et 650°C pendant environ une heure.

Le but principal de cette opération est d'augmenter la ténacité de l'acier et aussi diminuer la dureté ^[15].

Principalement deux types de revenu sont distingués :

A_ Le revenu de détente

C'est un revenu qui s'effectue à un intervalle de température de 140 à 200 °C, son but est de diminuer les contraintes internes et relever la limite d'élasticité des pièces en aciers ^[15,16].

B_ Le revenu d'adoucissement

Son domaine de température est entre 450 et 600°C, il vise la décomposition complète de la martensite par précipitation de carbone sous forme de cémentite ^[15,16].

12.3. Le recuit

Le recuit est un processus de traitement thermique qui comporte un chauffage suivi d'un refroidissement lent, utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes.

Son application est principalement effectuée pour les produits semi finis tel que les fils et les feuilles travaillés à froid ^[17].

On distingue plusieurs types de recuits, on site :

A_ Le recuit d'homogénéisation

Il s'applique généralement pour les aciers bruts de fonderie, qui comporte une hétérogénéité de répartitions ses constituants.

Donc le recuit d'homogénéisation comme son nom l'indique, son but est de réduire cette hétérogénéité.

B_ Le recuit de régénération

Après les traitements de chauffage à une température assez grande les grains des aciers grossi, donc le traitement de régénération, ou d'affinage structural, a pour but d'affiner ces grains et rendre à l'acier sa structure fine.

C_ Le traitement de recristallisation

C'est un recuit destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin.

La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau ainsi qu'une augmentation de ductilité.

13. Mise en forme par déformation des aciers

La déformation des aciers peut être effectuée à chaud ou à froid. Elle permet de obtenir une grande variété de produits finis et semi-finis par différentes lignes de production. Il s'agit notamment des produits plats laminés à chaud et à froid, des produits longs laminés à chaud, des produits longs emboutis, des tubes et des fils.

Parmi les techniques de mise en forme : le laminage.

13.1. Le laminage

Le laminage est un procédé industriel de formage des métaux dans lequel un matériau métallique est introduit entre une ou plusieurs paires de rouleaux pour réduire son épaisseur et le rendre plus uniforme ^[18].

Deux techniques de laminage sont possible selon la température du matériau : à chaud ou à froid.

A- Laminage à chaud

Dans le laminage à chaud, la taille, la forme et les propriétés métallurgiques du métal sont modifiées par compression répétée du métal chaud dont la gamme des températures de travail est comprise entre 1050 et 1300 °C entre des rouleaux à entraînement électrique.

Le laminage à chaud permet une grande variété de formes et de pièces, ainsi que la possibilité de fabriquer de grandes pièces sans se soucier de l'intégrité du matériau. C'est pourquoi l'acier laminé à chaud est souvent utilisé dans des projets structurels [18].

B- Laminage à froid

L'acier laminé à froid est principalement un acier laminé à chaud qui a subi d'autres traitements. Une fois que l'acier laminé à chaud a refroidi, il est ensuite ré-laminé à température ambiante pour atteindre les dimensions exactes et une meilleure qualité de surface [19].

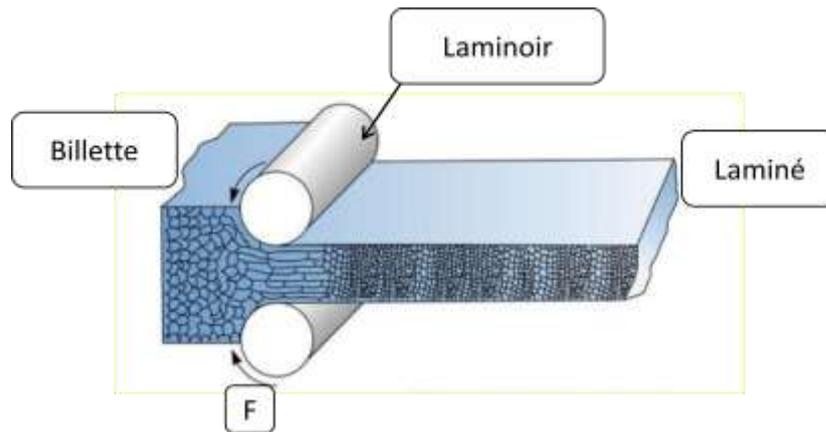


Figure I.16 : Procédé de laminage [20].

13.2. Applications

Les aciers laminés, à chaud ou froid, trouvent son application dans différents domaines, Figure I.17.

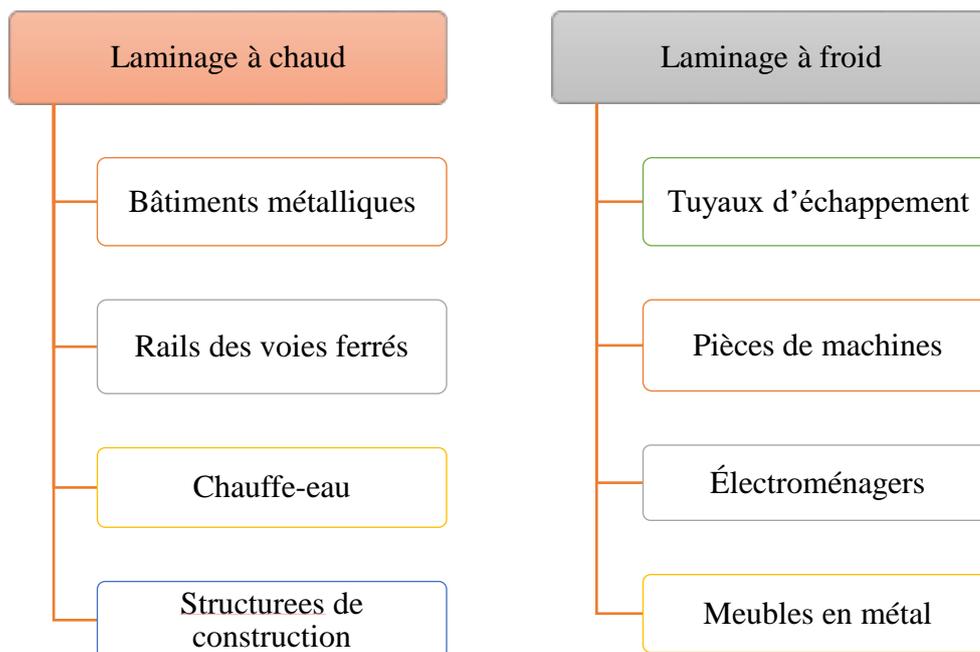


Figure I.17 : Les applications des aciers laminés.

13.3. Caractéristiques

Plusieurs caractéristiques existent parmi elles :

laminé à chaud

- Surfaces laminées.
- Des bords légèrement arrondis.

laminé à froid

- Surfaces lisses.
- Barres bien centrées.

1. Généralités

La corrosion est connue depuis longtemps, mais son étude scientifique a dû attendre les essais de De La Rive, à l'Université de Grenoble, et ceux de Faraday (1791-1867) sur l'électricité et la pile de courant en 1830. Ces chercheurs ont alors découvert que la corrosion des métaux était un phénomène électrochimique. Cependant, cette explication s'applique pas à toutes les formes de corrosion, ni à la compréhension de la corrosion humide. La corrosion sèche fait intervenir la réaction chimique du milieu extérieur directement sur le matériau. Elle est typique de la corrosion par les gaz et se rencontre à haute température ^[21].

La dégradation des matériaux est leur destruction, ou du moins la modification de leurs propriétés, au cours du temps, destruction due à l'effet du milieu ambiant. Les pertes monétaires imputables à tous les problèmes liés à la dégradation des matériaux atteignent des sommes faramineuses ^[5].

2. Définition de la corrosion

C'est un phénomène d'interaction physico- chimique entre un métal et son environnement ; provoquant une attaque qui le fait retourner à l'état d'ion métallique, c'est la forme originale dans les minerais ^[22,23].

3. Causes de la corrosion

Dans la nature tous les métaux, à l'exception des métaux nobles tels que l'or (Au) et le platine (Pt), se présentent dans la nature sous forme d'oxydes et de sulfures métalliques. Cet état de point de vue thermodynamique est très stable. Cependant, l'énergie considérable fournit pour l'obtention des métaux de ces minerais fait que les métaux obtenus se trouvent dans un niveau énergétique élevé, ils sont thermodynamiquement instables. C'est pour cette raison que tous les métaux usuels ont tendance à retourner à leur état initial en énergie, cela se fait à l'aide du milieu environnant ^[6].



Figure II.1 : Schéma traduisant la cause de la corrosion atmosphérique du fer.

4. Classification de la corrosion

4.1. Corrosion chimique (sèche)

C'est une réaction d'oxydoréduction entre deux phases l'une est solide (le métal) et l'autre est gazeuse à l'absence d'électrolyte. Elle se déroule généralement à des hautes températures ^[23].



Figure II.2: La corrosion sèche

4.2. Corrosion bactérienne :

Corrosion bactérienne, microbienne ou encore appelée bio-corrosion, est définie comme le secteur de la corrosion dans lequel les processus sont engagés, facilités ou accélérés par des micro-organismes sans modification du phénomène électrochimiques de base ^[24].



Figure II.3 : La corrosion bactérienne.

4.3. Corrosion électrochimique (humide)

Elle a lieu lorsque le métal se trouve attaqué par des solutions liquides. D'autres causes existent pour ce type de corrosion tel que le contact de deux métaux non homogènes ou être le résultat d'une hétérogénéité chimique [25].

5. Morphologie de la corrosion

5.1. Corrosion uniforme

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou encore mécaniques [23].



Figure II.4 : La corrosion uniforme.

