

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR TELIDJI- LAGHOUAT

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCE DE L'INGENIERIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de Master

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Option : Sciences des Matériaux

Présenté par :

BOUCHERIA Ahmed

BOUZID Roumaissa

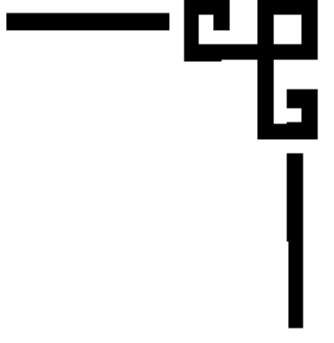
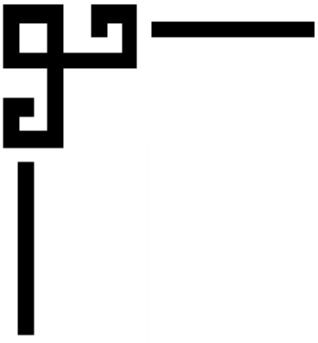
Thème

**Effet du temps de maintien de traitement thermique
sur la résistance à la corrosion d'un acier X70**

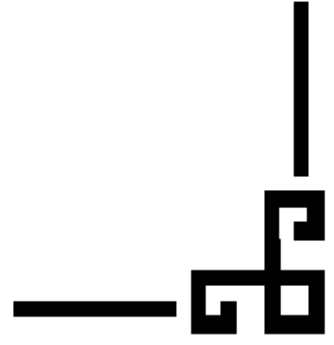
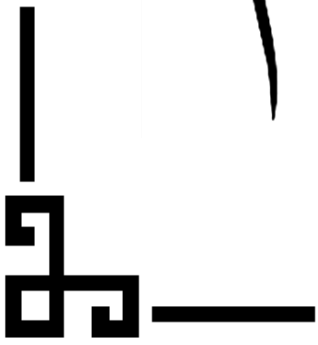
Devant le jury

Président :	ZIDELMEL SAMI.	Dr	UAT Laghouat
Examineur :	Mansouri Tahar	MCB	UAT Laghouat
Encadreur :	Noureddine Mustapha	MCA	UAT Laghouat
CO-Encadreur :	Barkat Med Redouane	ING-LABO	UAT Laghouat

ANNEE UNIVERSITAIRE 2023-2024



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Nous tenons à remercier avant tout notre ALLAH

Qui grâce à lui nous sommes arrivés à ce stade.

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements À notre encadreur

Pr. Mustapha Noureddine pour tous les efforts four Nis afin de mener

À terme notre mémoire. Pour ses précieux conseils et son aide durant

Toute la période du travail.

Nous remercions vivement le président du jury et les membres de jury

pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail .

Je tiens aussi à remercier l'administration du département

De génie mécanique Youcefi Ahmed et Pr. Hadj Aissa.

Nous remercions pour l'équipe laboratoire mécanique

Pr. Barkat Med Redouane

Je remercie vivement tous les professeurs qui ont donné le meilleur

D'eux-mêmes afin de nous assurer une formation et un avenir digne.

Nous remercions à tous les personnes qui nous ont aidé dans notre

travail de près ou de loin.

Dédicace

Avec l'aide de Dieu le tout puissant.

Je dédie ce modeste mémoire de Master :

*Mon père et Ma mère, qui étaient mes assistants dans mon
domaine jusqu'à ce que j'atteigne ce niveau.*

A Mon frère : Tahar

A Mon oncle : Aissa

À toute ma famille

A mes Professeurs d'université

A tous mes collègues et amis.

À tous ceux qui ont contribué de près Ou de loin

A la réalisation de ce projet.

BOUCHERIA Ahmed

Dédicace

A l'aide de dieu, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie

À mon très cher papa et ma très chère maman.

*Pour sacrifier leur soutien moral, leur tendresse, leur
encouragement.*

A la chère famille et à tous amis et proches

A mes amies : Imane et Fatima

A mes Professeurs d'université

A toutes personnes qui m'ont encouragé et soutenu durant

Mo parcours scolaires et académiques.

BOUZID Roumaïssa

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجات الحرارية في أوقات مختلفة على تآكل الفولاذ X 70. شملت هذه الدراسة الفحص بواسطة المجهر الضوئي البنى المجهرية للعينات المدروسة (بدون معالجة حرارية، معالجة حرارية عند 500 درجة مئوية و600 درجة مئوية) في ثلاث مناطق لحام منطقة المعدن الأساسي (MB) ومنطقة المعدن المنصهر (MF) والمنطقة المتضررة الحرارية (ZAT).

وقد وجد أن المعالجة الحرارية لها تأثير في تقليل الضغوط الداخلية وتنظيم التركيب البلوري للعينات. وتم إجراء الاختبارات الكهروكيميائية لمعرفة سلوك التآكل قبل وبعد المعالجة الحرارية للعينات المدروسة، ومقارنتها بواسطة رسم منحنيات التافيل، ومنه نرى أنه كلما زادت سرعة مقاومة التآكل للصلب زادت مقاومة الاستقطاب (Rp) و (icor) متناسبان عكسياً. ومن هذا استنتجنا أن المعالجة الحرارية لها تأثير إيجابي على معدل التآكل وزيادة عمر وصمود الفولاذ X 70.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الفولاذ X 70، المعالجة الحرارية، مناطق لحام، الكهروكيميائية.

Résumé

Le but de ce travail est l'étude de l'influence des traitements thermiques sur la corrosion des aciers X 70. Une série de traitements thermiques a été réalisée à des températures allant de (500 à 600°C), dans trois zones de soudure , (MB), (MF), (ZAT) .

On a trouvé que le traitement thermique a pour conséquence de diminuer les contraintes internes et ordonner la structure cristalline des échantillons. Le tracé des courbes de Tafel des a également été effectué pour voir le comportement à la corrosion avant et après le traitement thermique, a partir des courbes de Tafel plus la résistance de l'acier à la corrosion est grande, plus la résistance à la polarisation est grande R_p et i_{cor} sont inversement proportionnels.

La tenue à la corrosion de l'acier traité a été mise en évidence par les tests électrochimiques, la vitesse de dissolution de fer a été diminuer par l'effet bénéfique de traitement thermique comparativement de l'échantillon sans traitement thermiques.

Mots clés : l'acier x70 , Corrosion , traitement thermique, zones de soudure, électrochimiques.

Listes des figures

CHAPITRE I : Etude Bibliographique	
Figure	Page
Figure I.1.1 : Durcissement de la solution solide de la ferrite par les éléments d'alliages	20
Figure I.1.2 : Acier micro allié ferritoperlitique	21
Figure I.1.3 : les zones de la soudure	24
Figure I.1.4 : différentes parties constitutives d'un joint soudé	25
Figure I.2.1 : La nature des paramètres dus à la corrosion	26
Figure I.2.2 : Corrosion uniforme	28
Figure I.2.3 : Corrosion localisée.	28
Figure I.2.4 : Schéma illustrant la corrosion-Erosion	29
Figure I.2.5 : Schéma illustrant la corrosion sous contrainte	31
Figure I.2.6 : Schéma illustrant la corrosion caverneuse	32
Figure I.2.7 : Schéma illustrant la corrosion inter-granulaire	32
Figure I.2.8 : Schéma illustrant la corrosion frottement	33
Figure I.2.9 : Schéma Protection cathodique par courant imposé	34
Figure I.2.10 : Schéma Protection cathodique par anode galvanique	34
Figure I.2.11 : cellule électrochimique	35
Figure I.2.12 : Détermination de l'intensité du courant de corrosion	36
Figure I.2.13 : Détermination de la résistance de polarisation	37
CHAPITRE II : Techniques Experimentales	
Figure	Page
Figure II.1.1 : Four CARBOLIT	39
Figure II.1.2 : Cycle d'un traitement thermique	40
Figure II.1.3 : Différentes étapes de préparation des échantillons	42
Figure II.1.4 : Polisseuse	42
Figure II.1.5 : Réactif Nital	42
Figure II.1.6 : Microscope optique de type LIECA DMLM	43
Figure II.2.1 : Préparation des électrodes de travail	44
Figure II.2.2 : Dispositif Expérimental de la technique potentiostatique	45
Figure II.2.3 : Electrodes de travail	46
Figure II.2.4 : Electrode de référence au calomel saturée.	46
Figure II.2.5 : Equipement électrochimique	46
Figure II.2.6 : Liste des méthodes disponibles	47
Figure II.2.7 : Conditions de travail	47
Figure II.2.8 : Courbe $\log I =f(E)$ et les droites de Tafe	48

CHAPITRE III : Résultats Et Interprétation

Figure	Page
Figure III.1.1 : Les microstructures des zones de la soudure avant le traitement thermique	50
Figure III.1.2.1 : Micrographie de la zone Métal de base du cordon de l'acier X70 avec traitement thermique à 500°C	51
Figure III 1.2.2 : Micrographie de la zone métal fondu du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 500°C	52
Figure III.1.2.3 : Micrographie de la zone affectue thermiquedu cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 500°C	53
Figure III.1.3.1 : Micrographie de la zone Métal de base du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 600°C	54
Figure III.1.3.2 : Micrographie de la zone métal fondu du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 600°C	55
Figure III.1.3.3 : Micrographie de la zone affectue thermiquedu cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 600°C	56
Figure III. 2.1 : Droites de Tafel pour pour témoin de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	57
Figure III. 2.2.1 :Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	59
Figure III. 2.2.2 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	59
Figure III. 2.2.3 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	60
Figure III. 2.2.4 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	61
Figure .2.3.1 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	62
Figure .2.3.2 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	63
Figure .2.3.3 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	64
Figure .2.3.4 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	65

Liste des tableaux

Tableau	Page
Tableau (N° I-1): Les facteurs de la corrosion	32
Tableau (N° II -1): compositions chimiques de l'acier x70	39
Tableau (N° II-2) : Traitements thermiques	40
Tableau (N° II-3) : Représentation des paramètres opératoire de l'essai de corrosion	44
Tableau (N° III -1): Résultats obtenus de droites de Tafel pour témoin de l'acier X70 dans une solution (NaCl)	57
Tableau (N° III -2): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	58
Tableau (N° III -4): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	59
Tableau (N° III -5): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	60
Tableau (N° III -6): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	61
Tableau (N° III -7): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	62
Tableau (N° III -8): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	63
Tableau (N° III -9): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	64
Tableau (N° III -10): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)	65

Listes des abréviations

HLE	Aciers à haute limite élastique
API	Institut Américain du Pétrole
5 L	Spécification pour le pipeline
X	Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance
MB	Métal de base
ZF	Zone fondue
ZAT	Zone affectée thermiquement
E_{corr}	Potentiel de corrosion
I_{corr}	Intensité de corrosion
V_{corr}	Vitesse de corrosion
R_p	Résistance de corrosion
i_{corr}	Courant de corrosion (Ampère)
t	Temps en seconde
M	Masse molaire du matériau (mole/g),
n	Nombre d'électrons mit en jeux
F	Nombre de Faraday (96450 C).

Sommaire

ملخص.....	6
Résumé	7
Listes des figures.....	8
Liste des tableaux.....	10
Listes des abréviations	11
Sommaire	12
Introduction générale	17

CHAPITRE I

L'étude Bibliographique

I.1 Généralités sur les aciers HLE	19
I.1.1 Type d'aciers.....	19
I.1.2 Classification des aciers HLE	19
I.1.3 Les aciers HLE résistants à la corrosion atmosphérique	20
I.1.4 Les aciers micro-alliés ferrito-perlitique	20
I.1.5 Propriétés des aciers HLE.....	22
I.1.6 Composés : carbures, nitrure, oxydes	23
I.1.7 Soudage des aciers HLE.....	23
I.1.8 Différentes zones du joint soudé	23
I.1.9 Aspects métallurgiques de la zone soudée.....	24
I.1.10 Aspect traitement thermique de soudage.....	25
Conclusion	25
I.2 Phénomène de Corrosion.....	26
I.2.1 Définition de la corrosion	26
I.2.2 Origine de la corrosion	27
I.2.3 Les types de corrosion	27
I.2.3.1 Corrosion chimique (sèche).....	27
I.2.3.2 Corrosion biochimique	27
I.2.3.3 Corrosion électrochimique (humide).....	28
I.2.4 Les formes de corrosion	28

I .2.4.1 Corrosion uniforme ou généralisée.....	28
I .2.4.2 Corrosion localisée	28
I .2.4.3 Corrosion érosion	29
I .2.4.4 Corrosion sous-contrainte.....	29
I .2.4.5 La Corrosion par piqûres	30
I .2.4.6 Corrosion caverneuse	30
I .2.4.7 Corrosion inter-granulaire	30
I .2.4.8 Corrosion sélective	31
I .2.4.9 La corrosion galvanique	31
I .2.4.10 Corrosions par frottement.....	31
I .2.5. Facteurs de la corrosion.....	32
I .2.6 Méthodes de protection contre la corrosion	33
I .2.6.1 Choisir le bon métal.....	33
I .2.6.2 La passivation	33
I .2.6.3 Revêtements organiques	33
I .2.6.4 Revêtements inorganiques	33
I .2.6.5 Protection cathodique	34
I .2.7 Les méthodes d'évaluation de la résistance à la corrosion.....	35
I .2.7.1 Matériel électrochimique	35
I .2.7.2 Principales méthodes des électrochimiques	36
I .2.7.3 Courant de corrosion	36
I .2.7.4 Résistance de polarisation	37
Conclusion	37

CHAPITRE II

Techniques Experimentales

Introduction.....	39
II. 1 Présentation et préparation des échantillons.....	39
II. 1.1 Matériau d'étude	39
II. 1.2 Composition chimique	39
II. 1.3 Les traitements thermiques.....	39
II. 1.4 Technique de l'enrobage	41
II. 1.5 Polissage de l'échantillon.....	42
II. 1.6 Attaque chimique	42
II. 1.7 Observation en microscope optique	43
II. 2. Étude électrochimique	43
II. 2. 1 Préparation de l'électrode de travail.....	44
II. 2. 2 Préparation des solutions.....	45
II. 2. 3 Le montage électrochimique	45
II. 2. 4 Volta Master 4	47
II. 2. 5 Mesure du potentiel libre	48
II. 2. 6 Choix de la vitesse de balayage.....	48
II. 2. 7 Condition de polarisation	48

CHAPITRE III

Résultats Et Interprétation

III.1. Caractérisation microstructurale d'un acier X70	50
III.1.1 Etat initial.....	50
III.1.2.1 Métal de base	51
III.1.2.2 Metal fondu.....	52
III.1.2.3 Zone affectue thermique.....	53
III.1.3 Revenu à 600 °C	54
III.1.3.1 Métal de base	54
III.1.3.2 Metal fondu.....	55
III.1.3.3 Zone affectue thermique.....	56
III.2 Caractérisation électrochimique.....	57
III.2.1 Témoin	57
III.2.2 Revenu à 500 °C	58
III.2.2.1 Temps de maintien à 30 min.....	58
III.2.2.2 Temps de maintien à 60 min	59
III.2.2.3 Temps de maintien à 90 min	60
III.2.2.4 Temps de maintien à 120 min.....	61
III.2.3 Revenu à 600 °C	62
III.2.3.1 Temps de maintien à 30 min.....	62
III.2.3.2 Temps de maintien à 60 min	63
III.2.3.3 Temps de maintien à 90 min	64
III.2.3.4 Temps de maintien à 120 min.....	65
Conclusion Générale	68
Références bibliographiques.....	69

Introduction générale

Introduction générale

Les aciers HLE (haute limite élastique) sont des aciers microalliés à faible teneur en carbone, dont le développement par laminage à chaud remonte aux années 60.

Les aciers HLE trouvent leurs principales applications en tant que matériaux de structure ou dans la construction automobile. Le procédé d'élaboration le plus utilisé pour l'obtention des aciers HLE est la coulée continue, qui permet de produire des tôles laminées.

Les aciers sont exposés au phénomène de corrosion dans l'environnement dans lequel il est utilisé, c'est pourquoi les chercheurs développent des moyens pour le protéger contre ce phénomène, et l'une de ces méthodes est le revêtement, protection cathodique ...etc.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet du traitement thermique sur la résistance à la corrosion d'un acier HLE X70 qui est utilisé dans le transport d'hydrocarbure.

Notre étude commence par une recherche bibliographique sur les propriétés des aciers à haute. Le deuxième chapitre est la partie expérimentale et le troisième chapitre est dédié à la présentation de l'ensemble de nos résultats et interprétations des données obtenus. On termine notre travail et par une discussion et conclusion et perspective.

Chapitre I

L'étude Bibliographique

I.1 Généralités sur les aciers HLE

L'acier est un alliage métallique utilisé en génie mécanique et est principalement composé de fer et de carbone (à des taux compris entre 0,02% et 2% selon la masse de carbone). La teneur en carbone qui confère aux alliages les propriétés d'un minéral appelé acier. L'acier est développé pour résister aux contraintes mécaniques, aux attaques chimiques ou à une combinaison des deux, et il existe d'autres métaux qui dépendent du fer, pas de l'acier, comme la fonte et les ferro-alliages, par exemple : X70 : grade de l'acier au carbone manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars. L'acier peut être classé selon les éléments suivants : La composition, comme le carbone, les alliages faibles, l'acier inoxydable.[1]

I.1.1 Type d'aciers

Les aciers sont classés en fonction de deux critères : la composition chimique et le niveau de qualité (raffinement, pureté). On distinguera des aciers non alliés (<1% d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage <5%) ou fortement alliés $\geq 5\%$. Ils sont en fonction de la garantie qui donne les propriétés d'usage, l'acier de base, de qualité ou les aciers spéciaux. Ces derniers sont placés dans les deux familles : les aciers d'usages courant : Charpente, rond à béton, de constructions mécaniques, à limite élastiques, (Peu ou non alliés). Les aciers spéciaux : Aciers à outils, aciers inoxydables, réfractaires... (Peu ou très alliés). [2]

I.1.2 Classification des aciers HLE

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique incluent beaucoup de catégories standards et de propriétés industrielles conçues pour fournir des combinaisons spécifiques désirées des propriétés telles que la limite d'élasticité, la dureté, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique. Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, quoique leurs propriétés désirées soient réalisées par l'utilisation de petites additions d'éléments d'alliage. Les aciers HLE sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques augmentées obtenues par (la petite) addition judicieuse des éléments de micro alliage et, peut-être, des techniques de traitement spéciales. Les aciers HLE peuvent être divisés en six catégories. [3]

I .1.3 Les aciers HLE résistants à la corrosion atmosphérique

Aciers contiennent de cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement de la solution solide, et un certain affinement de grain ferritique. L'effet de durcissement de plusieurs éléments d'alliage est montré dans la Figure I.1. Le vanadium et/ou le niobium peut améliorer la limite d'élasticité de ces aciers ; l'addition du niobium également améliore la dureté. Une normalisation ou un laminage et un refroidissement contrôlé peuvent affiner la taille de grain (et améliorer ainsi la dureté et la limite d'élasticité). Cependant, si la normalisation ou le refroidissement accéléré sont employés pour affiner la taille de grain, l'effet du carbone et des éléments de micro alliage sur la trempabilité et la possibilité d'apparition de transformations indésirables telle que le bain ite supérieur et la ferrite de widmanstätten doivent être considérées. [3]