5.2. Corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique [23].

A- Corrosion par piqûres

La présence d'un oxydant dans un électrolyte contenant des anions agressifs tel que (Cl^- , Br^- , I^-) provoque une attaque et par conséquent une formation des petites piqûres.

Sachant que la quantité du métal corrodé est faible donc la perte de poids est négligeable [24].

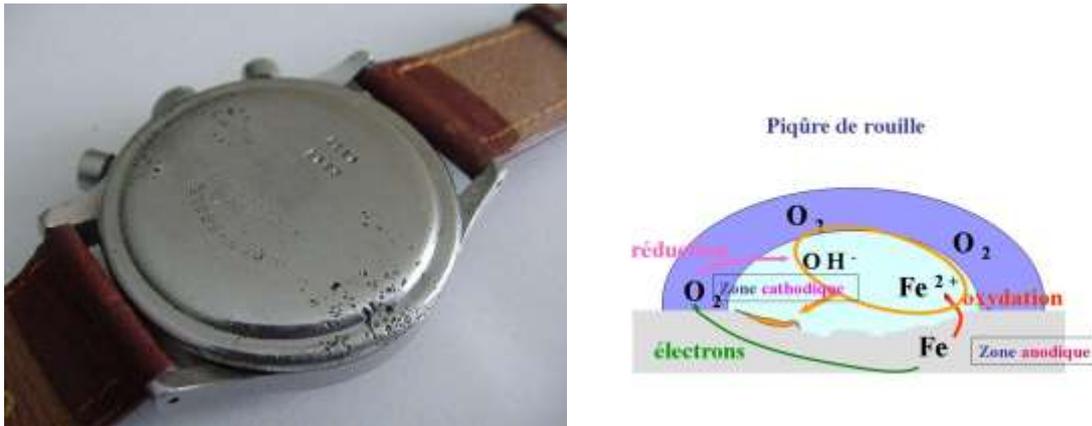


Figure II.5 : Représentation schématique de la corrosion par piqûres

B- Corrosion intergranulaire

Ce type de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau qui constituent des zones désordonnées par rapport au réseau cristallographique [24].

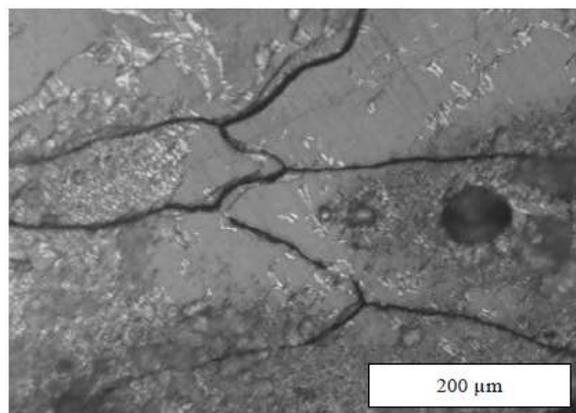


Figure II.6 : Corrosion intergranulaire de l'alliage 2024 T351, après 24 h d'immersion dans une solution 0,1 M de Na_2SO_4 + 0,1 M de $NaCl$.

Photomicrographie obtenue dans le cadre de cette étude.

C- Corrosion sous contrainte

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif.

Elle se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaires, soit transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte [23].

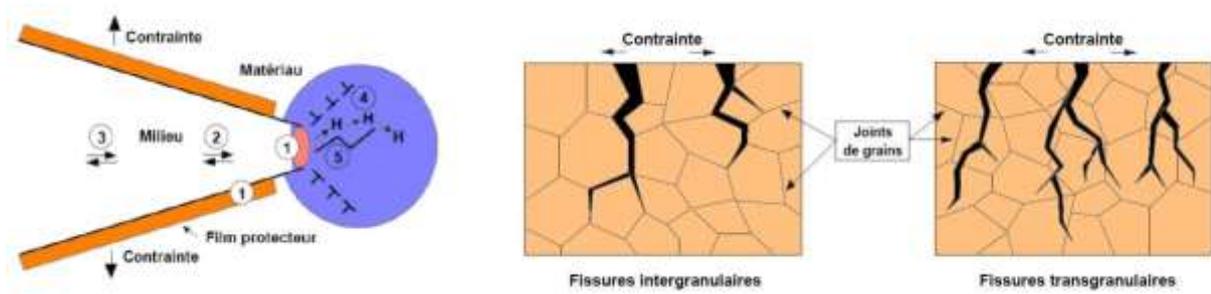


Figure II.7: Représentation schématique de la corrosion sous contrainte.

D- Corrosion par crevasses

Elle a lieu lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériaux isolants [23].

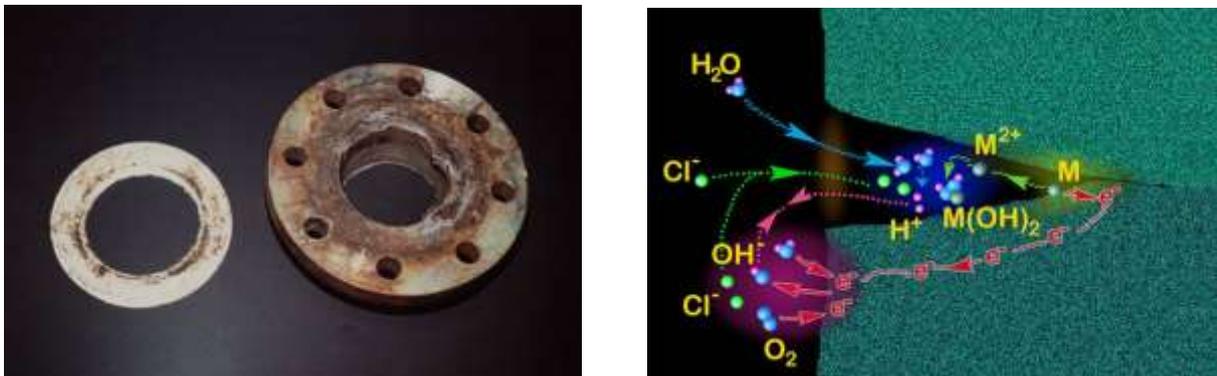


Figure II.8 : Corrosion par crevasses d'un acier allié sous un joint.

E- Corrosion par érosion

L'érosion correspond à une dégradation de la surface sous l'effet d'impacts des particules solides, de gouttelettes, d'un jet ou de l'action d'un écoulement turbulent [24].



Figure II.9 : Corrosion par érosion dans une zone turbulente.

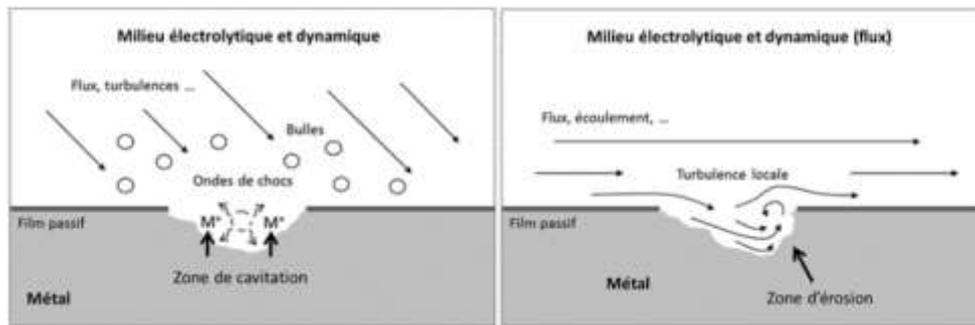


Figure II.10 : Représentation schématique de la corrosion par érosion.

F- Corrosion galvanique

C'est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Comme son nom l'indique, elle résulte la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux et la dégradation du métal le moins résistant s'intensifie. Qui conduit à une hétérogénéité de l'attaque [23,24].

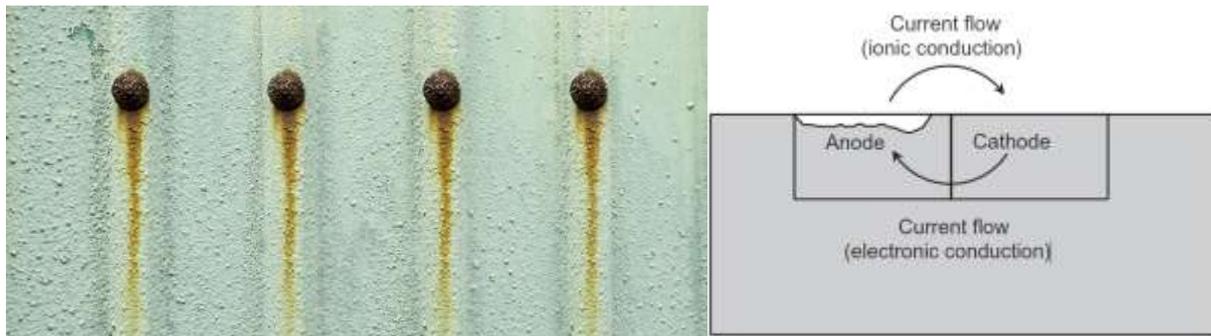


Figure II.11 : Représentation schématique de la corrosion galvanique.

G-Corrosion sélective

Dans certains alliages métalliques, le métal le moins noble peut être corrodé sélectivement. L'alliage ainsi corrodé conserve souvent sa forme initiale. Il peut apparaître intact mais ses propriétés mécaniques sont sérieusement diminuées [22].



Figure II.12 : La corrosion sélective.

H-Fragilisation par l'hydrogène

C'est une forme d'attaque décrite parmi les usures occasionnées par les contraintes, car son mécanisme fait intervenir des pressions suffisamment importantes pour faire éclater une tôle. De plus, la pénétration de l'Hydrogène entraîne une baisse des caractéristiques mécaniques des matériaux [21].



Figure II.13: Fragilisation par l'hydrogène.

6. Facteurs de corrosion

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux [26].

Tableau II.1 : Facteurs de corrosion.

| | |
|---|---|
| Facteurs du milieu corrosif | <ul style="list-style-type: none"> • Concentration du réactif • pH du milieu • Température • Pression |
| Facteurs métallurgiques | <ul style="list-style-type: none"> • Composition de l'alliage • Procédés d'élaboration • Impuretés • Traitement thermique |
| Facteurs définissant les conditions d'emploi | <ul style="list-style-type: none"> • Etat de surface • Forme des pièces • Emploi d'inhibiteur • Procédés d'assemblage |
| Facteurs dépendant du temps | <ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement • Tensions mécaniques • Revêtements protecteurs |

7. Thermodynamique de la corrosion électrochimique

Une électrode et une phase, la plus par du temps métallique, en contact avec un électrolyte. Par extension, l'ensemble métal –solution est souvent appelé électrode ^[4].

7.1. Potentiel d'équilibre d'une électrode

Le potentiel d'équilibre ou potentiel réversible d'une électrode représente la différence de potentiel électrique entre le métal et la solution contenant l'un de ses sels à l'équilibre, les deux potentiels (du métal et de la solution) étant uniformes.

Le potentiel d'une électrode ne peut se mesurer dans l'absolu, car un expérimentateur ne mesure qu'une différence de potentiel entre deux électrodes formant une pile électrochimique, Il peut être déterminé par la loi de Nernst :

• Equation de Nernst

L'équation s'applique à une réaction d'électrode à l'équilibre. Elle sert à calculer son potentiel réversible à partir du potentiel standard en fonction des activités et de la température ^[27].

Pour dériver cette équation, il faut se référer à la réaction d'oxydoréduction.



$$E_{rev} = E^0 + \frac{RT}{nF} \text{Ln} \frac{[\text{oxydant}]}{[\text{réducteur}]} \text{équation de Nernst}$$

$$\text{On peut écrire aussi : } E = E^0 + 2,3 \frac{RT}{nF} \text{Log} \frac{[ox]}{[red]}.$$

$$\text{Avec : } 2,3 \frac{RT}{F} = 0,059 \quad \text{à } T = 298K \quad \text{et } n = 1.$$

Donc :

$$E = E^0 + 0.059 \text{Log} \frac{[ox]}{[red]}$$

E^0 : Le potentiel normal d'équilibre du métal en contact avec une solution à la concentration unité $[OX] = 1$. Il ne dépend que de la nature du système considéré, le tableau II.2 présente quelques valeurs pour des systèmes Red/OX.

7.2. Potentiel de dissolution ou de corrosion

Lorsqu'un métal est plongé dans une solution quelconque, des ions vont passer dans la solution, le métal se dissout (se corrode). Il se charge négativement et prend, par rapport à

la solution, un potentiel qui évolue dans le temps et se stabilise à une valeur appelée potentiel de dissolution E_D ou corrosion E_{corr} .

Les métaux peuvent être classés suivant leur potentiel de dissolution dans une solution. Le tableau suivant donne une classification type pour une solution de NaCl 3% à température ambiante [6].

Tableau II.2: Potentiel de dissolution de quelques métaux dans la solution NaCl 3%

| Métal | Mg | Fe | Sn | Ag |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Potentiel initial [V/ENH] | -1,45 | -0,34 | -0,25 | +0,24 |
| Potentiel final [V/ENH] | -1,47 | -0,50 | +0,25 | +0,20 |

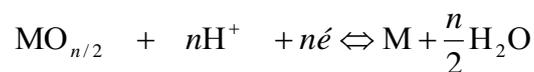
7.3. Diagramme de Pourbaix

Représentent le potentiel réversible, calculé par l'équation de Nernst, en fonction du pH. Pour un métal donné, on trace généralement un tel diagramme en tenant compte de différentes réactions d'électrode et réactions chimiques possibles :

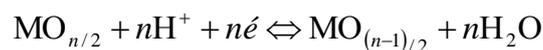
Equilibre électrochimique entre un métal et ses ions :



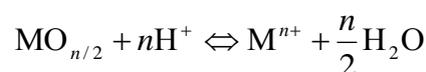
Equilibre électrochimique entre un métal et son oxyde :



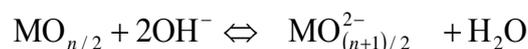
Equation électrochimique entre deux oxydes de degrés d'oxydation différents :



Equilibre chimique en milieu acide entre un oxyde et des ions dissous :



Equilibre chimique en milieu alcalin entre un oxyde et des ions dissous [7] :



7.4. Diagramme potentiel-pH du fer

Le comportement à la corrosion du fer est particulièrement important. La figure ci-dessous montre le diagramme potentiel-pH du fer. On tient compte de deux oxydes :

Le Fe_2O_3 hydraté et le Fe_3O_4 (magnétite). La concentration des espèces dissoutes vaut 10^{-6} mol/l. Nous remarquons que le fer peut réagir avec les protons en milieu acide et neutre, accompagné d'un dégagement d'hydrogène.

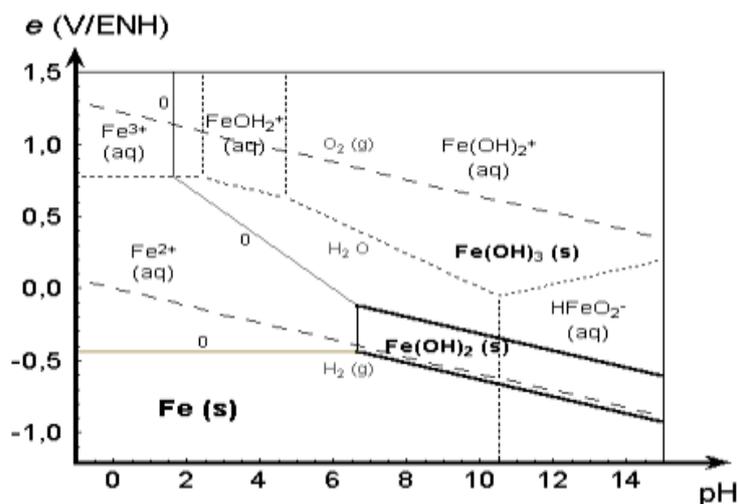


Figure II.14 : Diagramme de Pourbaix du Fer.

En milieu alcalin, par contre, il résiste à la corrosion, car les oxydes formés ne se dissolvent pas facilement par réaction avec les ions hydrauliques. Ce comportement correspond aux observations pratiques : en milieu acide et neutre l'acier non protégé se corrompt facilement, alors qu'en milieu alcalin, comme cas du béton, résiste bien ^[27].

8. Aspect cinétique de la corrosion électrochimique

8.1. Généralités

Dans le cas de contact entre une électrode et une solution électrolytique, une réaction d'échange des électrons aura lieu entre les deux et précisément entre le conducteur métallique et l'oxydant ou le réducteur du couple constitutif de l'électrode.

La corrosion électrochimique d'un métal est son oxydation spontanée au contact d'une solution, formant une espèce dissoute, couplée à la réduction d'un oxydant qui peut être un ion oxydant.

8.2. Courbes de polarisation

La polarisation en électrochimie est un phénomène qui explique la diminution d'une intensité de courant, elle est anodique ou cathodique.

La polarisation peut se produire par activation ou par concentration selon la teneur des ions actifs, si ses teneurs sont élevées donc la première est déterminante si non donc la deuxième est prépondérante [21].

Une courbe de polarisation nommée aussi courbe intensité-potentiel, représente la variation de la densité de courant en fonction du potentiel, Figure II.15.

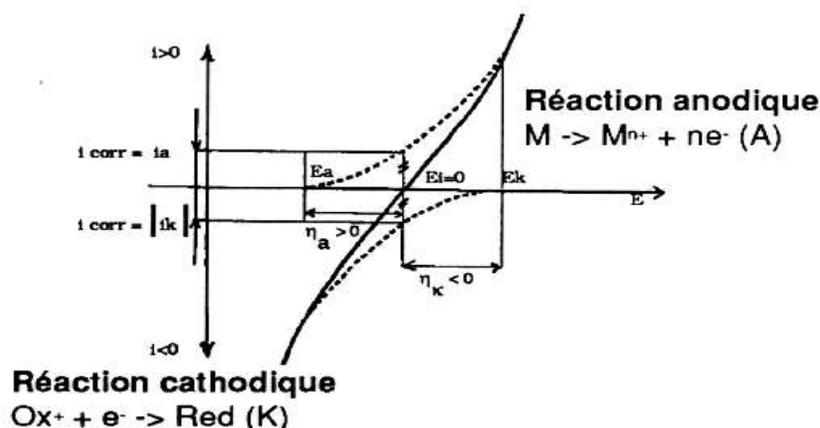


Figure II.15 : Courbe de polarisation [28].

Pour le tracer de cette courbe il faut que la vitesse de balayage être suffisamment lente pour assurer la réversibilité des réactions.

La courbe de polarisation comporte deux parties l'une dite cathodique et l'autre anodique.

La densité de courant i est égal au courant mesuré I , divisé par la surface A de l'électrode de travail :

$$i = I/A$$

8.3. Etude de la surtension

Le potentiel d'une électrode, E , dans une cellule d'électrolyse traversée par un courant est différent de celui en l'absence de courant. Le potentiel à courant nul est le potentiel d'équilibre, E_{eq} . La différence entre ces deux potentiels, η , est appelée surtension :

$$\eta = E - E_{eq}$$

D'après cette relation on peut distinguer deux types de courant :

- Si η est positif donc le courant anodique traverse l'interface métal/solution.
- Si η est négatif donc le courant cathodique traverse l'interface solution/métal.