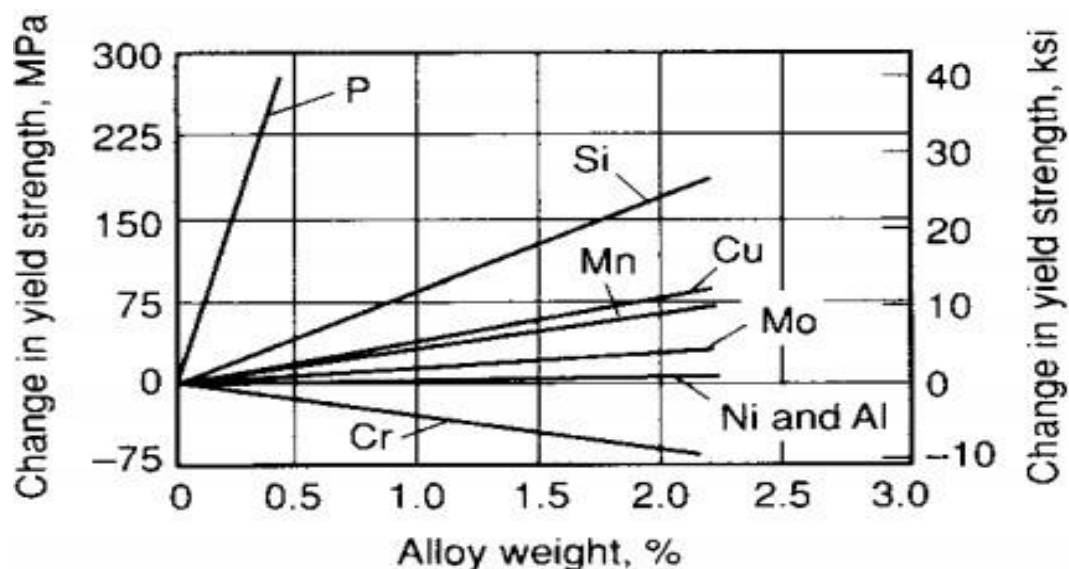


Figure I.1.1 : Durcissement de la solution solide de la ferrite par les éléments d'alliages. [3]

I .1.4 Les aciers micro-alliés ferrito-perlitique

Ces aciers emploient des additions d'éléments de micro alliage tels que le niobium et le vanadium pour augmenter la limite d'élasticité d'acier laminé à chaud sans teneur élevée de carbone et/ou de manganèse. Les propriétés des matériaux structuraux résultent de la découverte qu'une très petite quantité de niobium et de vanadium (<0.10 %) renforcent la résistance mécanique des aciers au carbone-manganèse. La teneur en carbone peut être réduite pour améliorer la soudabilité et la dureté parce que les effets de durcissement du niobium et du vanadium ont compensé la réduction de la dureté en raison de la réduction du taux de carbone.

Le développement des procédés de laminage couplés à la composition chimique produit une limite d'élasticité élevée accompagnée d'un abaissement progressif du taux de carbone. Beaucoup de la classe des aciers HLE micro alliés ont une basse teneur en carbone égale ou inférieure à 0.06 %, pouvant développer des limites d'élasticité de 485 MPa. La haute limite élastique est réalisée par les effets combinés de la taille de grain fin des grains de ferrite développés pendant le laminage à chaud et de la précipitation durcissant des carbures de type MC telle que TiC, NbC, VC. [3]

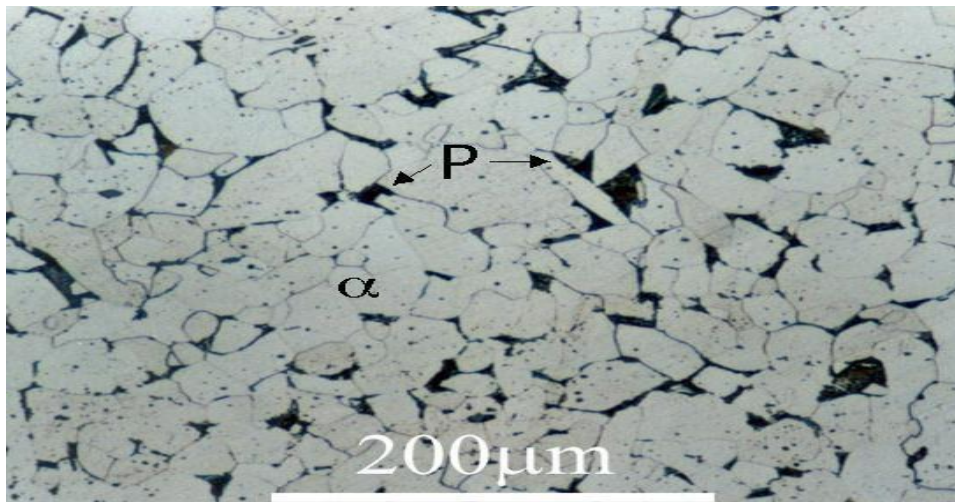


Figure I.1.2 : Acier micro allié ferrito-perlitique [3].

Les divers types des aciers micro alliés ferrito-perlite incluent :

- Les Aciers micro alliés au vanadium.
- Les Aciers micro alliés au niobium
- Les Aciers micro alliés au niobium-molybdène
- Les Aciers micro alliés au niobium-vanadium
- Les Aciers micro alliés au vanadium-azote
- Les Aciers micro alliés au titane
- Les Aciers micro alliés au niobium-titane
- Les Aciers micro alliés au vanadium-titane

Ces aciers peuvent également inclure d'autres éléments pour la résistance à la corrosion et le durcissement de la solution solide, ou augmenter la trempabilité (Si des produits de transformation autres que la ferrite-perlite sont désirés).

I.1.5 Propriétés des aciers HLE

➤ Éléments de micro alliage

Dans le cas des aciers faiblement alliés, pour une teneur inférieure à 0,1 % C les effets des éléments métalliques en solution solide homogène sont considérés comme très faibles. Dans le cas du micro alliage, la formation de composés très fins et très nombreux modifie considérablement les microstructures et les propriétés.[4]

Le mode d'action des trois éléments retenus passe par les phénomènes de précipitation, mais avec des interactions avec les phénomènes métallurgiques de transformation de phase, de recristallisation après écrouissage à chaud ou à froid et de blocage des mouvements des joints de grain ou des dislocations .

Les éléments principaux de micro-alliage sont:

a) Titane

Élément d'addition bien connu pour désoxyder, dé nitrurer ou fixer l'azote, le titane étant réputé délicat à utiliser en raison de la formation de précipités grossiers, cubiques, très durs (surtout de nitrures, mais aussi des oxy-carbo-sulfures) très néfastes pour la ductilité, la ténacité, la tenue en fatigue et l'usinabilité. Les progrès de la métallurgie secondaire et l'emploi du vide ont permis de s'affranchir de ces inclusions et l'on peut ainsi utiliser le titane en micro alliage avec des précipitations fines. Comme indiqué dans les conditions générales, la présence de titane en solution puis la précipitation a pour conséquence de retarder la recristallisation, de durcir la matrice en fixant l'azote et le carbone .[4]

b) Niobium

Ce sont sans doute des précipités les plus fins qui sont obtenus d'où un durcissement global très intéressant : le niobium est également très efficace pour le contrôle des grains en TTM

(traitement thermomécanique) [4].

c) Vanadium

Le vanadium facilement redissout peut se révéler plus souple d'emploi que le niobium ou le titane quand les cycles thermiques sont plafonnés en température spécialement en traitement thermique ou en formage à partir de basses températures ; mais en contrepartie, il ne permet pas de contrôler le grain par les effets de recristallisation ou de blocage des joints. Il faut également tenir compte d'une interaction vanadium aluminium en ce qui concerne la formation de nitrures ; la disponibilité de l'azote pour la formation de VN dépend des conditions de précipitation du nitrure d'aluminium qui peut se substituer à VN suivant les conditions d'équilibre et de cinétique ; si l'azote est sous la forme de NAl, le durcissement sera dû au carbure VC seul .[4]

I .1.6 Composés : carbures, nitrures, oxydes

Les composés formés par les éléments de micro-alliage sont de plusieurs types :

- des précipités qui se forment en phase solide.
- des composés qui se forment au moment de la solidification.

Il est donné nécessaire de distinguer deux classes :

- Les précipités proprement dits qui peuvent être redissous en phase solide à haute température : carbures, carbonitrures, certains nitrures.
- Les précipités pratiquement insolubles : oxydes, oxysulfures, TiN.. etc, ce type de précipiter présentent des points faibles pour l'acier. Dont ils présentent les sources des microfissures.

Tous ces précipités sont caractérisés par leur nature, leur maille et leur répartition : Ils sont en général de structure cubique avec des paramètres de maille assez voisins, de l'ordre de 0,4 à 0,5 nm. des structures hexagonales sont parfois signalées. [5]

I .1.7 Soudage des aciers HLE

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, par intervention de pression, ou par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base. [6]

I .1.8 Différentes zones du joint soudé

➤ Métal de base (MB)

Le métal de base, est la partie l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.

➤ Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée thermiquement est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.

➤ Zone fondue (ZF)

Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification.