8.4. Vitesse des réactions de corrosion

La vitesse de corrosion d'un matériau métallique en milieu aqueux est accessible à la mesure de la perte de masse et aussi par les courants anodiques de dissolution ^[28].

Cette vitesse est déterminée par l'application de la loi de Faraday :

$$v = M \cdot i / (\rho z F)$$

v : La vitesse de corrosion en cm/s.

ρ : La masse spécifique du matériau en g/cm³.

i : La densité de courant anodique de dissolution ou d'oxydation en métal en A/cm².

M : La masse atomique du métal en g.

Z : Le degré moyen d'oxydation du produit de corrosion.

F : Le faraday

9. Corrosion des aciers dans le béton

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de dégradation du béton, la pénétration des chlorures et la carbonatation du béton sont les deux mécanismes les plus courants au développement de la corrosion.

9.1. Les types de corrosion dans le béton

Il existe deux types de corrosion des armatures du béton. Ils dépendent de l'environnement et du milieu agressif.

- Corrosion localisée par piqures : attaque par les chlorures.
- Corrosion généralisée par carbonatation du béton : elle se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques des élémentaires.

9.2. Les étapes de corrosion

Selon le diagramme de Tutti qui représente la corrosion des armatures dans le béton, cette dernière se déroule en deux étapes ^[29] :

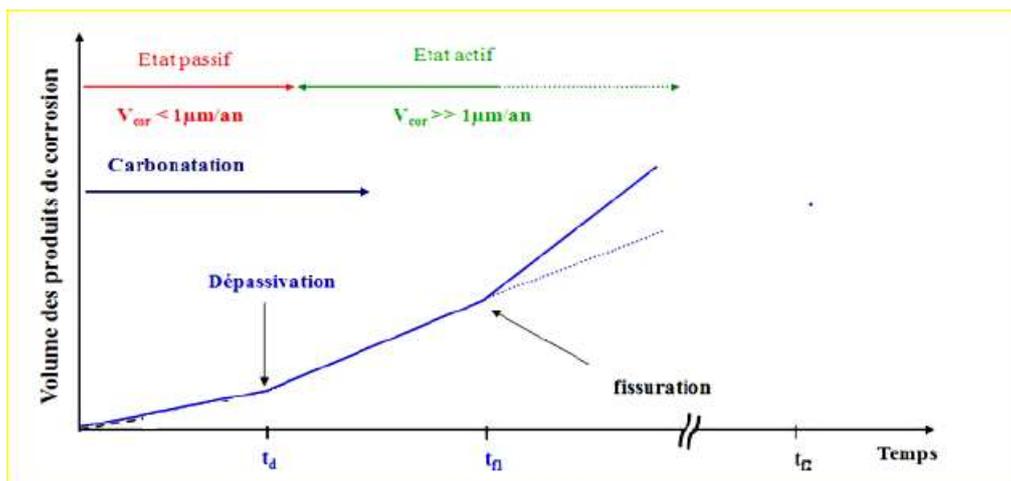


Figure II.16 : Diagramme de Tutti ^[29].

- La première étape est caractérisée par un état passif de l'armature métallique. D'où la couche d'oxyde formée à la surface est stable et la vitesse de corrosion est faible.
- La deuxième étape ou la corrosion dite « à l'état actif » situe à la modification de la composition de la solution interstitielle au voisinage de l'armature.

9.3. Dépassement des armatures

L'acier est un alliage passivable c'est-à-dire capable de former une couche protectrice, dense, étanche et isolante électriquement, qui s'oppose au passage de ses ions métalliques vers l'électrolyte, mais en présence d'eau et d'oxygène, et pour des valeurs de pH inférieur à 10.5, le film passivant devient instable et se dégrade.

Souvent la dépassement des armatures se produit par l'action de deux agents : le dioxyde de carbone CO_2 (Carbonation) et les ions chlorures.

A- Attaque par les chlorures

Dans un environnement nocif, les agents de corrosion (Cl^-) réduisent l'alcalinité du béton et décomposent le film d'oxyde passif protecteur sur la barre d'acier, le rendant ainsi susceptible aux attaques de corrosion.

La corrosion des armatures comporte 2 phases :

- L'incubation à laquelle les éléments agressifs pénètrent dans le béton.
- La propagation lorsque les agents agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Le mécanisme de l'attaque par les chlorures est résumé dans les deux points suivant :

- Les ions chlorures, véhiculés par l'eau, pénètrent par diffusion à travers la porosité ou le long d'une fissure dans la solution interstitielle du béton jusqu'à l'armature.
- Les ions chlorures associés aux hydroxydes présent dans la solution provoquant la destruction de la couche de passivation de l'armature et abaissent le pH de la solution, donc la corrosion peut commencer.

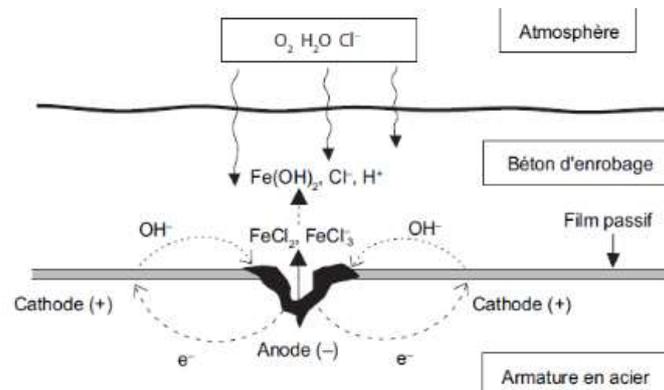


Figure II.17 : Mécanisme de la corrosion électrochimique en présence de chlorures ^[30].

9.4. Protection contre la corrosion dans le béton

Plusieurs méthodes et produits sont utilisés pour stopper ou limiter la corrosion des armatures métalliques dans le béton, à savoir :

- Les revêtements métalliques organiques de type résines époxydiques.
- Les revêtements métalliques soit par galvanisation de l'acier, soit en réalisant une couche de conversion.
- La protection cathodique.
- La ré-alcalinisation électrochimique
- Les inhibiteurs de corrosion.

Inhibiteur de corrosion

Un inhibiteur c'est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration.

L'action d'un inhibiteur de corrosion est soit par abaissement de la vitesse de dissolution et/ou réduction du moteur de corrosion ou soit par modification de l'agressivité de l'électrolyte.

La protection cathodique

La protection est obtenue par l'abaissement du potentiel électrochimique des armatures à une valeur seuil (potentiel de protection) pour laquelle la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable.

1. But

Le but de cette approche expérimentale est :

- ✓ Etudier l'évolution de la microstructure ainsi que les propriétés de dureté d'un acier de construction avant et après l'opération de laminage (acier brut de coulé sous forme de billette et acier laminé à chaud sous forme de rond à béton).
- ✓ Etudier le comportement à la corrosion de cet acier dans une solution simulée du béton contaminée avec les chlorures.
- ✓ Faire une corrélation entre l'évolution de la microstructure, la dureté et la résistance à la corrosion de l'acier étudié.

2. Matériau de l'étude

Dans notre travail nous avons utilisés comme matériau d'étude un acier de construction utilisé pour la fabrication du rond à béton au niveau du complexe sidérurgique Algerian-Qatari Steel de Bellara.

La composition chimique obtenue après analyse spectrale effectuer sur l'acier avant et après laminage (billette - rond à béton) est présentée sur les tableaux si dessus :

Tableau III.1 : les teneurs des éléments présents dans les billettes.

| Eléments | Fe | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teneur en % | 99.233 | 0.133 | 0.080 | 0.446 | 0.015 | 0.018 | 0.020 |

Tableau III.2 : les teneurs des éléments présents dans l'acier rond à béton.

| Eléments | Fe | C | Si | Mn | P | S | Cr |
|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teneur en % | 99.252 | 0.144 | 0.075 | 0.436 | 0.015 | 0.016 | 0.020 |

L'analyse spectrale est une technique basée sur l'excitation de l'échantillon par une source d'électricité, a été réalisé au niveau du laboratoire SMS du complexe sidérurgique au moyen d'un spectrophotomètre de type émission optique, Figure III.1.

La spectroscopie d'émission optique est une technique d'analyse dont le but est d'analyser quantitativement ou qualitativement des atomes ou des molécules.



Figure III.1 : Spectromètre utilisé au niveau du complexe AQS.

3. Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés ont été prélevé :

- ✓ D'un rond à béton lisse de diamètre 6mm pour le cas de l'étude après laminage (acier traité thermomécaniquement), Figure III.2A.
- ✓ D'une billette pour le cas de l'étude avant laminage (acier brut de coulé), Figure III.2B.

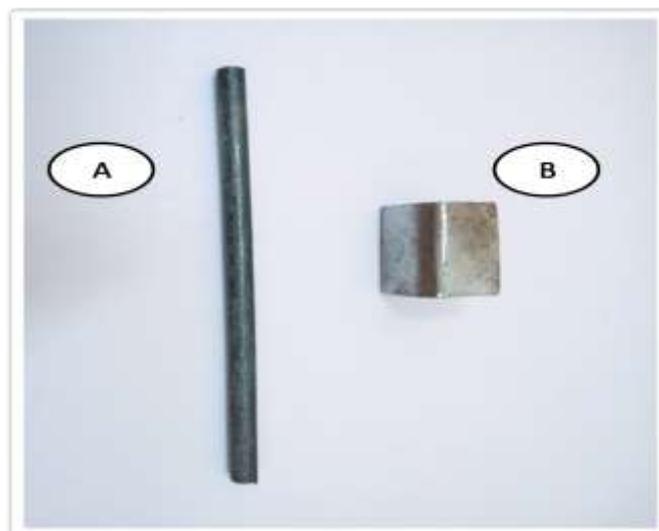


Figure III.2 : Echantillons bruts prélevés de l'AQS.