➤ Zone de liaison (ZL)

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion. [7]

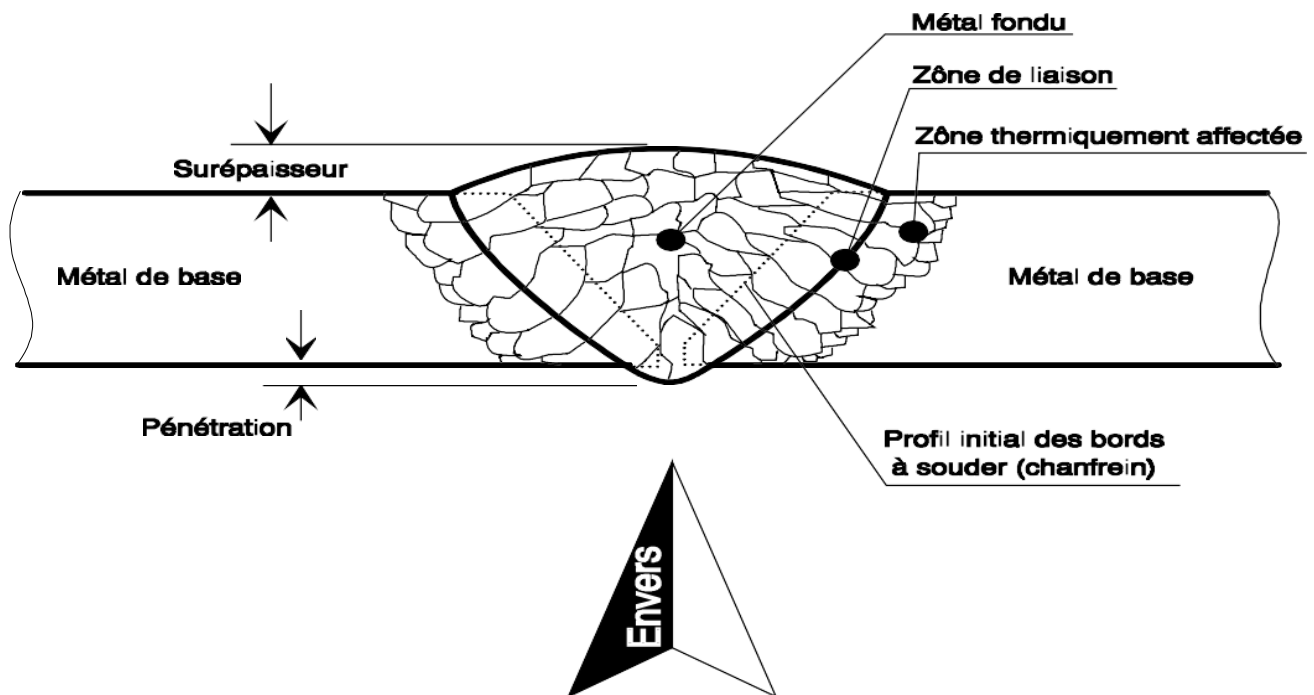


Figure I.1.3 : les zones de la soudure

I .1.9 Aspects métallurgiques de la zone soudée

- **Partie 1 :** Aucune modification décelable sur la constitution et la microstructure.
- **Partie 2 :** La température proche de A1 permet de déceler des modifications selon l'état initial du métal de base : précipitations, revenu, globalisations.
- **Partie 3 :** La température est comprise entre A1 et A3. Les modifications sont importantes, l'austénitisation partielle peut conduire à un affinement de la structure au refroidissement.
- **Partie 4 :** La température est comprise entre A3 et 1100°C environ. Après refroidissement on obtient des structures normalisées.
- **Partie 5 :**

La température est comprise entre 1100°C et 1500°C environ. Le grossissement du grain austénitique est tel que la trempabilité est considérablement augmentée et les structures obtenues après refroidissement varient de structures aciculaires très grossières à des structures de trempe pour les vitesses les plus élevées.

La majorité des problèmes métallurgiques du soudage sont relatifs à la constitution de la zone sous cordon dans laquelle a lieu un véritable traitement thermique dans des conditions d'austénitisation particulières, à une température supérieure à 1200°C pendant un temps très court. [8]

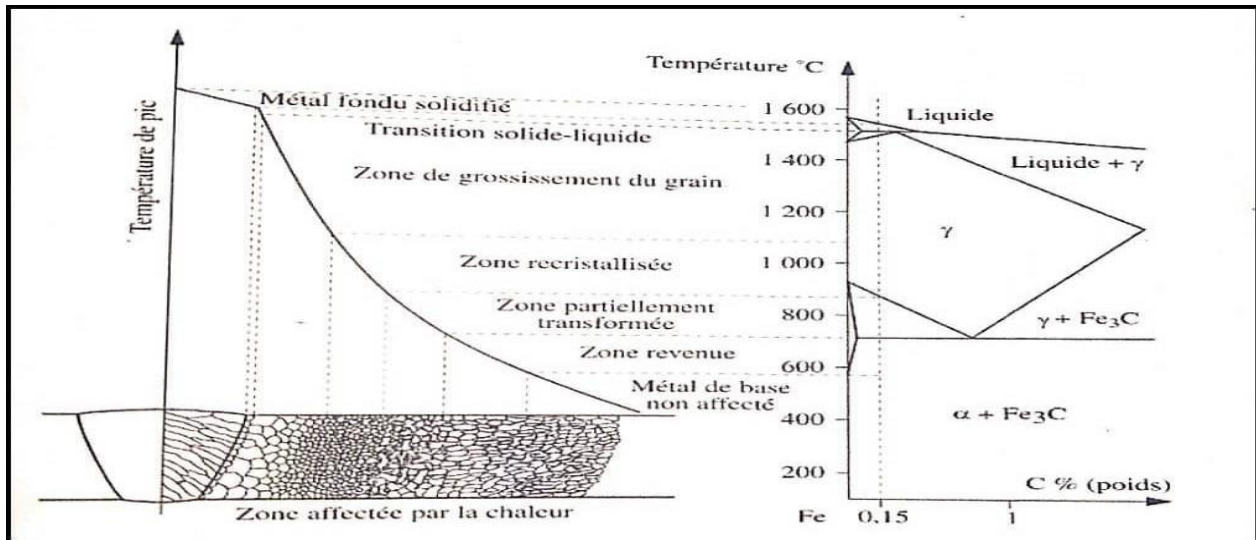


Figure I.1.4 : différentes parties constitutives d'un joint soudé

I .1.10 Aspect traitement thermique de soudage

Les caractéristiques mécaniques d'un alliage pouvant être profondément modifiées en jouant sur le traitement thermique de la même façon, les cycles thermiques engendrés par l'opération de soudage vont modifier les propriétés de l'acier dans la zone affectée thermiquement et vont conditionner celles de la zone fondue. Généralement, on caractérise le cycle thermique de soudage par le temps qui s'écoule pour passer de 800 à 500°C (Δt 800/500) ou de 700 à 300°C (Δt 700/300).

L'interprétation métallurgique de tous les phénomènes résultant d'un effet thermique requiert, comme condition nécessaire, la connaissance de la température atteinte. a cette condition de température s'ajoutent une ou plusieurs conditions de temps, qu'il s'agisse de l'échauffement, du séjour à température ou du refroidissement. [9]

Conclusion

L'acier API 5L X70 présente une microstructure principalement constituée de ferrite et de perlite. La ferrite confère à l'acier une bonne résistance à la corrosion et une certaine ductilité, tandis que la perlite lui confère une résistance mécanique et une résistance à l'usure. Cependant, il est important de noter que la microstructure de l'acier peut varier en fonction des méthodes de fabrication et des traitements thermiques appliqués. Des phases supplémentaires telles que le bain ite ou la martensite peuvent également être présentes pour améliorer les propriétés mécaniques de l'acier. La microstructure de l'acier est spécifiquement conçue pour répondre aux exigences des pipelines utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière.

I.2 Phénomène de Corrosion

La corrosion est un processus naturel qui se produit lorsqu'un matériau, généralement un métal, réagit avec son environnement, en particulier avec l'oxygène présent dans l'air ou l'eau. La corrosion entraîne la détérioration progressive du matériau, altérant sa structure et ses propriétés physiques et chimiques. elle est souvent causée par des réactions électrochimiques dans lesquelles le métal se dissout, formant des composés chimiques indésirables tels que des oxydes, des hydroxydes ou des sels. Dans cette étude, nous examinerons les différents types de corrosion, les facteurs qui influencent la corrosion, les méthodes de protection contre la corrosion, ainsi que les essais de corrosion couramment utilisés. En comprenant ces aspects clés, nous pourrions mieux appréhender les défis de la corrosion et trouver des solutions efficaces pour prévenir et gérer ce phénomène dévastateur.

I.2.1 Définition de la corrosion

Le terme "corrosion" du latin corroder, signifie ronger, attaquer. La corrosion est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même. Une autre définition, considère que ce phénomène n'est autre que le retour des métaux et alliages à leurs états naturels de minerais. En tous cas quelle que soit la définition adoptée, la corrosion est une dégradation. Selon le milieu, la corrosion est dite sèche quand elle apparaît dans les environnements gazeux et humide, lorsqu'elle a lieu dans les électrolytes liquides. La corrosion est un matériau ou des dommages à l'une de leurs propriétés physiques ou de réaction chimique par aucun produit chimique ou réversible un matériau électrochimique avec le milieu environnant dans lequel il est en contact direct avec eux, si cela était le milieu environnant est de l'air atmosphérique ou un autre environnement chimique normal. [10]

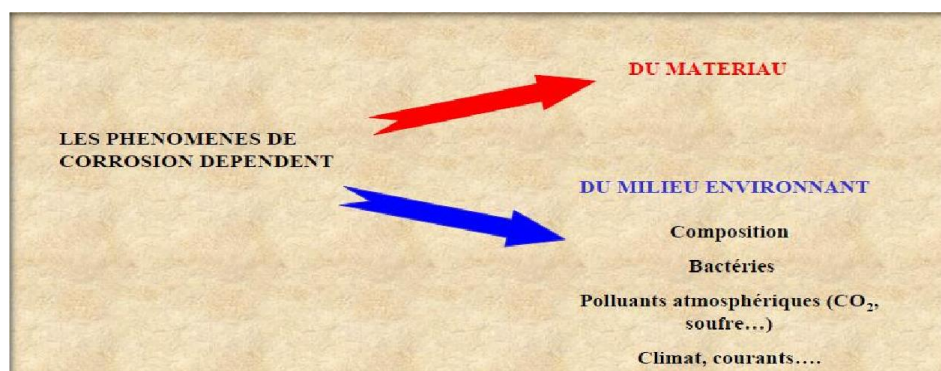


Figure I.2.1 : La nature des paramètres dus à la corrosion. [11]

I .2.2 Origine de la corrosion

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et ou physiques entre le matériau et son environnement.

Les différents paramètres qui sont dus à la corrosion d'un matériau sont:

- Composition chimique et microstructure du métal,
- Composition chimique de l'environnement,
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.)
- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottement, etc.). [11]

I .2.3 Les types de corrosion

I .2.3 .1 Corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique est la conséquence d'une réaction hétérogène entre une phase solide et une phase gazeuse. elle ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique.

Il est très difficile d'en donner des exemples car elle est le plus souvent accompagnée de corrosion électrochimique, par exemple : l'oxydation de l'acier ordinaire à haute température par l'oxygène de l'air est une corrosion chimique. [12]

I .2.3.2 Corrosion biochimique

La corrosion biochimique, également connue sous le nom de corrosion microbiologique ou de corrosion biologique, est un type de corrosion qui résulte de l'activité des micro-organismes, tels que les bactéries, les champignons ou les algues, sur les surfaces métalliques. Ces micro-organismes peuvent coloniser et se développer sur les métaux, entraînant une détérioration accélérée du matériau cette forme d'attaque se reconnaît à certaines caractéristiques, selon que les microorganismes agissent sur le procédé de corrosion, d'une ou plusieurs façons:

- par action directe sur le taux de réaction anodique ou cathodique.
- par création des milieux corrosifs.
- par croissance et multiplication des micro-organismes, qui favorisent

La création des cellules électrolytiques à la surface .Selon les produits et les aspects des formes de la corrosion, on distingue :

La corrosion uniforme : qui est une perte de matière plus ou moins régulière sur la surface. [13]

I .2.3.3 Corrosion électrochimique (humide)

En général, si le réactif est liquide, il est accompagné d'une corrosion électrochimique qui produite essentiellement par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes et réduite l'agent corrosifs qui existants dans la solution électrolyte. Par ailleurs, elle se produit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique). L'existence de ces hétérogénéités, soit dans le métal ou dans le réactif, détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées). Elle nécessite la présence d'un réducteur ; H₂O, H₂.... Sans celui-ci, la corrosion du métal (Réaction anodique) ne peut se produire. [14]

I .2.4 Les formes de corrosion

I .2.4.1 Corrosion uniforme ou généralisée

La corrosion uniforme ou généralisée est une perte de matière plus ou moins régulière à la même vitesse sur la totalité de la surface d'un métal donné en contact avec un milieu Environnant corrosif. C'est la forme de corrosion la plus simple. On trouve cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acides. [15]

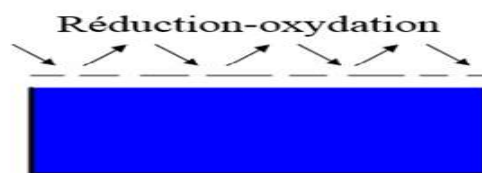


Figure I.2.2 : Corrosion uniforme.

I .2.4.2 Corrosion localisée

La corrosion localisée est définie comme étant une attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques . [16]

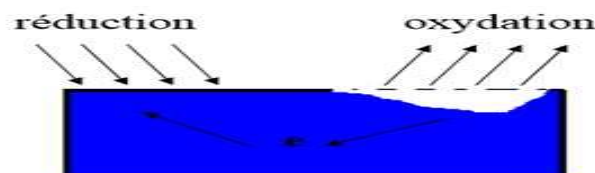


Figure I.2.3 : Corrosion localisée.

I .2.4.3 Corrosion érosion

La corrosion-érosion se produit lorsque le débit de l'eau se combine à la corrosion pour augmenter considérablement la vitesse d'enlèvement du métal par rapport à la vitesse d'enlèvement à des débits plus faibles. L'effet du débit est dû à l'enlèvement des ions métalliques et des couches protectrices à mesure qu'ils se forment, ce qui accroît la force d'entraînement de corrosion chimique et peut empêcher la formation d'une couche protectrice. La corrosion-érosion est favorisée par les grandes vitesses d'écoulement d'eau, la turbulence, la présence de substances particulaires et la chute de gouttes d'eau à grande vitesse sur la surface métallique. Ces effets peuvent être réduits au minimum par une bonne conception. [17]

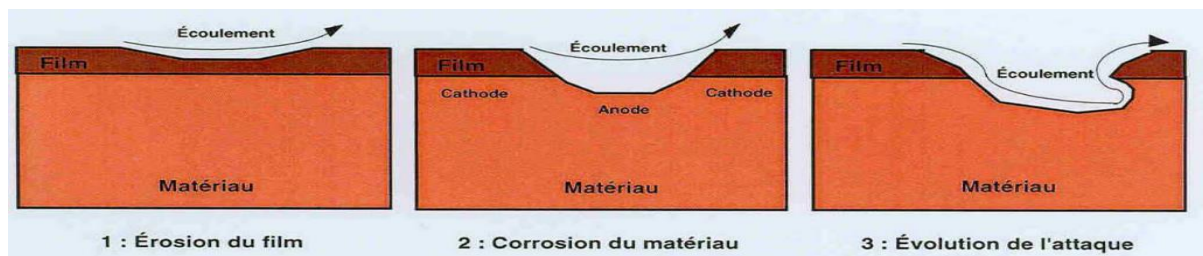


Figure I.2.4 : Schéma illustrant la corrosion-Erosion

I .2.4.4 Corrosion sous-contrainte

La fissuration par corrosion sous contrainte (CSC) est un processus de développement de fissures qui peuvent aller jusqu'à la rupture complète de la pièce métallique sous l'action Simultanée d'une contrainte de traction mécanique et d'un milieu corrosif, elle peut être définie aussi comme un processus de corrosion mécanique et électrochimique combiné qui entraîne La fissuration de certains matériaux .Ce type de corrosion peut être compris comme un processus d'auto-catalytique ou d'auto accélération conduisant à des taux de dissolution des métaux élevés (réaction anodique).

Initialement, une petite pique se forme et se transforme en fissure en raison d'une contrainte appliquée dans le matériau. Cette formation de fissures ouvre une nouvelle surface métallique active, qui se corrode encore très facilement. [18]



Figure I.2.5 : Schéma illustrant la corrosion sous contrainte.

I .2.4.5 La Corrosion par piqures

Elle se produit quand les métaux protégés par un film d'oxyde mince comme l'aluminium et ses alliages et les aciers inoxydables sont mis en contact avec un milieu aqueux ,(pour un PH voisin de la neutralité) contenant les halogénures, notamment le chlorure Cl^- .

La quantité de métal corrodé est très faible telle que, elle introduit des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre à l'intérieur du matériau à partir d'une ouverture de faible surface. [19]

I .2.4.6 Corrosion caverneuse

Appelée aussi corrosion caverneuse Cette forme s'effectue sur certain site particuliers de la surface, elle est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des trous, peut se produire à cause des modifications locales du milieu. Il y a une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène. [20]

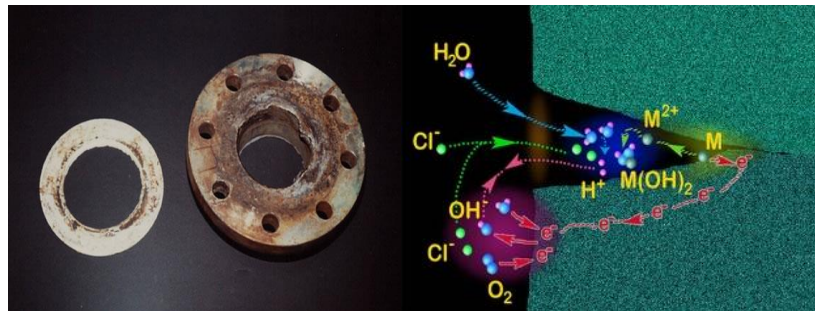


Figure I.2.6 : Schéma illustrant la corrosion caverneuse

I .2.4.7 Corrosion inter-granulaire

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. L'hétérogénéité au niveau du joint de grain et l'existence d'un milieu corrosif jouant le rôle d'électrolyte représentent deux conditions pour développer cette forme de corrosion. [21]

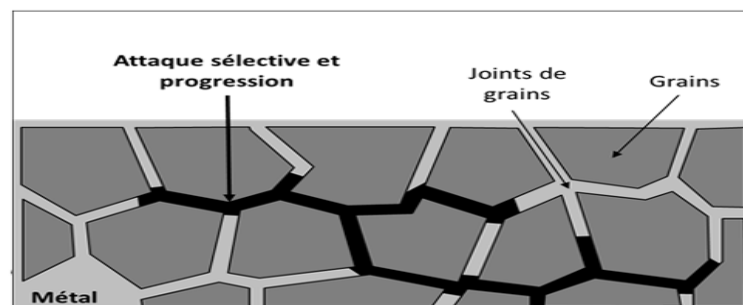


Figure I.2.7 : Schéma illustrant la corrosion inter-granulaire

I .2.4.8 Corrosion sélective

Avec certains alliages exposés à des ambiances agressives, un des constituants peut se subir une attaque préférentielle. L'attaque peut être localisée et conduire à des perforations ou répartie uniformément et aboutir à une chute des caractéristiques mécaniques. Dans le second cas, les dégradations peuvent échapper à l'observation visuelle, la pièce conservant sa forme et son état de surface initial. Les différents cas de corrosion sélective sont classés suivant la nature des alliages considérés : délignification des laitons corrosion sélective du zinc (ou corrosion de l'alliage puis déposition du cuivre). Le laiton prend la teinte rouge du cuivre. [22]