Pour le cas des essais de caractérisation électrochimique ont été préparé par soudage d'un fil électrique de connexion puis isolées électriquement par de la résine époxy toute en concernant une surface de l'acier active ou de travail en contact avec la solution électrolytique, Figure III.3.



Figure III.3 : Echantillons pour les essais de caractérisation électrochimique.

Remarque :

Chaque essai des différentes électrodes ont fait l'objet de préparation de surface comprenant un décapage mécanique par polissage sur papier abrasif de taille décroissante suivi d'un dégraissage à l'éthanol, rinçage et séchage à l'air de laboratoire.

4 .Milieux électrolytiques

L'évaluation du comportement à la corrosion de l'acier sous ses deux états différents (billet et rond à béton) a été réaliser dans une solution électrolytique de Ca(OH)_2 en saturation.

Cette solution très alcaline ($\text{pH}=12,7$) est couramment utilisée comme solution simule du milieu électrolytique interne du béton sain (frais)

Afin de simulé le milieu interne d'un béton contaminé des ions chlorures ont été ajouté sous forme de NaCl pour une concentration 0,5 M ce qui vaut 30 g/L en poids.

5. Techniques expérimentales

a- Etude microstructurale

Les observations métallographiques permettant de mettre en évidence les modifications microstructurales de l'acier avant et après laminage ont été réalisées avec un microscope optique métallographique de type Euromax au niveau de laboratoire LIME de l'université de Jijel, Figure III.4.



Figure III.4 : Microscope optique métallographique.

L'examen métallographique est réalisé après un polissage avancé des échantillons (polissage avec de la pâte diamantée) suivi d'une attaque chimique au Nitale 4% afin de mettre en évidence les joints des grains et différencier les constituants microstructuraux.

b- Mesure de dureté

Les mesures de dureté de l'acier sous ses deux différents états, avant et après laminage, ont été réalisées sur trois différentes échelles : HRB, HRC au moyen d'un duromètre universel au niveau de laboratoire des propriétés mécaniques du complexe

AQS, Figure III.5. sur l'échelle HV à l'aide d'un microduromètre du laboratoire de physique de l'université de Jijel, Figure III .6.



Figure III.5 : Duromètre universel du complexe AQS.



Figure III.6 : Microduromètre AFFRI Model DM2D, laboratoire de physique de l'université de Jijel.

C- Analyse électrochimique

Les essais électrochimiques utilisés pour la caractérisation du comportement à la corrosion du matériau étudié (polarisation potentiodynamique $I(E)$) est impédance électrochimique EIS) ont été réalisés au moyen d'une chaîne électrochimique,

Figure III.7, composée :

- d'une cellule à trois électrode, électrode de référence électrode de auxiliaire en Platine et une électrode de travail (l'acier étudié).
- d'un potentiostat-Galvanostat du type Radiométer modèle PGZ 301.



Figure III.7 : Chaîne électrochimique.

Des mesures de potentiels à circuit ouvert ($E_{\text{corr}}=f(t)$) ont été également réalisées avec un montage composé des électrodes de référence ECS et un millivoltmètre à haute impédance d'entrée, Figure III.8.



Figure III.8 : Montage pour la mesure de potentiel.

Remarques :

- ✓ Les courbes I(E) ont été obtenus sous les conditions suivantes :
 - Gamme de balayage de potentiel de $-200/E_{\text{corr}}$ à $+800/\text{ref}$
 - Vitesse de balayage de 0,25 mV/s.
- ✓ Les spectres d'impédances EIS ont été tracés au potentiel de corrosion (E_{corr}) pour une gamme de fréquence allant de 100 KHZ à 10 MHz et une amplitude de signal de l'ordre de 10 mV.
- ✓ Tous les essais ont été réalisés à la température de laboratoire et sans agitation.

1. Analyse microstructurale et mesure de dureté

1.1. Analyse microstructurale

Afin de mettre en évidence la composition microstructurale de l'acier étudié sous ces deux différents états, brut de coulée (billet) et laminé (rond à béton), les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une caractérisation microstructurale par observations au microscope optique métallographique. Les micrographies obtenues sont représentées sur la Figure IV.1 et la Figure IV.2.

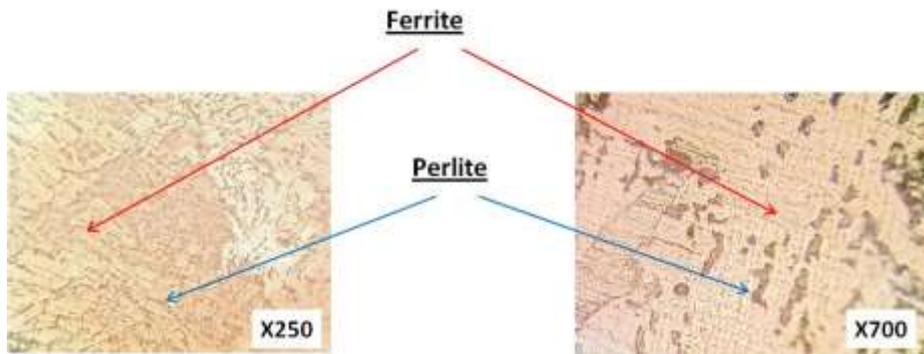


Figure IV.1 : Structure métallographique de l'acier brut de coulée (billet)

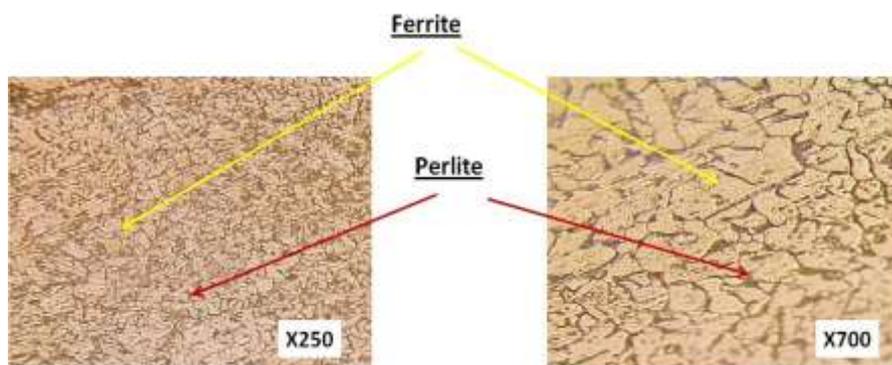


Figure IV.2 : Structure métallographique de l'acier laminé

D'après les micrographies présentées sur la Figure ci-dessus on remarque ce qui suit :

- Les deux types d'échantillons présentent la même composition microstructurale. Leur structure métallographique est constituée principalement de la ferrite et de la perlite, bien évidemment avec la présence de la cémentite secondaire (Fe_3C)^{II} au moment qu'ils sont tout deux des aciers hypoeutectoïdes comme l'indique le diagramme d'équilibre métastable fer-carbone. Cependant, la ferrite est la phase la plus prédominante, il s'agit dans ce cas d'une structure dite « ferritoperlitique ».

- La différence entre les microstructures des deux échantillons réside principalement dans la forme et la taille des constituants structuraux. D'après les micrographies présentées on

observe que pour l'acier brut de coulée, la ferrite se présente sous forme de gros grains occupant la majeure partie de la matrice métallique. De même que pour la perlite qui se présente sous des différentes formes : grains allongés, petits grains arrondis et grains de forme déformés. Alors que pour la structure de l'acier laminé, la ferrite se présente sous forme de grains de taille plus petite et de forme pratiquement identique. La perlite à son tour se présente sous forme de grain de forme aléatoire mais de taille plus petite.

-L'autre différence à noter entre les deux microstructures concerne la distribution de ses constituants. Nous constatons ainsi que la structure de l'échantillon de l'acier brut de coulée est moins homogène que celle de l'échantillon en acier laminé. Dans ce cas la ferrite, phase prédominante, occupe presque toute la surface alors que la perlite est distribuée aléatoirement et sous forme d'amas dans certaines zones. Pour le cas de l'acier laminé la distribution des constituants est plus homogène, la perlite se situe entre les grains de la ferrite d'une façon plus au moins ordonnée.

La différence entre les microstructures des deux échantillons peut être expliquée comme suite : la structure de l'acier billette est une structure qui se forme sous des conditions d'élaboration et de refroidissement particulières, une fois le métal est coulé à partir du four de fusion pour prendre la forme d'une billette, les couches extérieures seront en contact avec l'eau de refroidissement de dispositif de coulée puis avec l'air ambiant, elles sont refroidies plus vite alors que les couches internes gardent encore de la chaleur et se refroidissent plus lentement. Pour le cas de la structure de l'acier lamine, qui est d'origine acier brute de coulée, la déformation à haute température et considérée comme un traitement à la fois mécanique et thermique du métal. L'énergie mécanique provoque le phénomène dit *d'écrouissage* (déformation des cristaux), alors que l'énergie thermique provoque le phénomène de recristallisation (naissance de nouveaux cristaux au détriment des cristaux écrouis) ce qui aboutit à la formation d'une structure plus au moins fine et homogène.

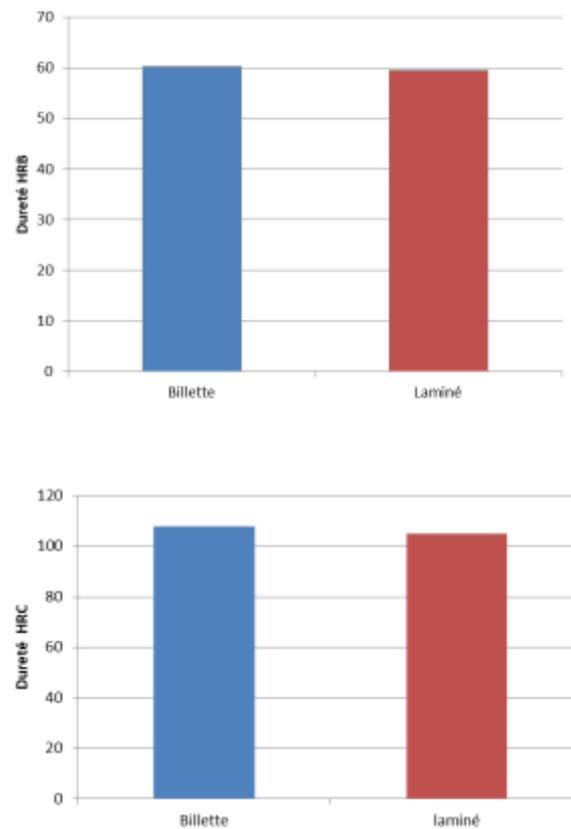
Il est important de signaler ici que la structure de l'acier billette peut présenter certains défauts ayant comme origine la fusion et la coulée du métal. C'est le cas par exemple des soufflures, incrustation de débris de revêtement du four, inclusions non métalliques, etc. La micrographie de la Figure IV.3 permet de mettre en évidence la présence de tels défauts qui peuvent affecter les différentes propriétés de l'acier, notamment la résistance à la corrosion.



Figure IV.3 : Défauts de surface sur l'acier brut de coulé avant laminage (billette)

1.2. Mesure de dureté

L'évaluation de l'effet du traitement thermomécanique (laminage à chaud) sur l'évolution de la dureté de l'acier destiné au rond à béton et fil machine du complexe AQS et réalisée par des mesures de dureté des échantillons en acier avant et après laminage. Les résultats de ces mesures effectuées sur trois échelles de dureté différentes, HRB, HRC et HV, sont présentés sur la Figure IV.4.



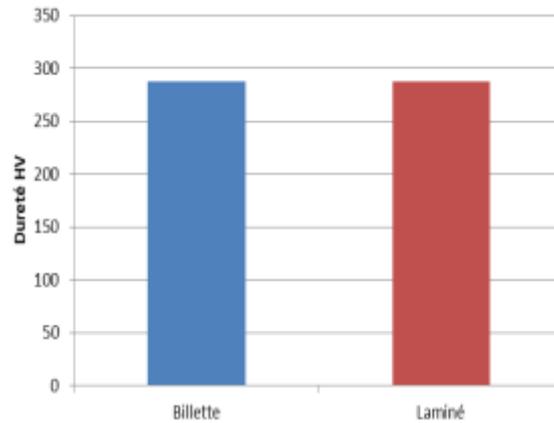


Figure IV.4 : Mesure de dureté des échantillons sur différentes échelles de dureté : HRB, HRC et HV

A première vue, et d'après les histogrammes présentés sur la figure, on remarque que la propriété de dureté n'est pas vraiment affectée par la déformation par laminage à chaud.

Sur les trois échelles de mesure de dureté (HRB, HRC et HV) les résultats de mesure indiquent des valeurs de dureté presque identiques pour les deux types d'échantillons. A titre indicatif sur l'échelle de dureté HRB nous avons pour l'échantillon brut de coulée une valeur de dureté égale à 60,33 HRB alors que pour l'échantillon laminé elle est de l'ordre de 59,56 HRB.

2. Analyse électrochimique

2.1. Mesure du potentiel de corrosion

Le potentiel de corrosion E_{corr} ou le potentiel à circuit ouvert, appelé aussi potentiel de dissolution, est une grandeur caractéristique aux conditions expérimentales, sa mesure permet d'apprécier les modifications que subit l'interface métal-solution avec le temps et par conséquent d'avoir une idée préalable, d'un point de vue thermodynamique, sur le comportement électrochimique d'un métal au contact d'un milieu électrolytique.

Les variations des potentiels de corrosion enregistrées (courbes $E_{\text{corr}}(\text{temps})$) renseignent sur la dégradation, la passivation ou l'immunité de la surface métallique.

L'évolution du potentiel à circuit ouvert dans le temps est fortement liée à la durée d'immersion du matériau dans le milieu électrolytique, en fonction de celle-ci le matériau peut présenter différents comportements électrochimiques, comme par exemple être actif dans un premier temps puis se passiver par la suite. De ce fait, et pour avoir une idée plus large sur l'évaluation de cette grandeur thermodynamique importante, nous nous sommes intéressés dans notre étude à deux types de mesures de E_{corr} : mesures à courte durée (1/2 heure) et mesures à longue durée (8 jours). Les résultats obtenus sont représentés constitutivement sur les Figures IV.5 et IV.6.

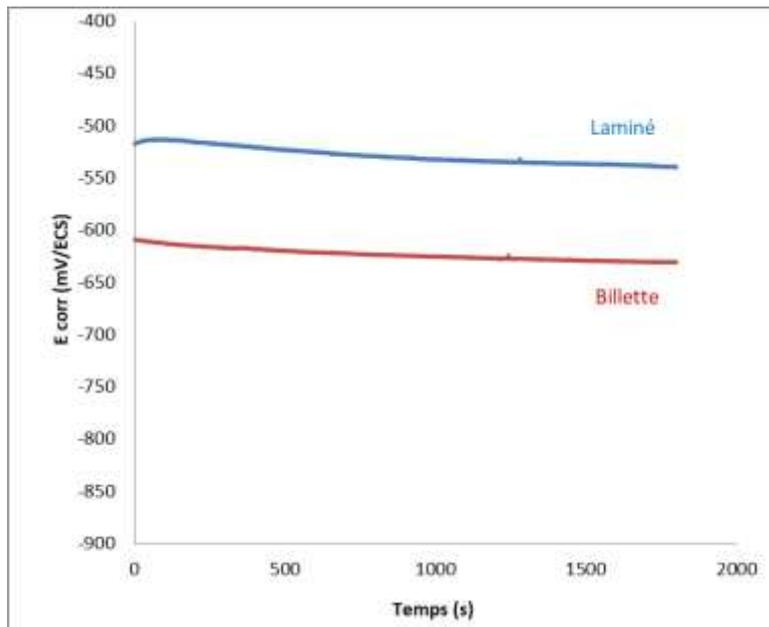


Figure IV. 5 : Evolution du potentiel d'abandon de l'acier immergé dans la solution simulée du béton chlorurée pour une courte durée (1/2 heure)

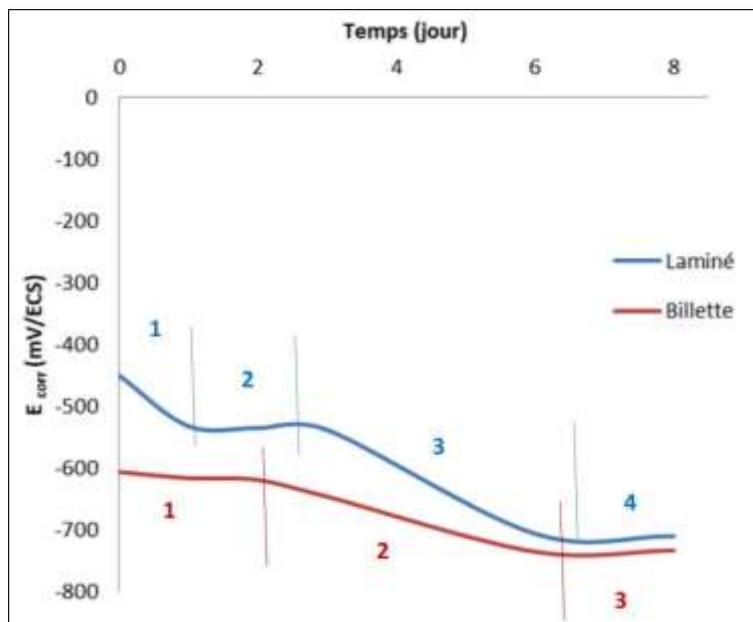


Figure IV. 6 : Evolution du potentiel d'abandon de l'acier immergé dans la solution simulée du béton chlorurée pour une longue durée (8 jours).

D'après l'allure des courbes obtenues nous pouvons constater facilement l'effet de la durée d'immersion de l'acier dans le milieu agressif sur l'évolution de son potentiel de

dissolution. Ainsi, nous remarquons que plus la durée d'immersion est allongée plus la modification du potentiel est prononcée.

Les courbes de la Figure IV.5 indiquant l'évolution du potentiel libre de l'acier pendant 30 minutes d'immersion dans la solution indique un sens d'évolution similaire pour les deux types d'échantillons, c'est-à-dire que le potentiel devient de plus en plus moins noble au cours du temps mais avec une légère pente, ce qui correspond à une dissolution continue du métal. Cependant, on constate que l'échantillon en acier laminé présente des valeurs de potentiel (de -520 à -540 mV) plus grandes que celles de l'échantillon en acier brut de coulée (de -615 à -635 mV).

Pour des durées d'immersion plus longues (8 jours) les résultats obtenus, Figure IV.6, indiquent une évolution différente du potentiel libre au cours du temps pour les deux échantillons. Ainsi, on remarque que pour l'échantillon brut de coulée (billette) la courbe E(temps) peut être divisée en trois différentes zones :

- 1- Zone correspondante à une légère diminution du potentiel,
- 2- Zone correspondante à une diminution du potentiel plus accentuée,
- 3- Zone correspondante à une pseudo-stabilité du potentiel.