I .2.4.9 La corrosion galvanique

C'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte. Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physico chimiques à l'interface. [23]

I .2.4.10 Corrosions par frottement

La corrosion frottement concerne les dommages provoqués par la corrosion au niveau du contact de deux surfaces métalliques en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) et à des charges de compression. ce mouvement relatif peut être très faible (petits débattements de l'ordre de quelques micromètres). En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de trio corrosion. [24]



Figure I.2.8 : Schéma illustrant la corrosion frottement

I .2.5. Facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

Facteur liés au milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs de finissant Le mode d'emploi.	Facteur Dépendants du temps
-Concentration de réactif -Teneur en oxygène - pH du milieu -Température - Pression - Présence de bactéries.	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration - Impuretés -Traitement Thermique -Traitement mécanique	-Etat de surface -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Procédés d'assemblage	-Tension mécaniques -Modification des Revêtement protecteurs -Vieillessement

Tableau (N° I-1): Les facteurs de la corrosion. [23]

- **Effet de la température :** Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère la cinétique de réaction et de transport de charge. L'importance de son influence varie en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau. [23]
- **Effet de l'acidité :** La susceptibilité du matériau à la corrosion est en fonction du PH de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifie les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu. [23]
- **Régime hydrodynamique :** hydrodynamiques fixent les vitesses de réactions en contrôlant le transport de matière par l'établissement d'une couche limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire. [23]

I .2.6 Méthodes de protection contre la corrosion

Un personnel formé aux bases de la physique des matériaux sera en mesure de limiter la corrosion dans de nombreuses situations :

I .2.6.1 Choisir le bon métal

La façon la plus simple d'empêcher la corrosion est d'utiliser un type de métal qui résiste à la corrosion, comme l'acier inoxydable ou l'aluminium. Les innovations constantes et le développement de nouveaux alliages de nickel, d'acier et de titane rehaussent les niveaux de protection contre la corrosion. En fonction des environnements spécifiques, ces métaux peuvent être utilisés pour réduire la nécessité de protection supplémentaire contre la corrosion. [25]

I .2.6.2 La passivation

Des agents de passivation sont ajoutés à un métal afin d'empêcher la corrosion. Ils réagissent à l'environnement chimique environnant pour former une couche de protection au-dessus du métal, laquelle agit comme une barrière contre la corrosion. Les aciers/métaux passivés sont utilisés dans le raffinage du pétrole, l'industrie chimique et les stations de traitement de l'eau. Voici quelques exemples de passivation anticorrosion : L'acier inoxydable est un matériau ferreux (Fe) enrichi d'un agent de passivation, comme le chrome. Le chrome formera une couche d'oxyde protectrice qui isole le fer contre toute attaque. La fonte à haute teneur en silicium forme un film protecteur de silice qui protège le fer contre la corrosion. [26]

I .2.6.3 Revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, ils se divisent en trois familles :

- Revêtements en bitume des structures enterrées,
- Revêtements polymériques (caoutchoucs),
- Revêtements par peintures et vernis. [26]

I .2.6.4 Revêtements inorganiques

On distingue deux types de revêtements inorganiques non métalliques :

- Les couches de conversion,
- Les couches étrangères au substrat, exemple revêtement à base de ciment en génie civil. [26]

I .2.6.5 Protection cathodique

La protection cathodique est une méthode de protection contre la corrosion qui consiste à rendre le matériau à protéger la cathode d'un couple galvanique. cela est réalisé en fournissant une source de courant électrique externe pour polariser le matériau à un potentiel électrochimique protecteur.

La protection cathodique est couramment utilisée pour la protection des structures métalliques enterrées, des pipelines, il est important de surveiller et de maintenir régulièrement les systèmes de protection cathodique pour garantir leur bon fonctionnement. [27]

Il existe deux principales méthodes de protection cathodique :

Protection cathodique par courant imposé

Cette méthode implique l'application d'un courant électrique externe directement sur le matériau à protéger. un courant continu est fourni à partir d'une source d'alimentation externe, telle qu'un redresseur, pour polariser le matériau à un potentiel électrochimique protecteur. [27]

Cela permet de maintenir le matériau en mode cathodique, empêchant ainsi la corrosion.

Protection cathodique par anode galvanique (sacrificielle)

Cette méthode implique l'utilisation d'anodes en métal plus réactif que le matériau à protéger. Les anodes sacrificielles, telles que le zinc, le magnésium ou l'aluminium, sont placées à proximité du matériau à protéger et sont connectées électriquement. En raison de la différence de potentiel électrochimique, les anodes se corroderont préférentiellement, tandis que le matériau à protéger sera préservé de la corrosion. Les anodes sacrificielles doivent être régulièrement surveillées et remplacées lorsqu'elles sont consommées. [27]

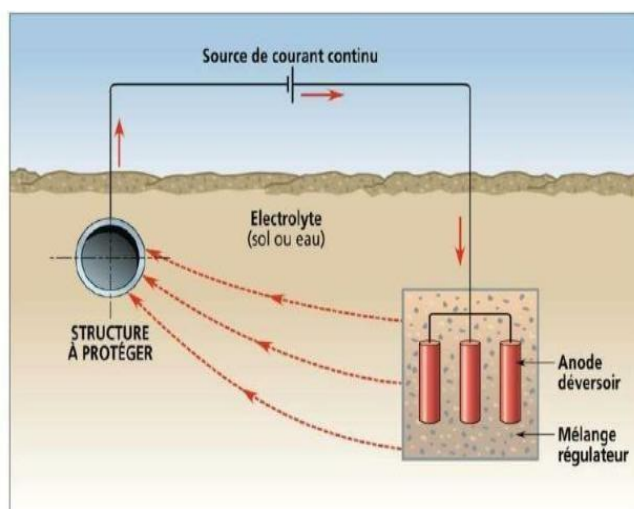


Figure I.2.9 : Schéma Protection cathodique par courant imposé

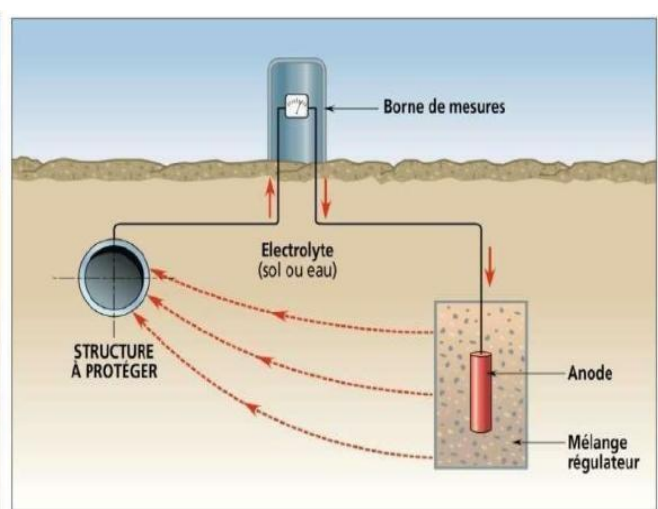


Figure I.2.10 : Schéma Protection cathodique par anode galvanique

I.2.7 Les méthodes d'évaluation de la résistance à la corrosion

L'évaluation de la résistance à la corrosion des matériaux est réalisée au moyen de plusieurs méthodes qui apportent des informations complémentaires. Les principales sont les méthodes électrochimiques, elles sont souvent associées à des analyses de surface et à des mesures du relargage ionique dans les milieux qui ne seront pas présentées dans ce chapitre. [28]

I.2.7.1 Matériel électrochimique

Les essais se font dans un milieu artificiel dont la composition peut être variable. Le plus souvent il s'agit d'une salive artificielle dont le seul élément organique est l'urée.

La cellule électrochimique à double paroi est maintenue, par l'intermédiaire d'un bain thermostat, à une température constante et définie (37°C). [28]

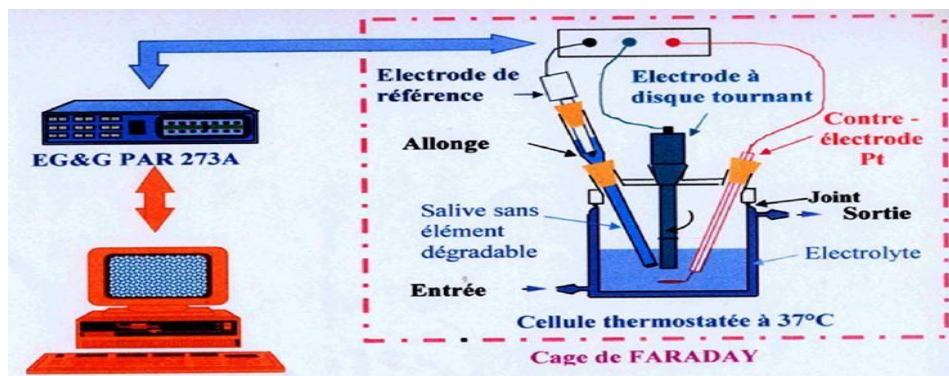


Figure I.2.11 : cellule électrochimique. [28]

Classiquement trois électrodes sont utilisées :

l'électrode de travail : il s'agit de l'échantillon à étudier, entouré d'un cylindre en poly tétra fluoro éthylène. L'ensemble échantillon-cylindre constitue l'embout de l'électrode à disque tournant afin de travailler sous un régime d'agitation dynamique reproductible assurant l'homogénéisation de la solution.

l'électrode de référence : les tensions sont mesurées par rapport à une électrode de référence. Celle la plus souvent utilisée en laboratoire est saturée en chlorure de potassium (ECS). Elle est immergée dans une allonge qui communique avec l'électrolyte de la cellule par l'intermédiaire d'un fritté.

l'électrode auxiliaire : un fil de platine est utilisé comme contre-électrode dans les études où des perturbations en tension ou en courant sont imposées au système. Le montage fait intervenir un potentiostat qui permet d'imposer un potentiel à l'électrode de travail, géré par des microprocesseurs. Des logiciels spécifiques assurent le pilotage des séquences expérimentales, l'acquisition et le traitement des données numériques.