Alors que pour le cas du potentiel de l'échantillon en acier laminé, ce dernier se comporte un peu plus différemment, la courbe obtenue est composée de quatre zones :

- 1- Zone correspondante à une diminution accentuée du potentiel
- 2- Zone correspondante à une pseudo-stabilité avec même une légère augmentation du potentiel,
- 3- Zone correspondante à une nouvelle diminution du potentiel mais plus accentuée que l'antécédente,
- 4- Zone correspondante de nouveau à une pseudo-stabilité du potentiel.

Ces différentes évolutions du potentiel traduisent clairement une activité plus au moins élevée de l'acier sous ses deux différents états avec tentative de passivation suite à l'effet compétitif entre les ions OH^- et Cl^- dans la solution.

Comme première constatation, les résultats obtenus indiquent que l'acier brut de coulée est plus actif d'un point de vue électrochimique que l'acier laminé dans la solution simulée du béton chlorurée.

2.2. Courbes de polarisation potentiodynamique

La potentiométrie peut fournir des informations sur l'évolution d'une interface électrochimique d'un point de vue thermodynamique, cependant elle ne donne aucune indication sur la cinétique des mécanismes réactionnels en question. De plus, l'évolution du potentiel libre d'un métal vers des valeurs plus nobles n'est pas toujours corrélée à une augmentation de la résistance à la corrosion et vis-versa. Il est donc indispensable de faire des mesures de la valeur de courant de corrosion par le tracé des courbes de polarisation ($i = f(E)$).

Les courbes de polarisation potentiodynamique traduisant le comportement électrochimique de l'acier sous forme billette et laminé dans la solution simulée chlorurée sont représentées sur la Figure IV.7.

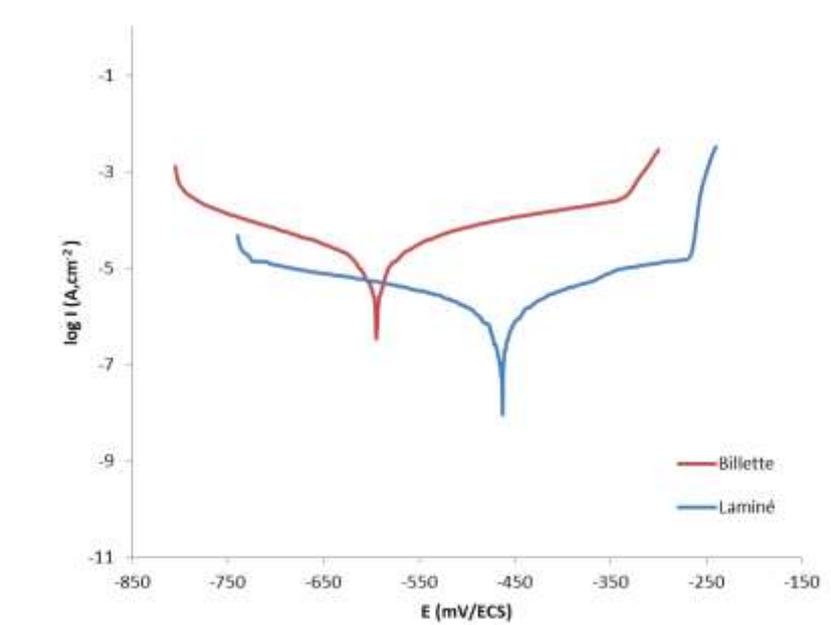


Figure IV.7 : Courbes de polarisation de l'acier dans la solution simulée du béton chlorurée.

D'après les courbes de polarisation logarithmiques obtenues on remarque que les deux échantillons se comportent de la même façon dans la solution. On remarque ainsi qu'une fois le domaine anodique est franchi ($E > E_{corr}$) le métal devient de plus en plus actif, ceci se traduit par une augmentation de la densité de courant avec la surtension appliquée. A partir d'une certaine valeur de potentiel ($E = E_{pit}$) on remarque sur les deux courbes une augmentation brusque du courant correspondant à une dissolution accélérée et continue du métal générée par la formation des piqûres de corrosion sous l'action des ions Cl^- .

Cependant et d'après ces résultats on remarque que l'échantillon en acier laminé s'avère plus résistant à la corrosion que l'autre échantillon. Il présente, ainsi, des valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} et de dépassivation E_{pit} plus nobles. De plus sa densité de courant de corrosion i_{corr} est beaucoup moins élevée ce qui correspond à un taux de corrosion plus faible.

Sur le Tableau IV.1 sont présentées les valeurs des différents paramètres électrochimiques extraites à partir courbes de polarisation par extrapolation des droites de Tafel.

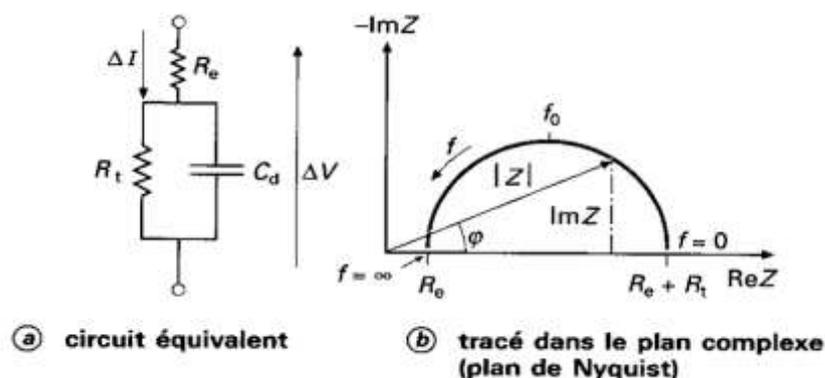
Tableau IV.1 : Paramètres traduisant le comportement électrochimiques de l'acier brut de coulée et l'acier laminé dans la solution simulée du béton chlorurée.

| Echantillons | E_{Corr} (mV/ECS) | i_{Corr} ($\mu A/cm^2$) | R_p (Kohm.cm ²) | E_{pit} (mV/ECS) |
|--------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Laminé | -463,7 | 1,42 | 38,88 | -266.3 |
| Billette | -594,6 | 15,23 | 1,82 | -331.6 |

2.3. Spectroscopie d'impédances électrochimiques (EIS)

La polarisation potentiodynamique est une technique d'analyse électrochimique permettant de donner une idée plus au moins détaillée sur la cinétique des réactions de corrosion mais sous des conditions assez différentes des conditions réelles des systèmes redox étudiés, car une polarisation anodique ou cathodique provoque souvent la modification de l'interface électrochimique. Pour contourner ce problème, on fait appel à des techniques plus développées dans le domaine de l'électroanalyse, il s'agit dans ce cas de la spectroscopie d'impédances électrochimiques (EIS).

La technique EIS est basée sur la perturbation de l'interface M/S par un signal sinusoïdale de faible amplitude sans qu'il ait polarisation de celle-ci et mesurer la réponse du système obtenu sous forme de spectres (Nyquist et Bode) qui seront convertis par simulation à des circuits électriques équivalents, Figure IV.8. Ces circuit composés d'éléments électriques passifs (résistance R, capacité C, inductance L) permettent de caractériser le comportement électrochimique du système redox d'un point de vue thermodynamique et cinétique sous un régime transitoire assez proche du réel.



Figures IV.8 : Exemple de spectre d'impédance obtenu sur le plan Nyquist avec le circuit électrique équivalent correspondant ^[31].

Dans notre étude, nous allons se limiter à une analyse des spectres obtenus sur le plan Nyquist basée sur la comparaison de la taille et de la forme des spectres.

La Figure IV.9 représente les spectres d'impédances électrochimiques tracés sur le plan Nyquist obtenu pour l'acier dans la solution simulée chlorurée.

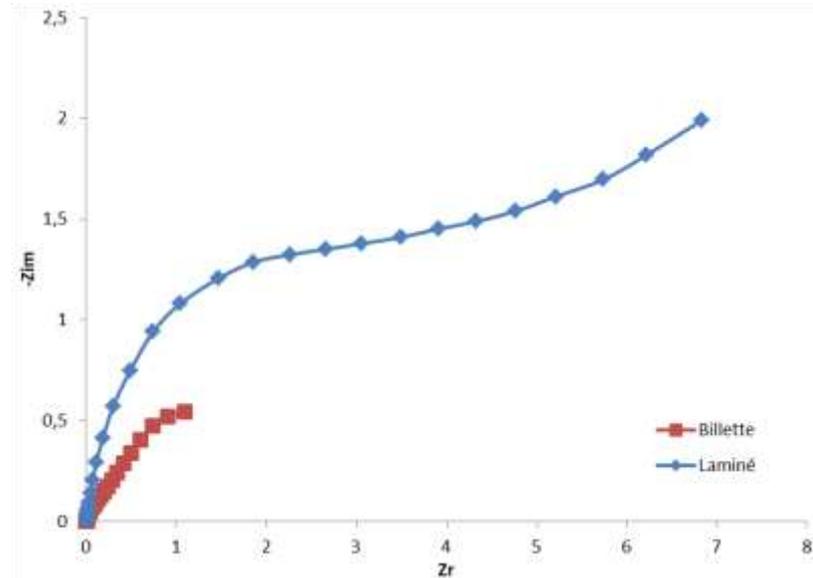


Figure IV.9 : spectres d'impédances traduisant le comportement électrochimique de l'acier dans la solution simulée du béton chlorurée.

D'après ces résultats, on constate que la technique d'impédances électrochimiques confirme en quelques sortes les résultats obtenus par les deux techniques d'analyse précédentes (mesure du potentiel de corrosion et polarisation potentiodynamique) concernant le comportement électrochimique de l'acier sous ses deux différents état dans le milieu de l'étude.