I .2.7.2 Principales méthodes des électrochimiques

A l'exclusion du potentiel de corrosion qui peut également être mesuré in vivo, les mesures sont réalisées in vitro. La validité des résultats obtenus est fortement dépendante des conditions expérimentales dans lesquelles les matériaux dentaires sont testés (nature de l'électrolyte, intervalle de potentiel choisi, vitesse de balayage, degré de polissage de l'échantillon) et il est nécessaire d'en tenir compte dans l'interprétation des résultats. [28]

I .2.7.3 Courant de corrosion

Il est déterminé graphiquement à partir de courbe $\log i = f(E)$, il est exprimé en intensité, l'unité de mesure est l'A/cm². Dans la plupart des cas de corrosion end buccale, il peut être considéré que la corrosion est contrôlée par le transfert de charge et que les concentrations à l'interface sont voisines de celles au cœur de la solution. La valeur de l'intensité du courant de corrosion I_{corr} peut alors être obtenu en extrapolant la droite de Tafel, cathodique et/ou anodique, jusqu'au potentiel de corrosion E_{corr} . [28]

Si on représente la courbe de polarisation obtenue en coordonnées $\text{Log } i$ (densités de courant) = $f(E)$, l'intersection des droites anodique et cathodique, extrapolées au potentiel de corrosion, donne la densité de courant de corrosion i_{corr} (A.cm⁻²). A partir de la loi de Faraday, il est alors possible de définir une relation permettant d'estimer la vitesse de corrosion :

$$V_{corr} = i_{corr} .t. M / n .F. \rho$$

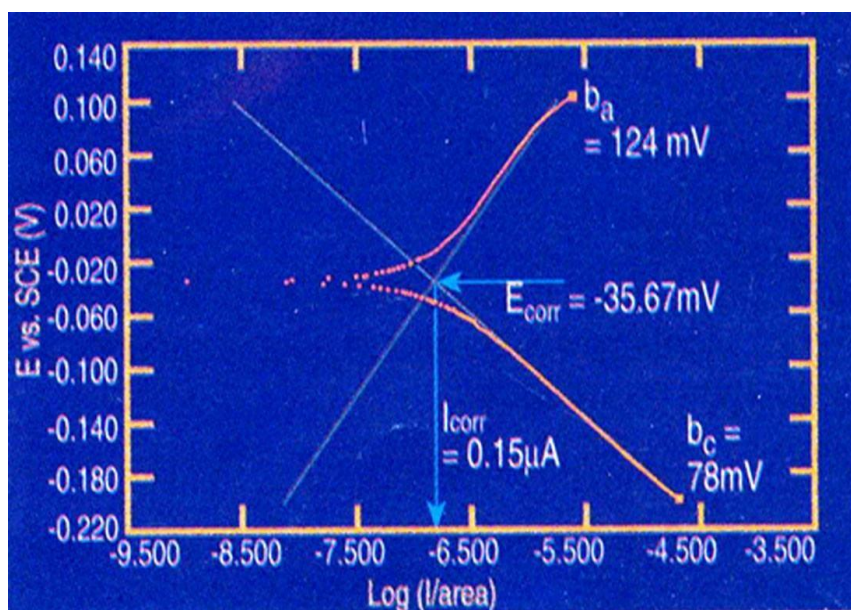


Figure I.2.12 : Détermination de l'intensité du courant de corrosion. [28]

I.2.7.4 Résistance de polarisation

Aucune condition cinétique particulière n'est requise pour déterminer la résistance de polarisation qui est déterminée à partir de la courbe $E=f(i)$ au voisinage immédiat du potentiel de corrosion de l'échantillon à + ou - 50mV. [28]

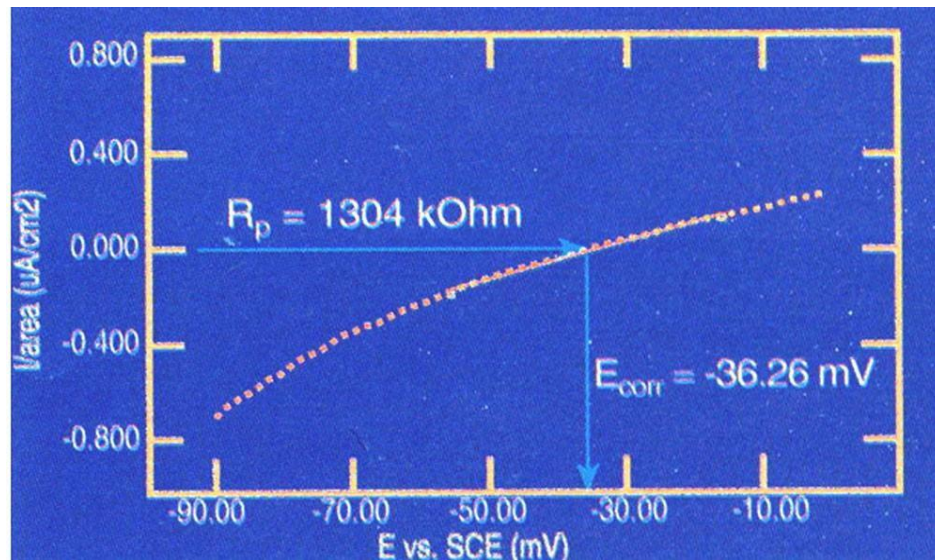


Figure I.2.13 : Détermination de la résistance de polarisation. [28]

La résistance de polarisation est la pente $\Delta E/\Delta i$ de la courbe de polarisation, l'unité de mesure est l' Ω/cm^2 . La résistance de polarisation est inversement proportionnelle au courant de corrosion. Plus la valeur de la résistance de polarisation est élevée, plus l'intensité du courant de corrosion est faible. [28]

Conclusion

La prévention de la corrosion des métaux est essentielle pour assurer le bon fonctionnement et l'efficacité de votre équipement pour les années à venir. Comprendre le type de corrosion auquel vous êtes confronté et prendre des mesures pour protéger vos métaux contre l'exposition sont des éléments clés pour éviter des réparations coûteuses dues à des dommages corrosifs sur toute la ligne.

En suivant ces directives et en inspectant régulièrement votre équipement pour détecter les signes d'usure causés par des éléments corrosifs, vous pouvez prolonger considérablement sa durée de vie tout en assurant une efficacité maximale tout au long de sa durée de vie.

CHAPITRE II

Techniques Experimentales

Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons sommairement les méthodes de préparation des échantillons et les différentes techniques de caractérisation . Ce travail a été réalisé au Laboratoire de génie mécanique, université de Laghouat.

II. 1 Présentation et préparation des échantillons

II. 1.1 Matériau d'étude

Le matériau étudié est un acier à haute limite d'élasticité HLE de nuance API 5L grade X70 utilisé pour la construction des pipelines. La signification de la norme API 5L X70 est comme suit :

API : Institut Américain du Pétrole.

5L : Spécification pour le pipeline.

X : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.

Le chiffre "X" correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale.

Dans notre cas X70 a une limite d'élasticité minimale de 70 ksi (485 MPa).

II. 1. 2 Composition chimique

Elément	C	Mn	Si	Cu	Nb	Cr	P	Ni	Mo	V
massique %	0.075	1.79	0.335	0.162	/	<0.055	0.016	<0.031	0.016	<0.01

Tableau (N° II -1): compositions chimiques de l'acier x70

II. 1.3 Les traitements thermiques

Le traitement thermique que nous avons effectué au cours de cette étude, ont été faits à l'aide d'un four dont la température maximale est de 1200 °c.



Figure II.1.1 : Four CARBOLIT (Laboratoire de génie mécanique)

➤ Dans notre expériences, et suivant le but visé, et à l'aide d'un four nous avons utilisé le régime de traitement thermique comme suit :

Température °C	Temps de chauffage
500°C	30 min
500°C	60 min
500°C	90 min
500°C	120 min
600°C	30 min
600°C	60 min
600°C	90 min
600°C	120 min

Tableau (N° II-2) : Traitements thermiques

Traitement thermique se compos :

Chauffage : à faire le chauffage dans un four jusqu' à l'austénisation à maintenir cette température pour assurer l'homogénéisation.

Maintien : maintien à un temps bien défini.

Refroidissement : Refroidissement lent à l'air.