Ainsi, on observe que les diagrammes de Nyquist obtenus pour les deux échantillons, et quoi qu'ils ont la même forme, présentent une différence flagrante dans la taille. Le diagramme obtenu pour l'échantillon brut de coulée est composé de boucles de taille beaucoup plus faible que celle des boucles obtenues pour l'échantillon en acier laminé. Ce qui implique que l'échantillon en acier brut de coulée est beaucoup plus actif, il est donc moins résistant à la dissolution par corrosion dans la solution simulée du béton chlorurée.

3. Discussion des résultats

Les résultats obtenus indiquent que la mise en forme par laminage à chaud que subit l'acier au niveau du complexe sidérurgique AQS provoque une modification structurale sur le plan morphologique des constituants structuraux, taille et forme, sans qu'il modifie la nature des phases existantes. Il aboutit aussi à une distribution homogène des différentes phases sur la matrice métallique. Ceci est dû principalement du l'action conjuguée mécano-thermique de procédé de laminage qui provoque à la fois l'écroutissage des cristaux préexistants de l'acier suivi par la naissance de nouveaux cristaux de taille plus petites et distribution plus homogène au détriment des cristaux écroutis selon le mécanisme de recristallisation.

La modification microstructurale générée par la mise en forme par laminage de l'acier, n'a pas d'influence notable sur les propriétés de dureté de l'acier, cependant son comportement à la corrosion est sensiblement influencé. Ainsi, l'analyse électrochimique par les différentes techniques utilisées indique que la structure de l'acier après laminage lui confère une résistance à la corrosion plus élevée que celle de l'acier brut de coulée (acier avant laminage).

En effet, il n'est plus à démontrer que le comportement à la corrosion de l'acier à bas carbone est bien lié à la nature, la morphologie et la distribution de ses constituants structuraux (ferrite, perlite, cémentite, martensite, etc.).

Dans notre étude la différence dans le comportement à la corrosion des deux structures présentées par l'acier avant et après laminage est due essentiellement à la texture de la perlite qui est formée de paquets alternés de ferrite et cémentite (Fe_3C). Il est à noter que la perlite présente une aptitude à la corrosion élevée, car sa texture correspond, d'un point de corrosion, à un grand nombre de cellules galvaniques composées de ferrite/cémentite. Ces couples seront le siège d'une corrosion galvanique (dissolution anodique de la phase ferritique). Dans ce cas il existe deux principaux paramètres qui influent sur le déroulement de ce mécanisme de corrosion galvanique : (i) la forme et la taille des grains, (ii) la quantité des carbures.

La finesse de la structure joue un rôle important, car la résistance à la corrosion est en relation avec le rapport entre la surface des carbures de fer et celle de la phase ferritique. La quantité des carbures est un facteur important, car plus les carbures sont moins présents plus le nombre des couples galvaniques est moindre et plus la résistance à la corrosion de l'acier est meilleure.

Conclusion générale

A l'issue de ce travail, dont l'objectif principale été d'étudier les modifications microstructurales que subit l'acier dans l'atelier de laminage à chaud du complexe AQS ainsi que leur influence sur les propriétés de dureté et le comportement à la corrosion de l'acier laminé dans une solution aqueuse simulant le milieu interne d'un béton contaminé, nous avons à conclure ce qui suit :

- ✓ L'acier rond à béton est un acier à bas carbone, généralement hypoeutectoïde, obtenu après mise en forme par déformation à chaud.
- ✓ Le laminage à chaud est considéré comme un traitement à la fois mécanique et thermique, il peut modifier la structure de l'acier et par conséquent ses différentes propriétés fonctionnelles.
- ✓ Dans les conditions d'un béton sains et de bonne qualité l'acier rond à béton se trouve dans un état de stabilité électrochimique parfaite en raison de la haute basicité du milieu cimentaire interne qui favorise la passivation de la surface métallique,
- ✓ La contamination du béton par les agents agressifs peut modifier les conditions de passivation de l'acier dans le béton et induit une attaque par corrosion localisée et/ou généralisée conduisant la réduction de la section nominale des barres d'armature ainsi que la perte d'adhérence acier/béton. Dans la plus part des cas, il s'agit de la pénétration des chlorures et/ou la carbonatation.
- ✓ L'acier brut de coulé (billette) utilisé au niveau de l'AQS présente une structure principalement biphasée composée de ferrite, comme phase prédominante, et de perlite. C'est une structure non homogène d'un point de vue forme, taille et distribution des phases cristallines.
- ✓ Le laminage à chaud que subit l'acier à permet de modifier la morphologie des constituants structuraux de l'acier ainsi que leur distribution sur la matrice métallique sans qu'il modifie la nature de ces constituants.
- ✓ La modification microstructurale provoquée par le laminage n'a pas d'influence notable sur les propriétés de dureté de l'acier laminé.
- ✓ Le laminage à chaud de l'acier a provoqué une amélioration sensible de la résistance à la corrosion de l'acier dans la solution simulée du béton chlorurée. Cette amélioration est due essentiellement à l'homogénéisation de la microstructure d'une point de vue morphologique et distribution dans la matrice métallique.

- ✓ La taille et la forme des grains des constituant structuraux influent d'une manière directe sur le comportement électrochimique des aciers à bas carbone car elles modifient le rapport de surface carbures de fer (Fe_3C) / ferrite. La phase ferritique en contact avec la cémentite Fe_3C dans un milieu électrolytique agressif subit une dissolution anodique car elle joue le rôle d'anode devant les carbures qui sont thermodynamiquement plus stable et qui forment ainsi la cathode dans ce couplage galvanique.

- [1]- **I.LAKHTINE**, *Métallographie et traitements thermiques des métaux*, troisième édition, Mir. Moscou, 1986.P.138.
- [2]- **J.FAUCHART**, *INITIATION AU CALCUL DES STRUCTURES-BETON ET ACIER-4^{ème} édition. COURS DE L'ENPC*, Paris, 1983.
- [3]-**S.BENSAADA**, *science des matériaux, caractéristiques et structures des métaux et alliages*, deuxième édition, office des publication universitaire.[s.d],[s.l].
- [4]- **J.BARRALIS et G. MAEDER**, *Précis de Métallurgie Elaboration. Structures-Propriétés et Normalisation*, 6^{ème} édition, AFNOR-NATHAN. Paris, 1997.
- [5]-**JP. BAÏLON et JM.DORLOT**. *Des matériaux*. Presses internationales Polytechnique, 2000.
- [6]- **H. BENSABRA**. *Cours de Corrosion et Protection des Métaux*, Université de Jijel, 2016.
- [7]- **A.QUERUEL**. *Aide-mémoire Traitement de surface des aciers*. French, Dunod, 2007.
- [8]- **D.MICHEL**. *Aide mémoire de science des matériaux*. Dunod, 2005.
- [9]- **S. Ikhlef, T. Boubidi**. *Effet des traitements thermiques sur le comportement à la corrosion du rond à béton produit au niveau du complexe sidérurgique Algerian Qatari Steel (AQS) d'EI Milia*, Mémoire de master, Université de Jijel, 2018.
- [10]-**O. EMIL**. *Technologie de matériaux de construction. Tome II*, 1978.
- [11]- **N. Boubaa, A. Guerdouh**. *Etude de la corrosion des aciers d'armatures*, Mémoire d'ingénieur d'état, Université de Jijel, 2007.
- [12]- **M.COLOMBIÉ**. *Matériaux métalliques-2ème édition*. Hachette, 2008.
- [13]- **Y.CHÉRAIT et Z.NAFA**. *Eléments de matériaux de construction et essais*. Direction de la publication universitaire de GUELMA, 2007.
- [14]- **Ir. P. Boeraeve**. *Cours de Béton Armé*, 2010.
- [15]- **R. Desgagnés, R. Langevin, et al**. *Guide d'auto-apprentissage. Canada*, Perform, 2015.
- [16]- **S. Bensaada**. *Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes*, document internet, 2019.
- [17]- <https://www.bodycote.com/fr/services/traitement-thermique/recuit-normalisation/recuit/>
- [18]- <https://ferrosplanes.com/fr/laminage-a-chaud-et-laminage-a-froid-differences-et-avantages/>

- [19]- <https://www.reliance-foundry.com/blog/acier-lamine-chaud-contre-froid-fr#gref>
- [20]- **I. Bengacemi.** *Laminage à chaud*, Mémoire de master, Université de Annaba, 2018.
- [21]- **J.LAMOUREUX.** *Précis de corrosion*, édition Beau chemin. 1994.
- [22]- **J.SARRAZIN. et M.VERDAGUER.** *L'oxydoréduction Concepts et expériences*, édition Ellipses. 1991.
- [23]- **S. Bensaada.** *Cours de corrosion*. Office des publications universitaires.
- [24]- **F.ROPITAL.** *Corrosion et dégradation des matériaux métalliques: compréhension des phénomènes et applications dans l'industrie pétrolière et des procédés*. Editions TECHNIP, Paris, 2009.
- [25]-**A. KOMAR.** *Matériaux et éléments de construction*. Éditions Mir. Moscou, 1973.
- [26]- **J.PHILIBERT, A.VIGNES, et al.** *Métallurgie*, deuxième édition, Dunod, Paris: Masson, 1998.
- [27]-**D. LANDOLT.** *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*. PPUR presses polytechniques, 2003.
- [28]- http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap6/site/html/3_2.html
- [29]- **S. Chakri.** *Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2015.
- [30]- https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs34.html
- [31]- <https://www.techniquesingenieur.fr/search.html?query=diagramme+de+nyquist>

Chapitre I

Les aciers ronds à béton

Chapitre II

Corrosion des métaux

Chapitre III

Partie expérimentale

Chapitre IV

Résultats et analyses

Introduction générale

Conclusion générale