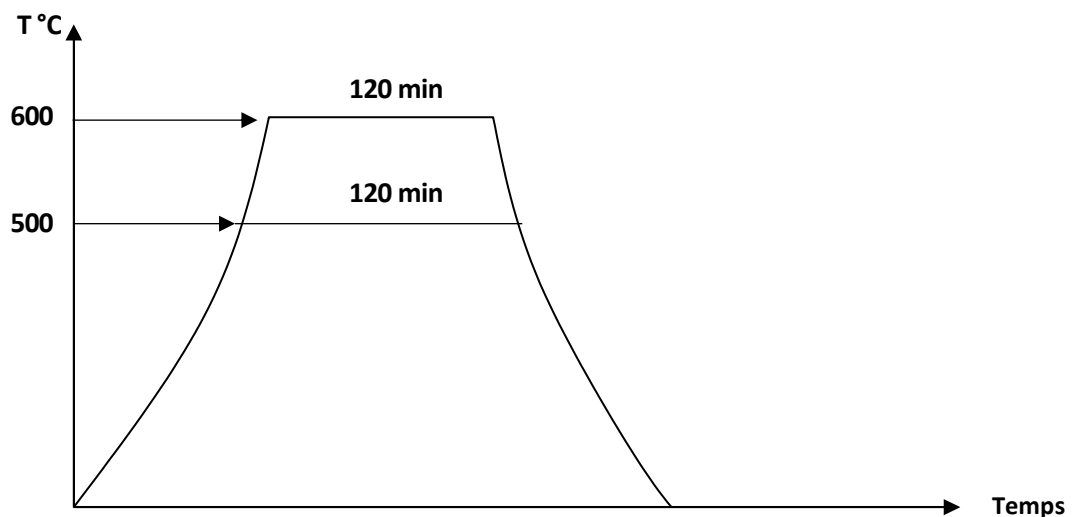


Figure II.1.2 : Cycle d'un traitement thermique.

II. 1.4 Technique de l'enrobage

Nous avons enrobé les échantillons en utilisant la résine époxy (résine +durcisseur) .certaines étapes sont impératives avant de procéder à l'enrobage. Celles-ci sont essentielles pour l'obtention d'un bon enrobage : nettoyer l'échantillon doit être : nettoyé avant d'être enrobé afin d'améliorer l'adhérence entre la résine d'enrobage et l'échantillon, le nettoyage des échantillons doit se faire en portant des gants ou à l'aide d'une pince). ne pas oublier de sécher l'échantillon , ajuster la taille de l'échantillon à celle du moule d'enrobage choisissez un modèle d'enrobage et installez-y l'échantillon détermination des quantités exactes de composants de résine soit en volume soit en poids. mélanger soigneusement les ingrédients, verser la résine mélangée sur l'échantillon et laisser polymériser dans le moule. Les temps de mélange et de polymérisation sont des paramètres importants pour obtenir un revêtement de haute qualité recommandations dans les instructions de l'utilisation doit être pleinement considérée.

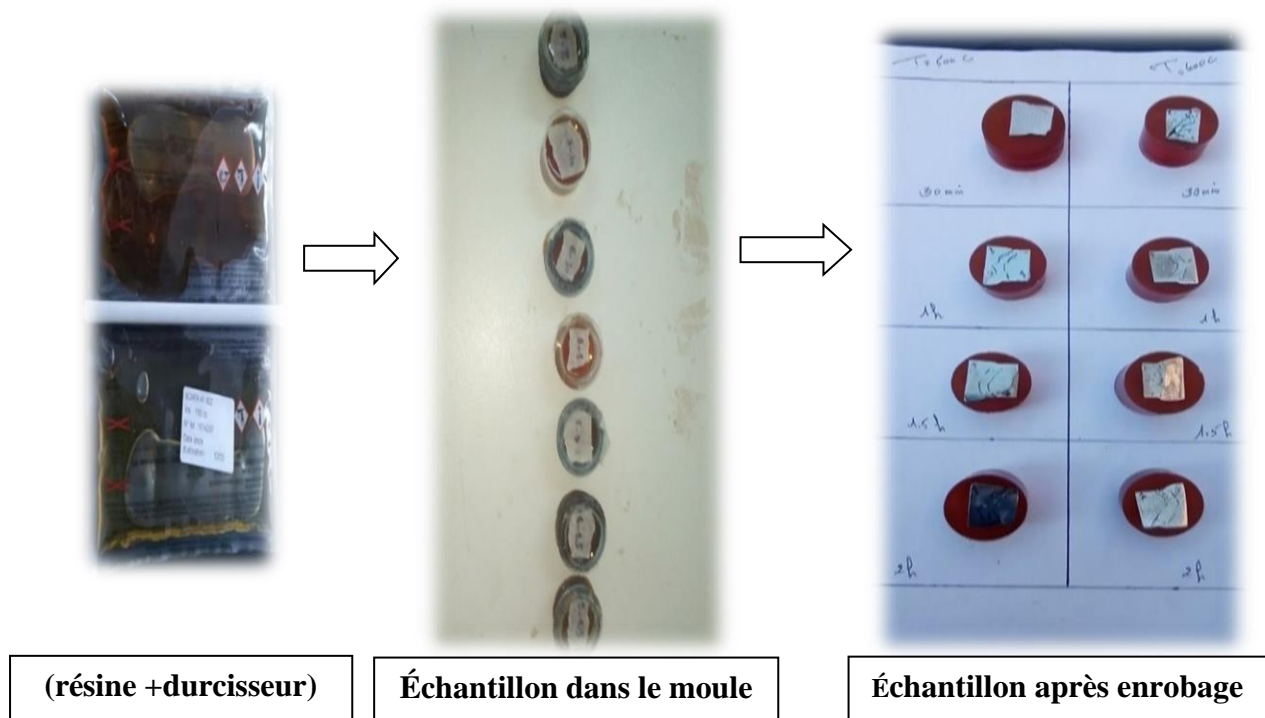


Figure II.1.3 : Les différentes étapes de préparation des échantillons
(laboratoire de génie mécanique).

II. 1.5 Polissage de l'échantillon

Le polissage : est une méthode de préparation mécanique et la plus fréquente des échantillons en vue d'examen microscopique. Les faces de l'échantillon ont été polies aux disques abrasifs de granulométries (grades 120, 220, 1000, 1500, 1500 puis 2000). un polissage plus fin par une pâte diamanté, de différentes granulométries sur un drap imbibé d'une huile métallographique.

un polissage de finition avec l'alumine sur un feutre. La durée de polissage est de quelques minutes (5-10min) pour chaque papier avec lubrification à l'eau et une vitesse de 200 tours/ min. dans le but d'obtenir des faces miroir.

II. 1.6 Attaque chimique

Après polissage, l'essai d'attaque chimique a été effectué sur notre échantillon polis en utilisant le réactif **Nital** :

- 100 ml d'éthanol C_2H_5OH (96%)
- 4 ml d'acide nitrique HNO_3 (4%)

L'échantillon est plongé de 10 à 15 secondes dans la solution. puis on a rincé l'échantillon par l'eau distillé et on finit par le séchage de l'échantillon



Figure II.1.4 : Polisseuse
(laboratoire de génie mécanique).



Figure II.1.5 : le réactif Nital
(laboratoire de génie procédés).

II. 1.7 Observation en microscope optique

L'observation métallographique au microscope optique est une technique de base pour étudier les transformations structurales. L'examen métallographique a été réalisé au niveau de laboratoire département de génie mécanique, université de Laghouat. un microscope métallographique optique permet l'observation des échantillons, avec un grossissement qui varie de 5 à 1000 .Ce microscope équipé d'une caméra numérique reliée à un microordinateur . L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.

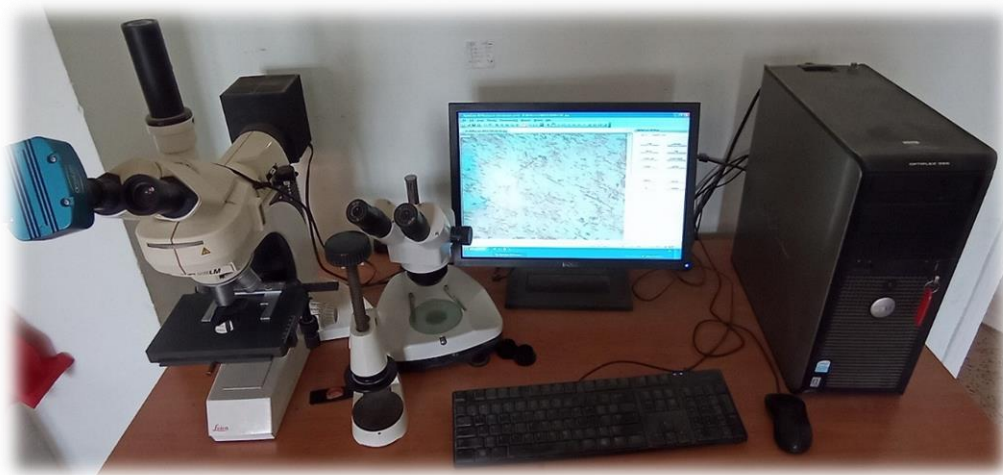


Figure II.1.6 : Microscope optique de type LIECA DMLM

(Laboratoire de recherche de génie procédés)

II. 2. Étude électrochimique

Le but de notre travail est l'évaluation des paramètres cinétique sur une droite de Tafel, lors de la corrosion de l'acier x70 dans un milieu basique salin sodium chlorite (nacl), cette dernière est basée sur le tracé des courbes de polarisation ($\log i = f(e)$). tirées de l'équation principale électrochimique de buttler- volmer. D'après les hypothèses de Tafel, une polarisation anodique et cathodique permet d'obtenir des courbes avec des branches linéaires connues sous l'appellation « droites de Tafel ».

Cette linéarité donne une proportionnalité entre le potentiel et le courant, ce qui permet de déterminer par extrapolation le courant de corrosion, le potentiel de corrosion, la vitesse de corrosion exprimée, le coefficient de Tafel anodique et cathodique et la résistance de polarisation.

Temps	T (°C) de TT	Surface de l'électrode de travail (cm ²)	Valence	Densité (g/cm ³)	Masse atomique (g)	Valeur Balayée (mv)	Vitesse de Balayage (mv/s)
30 min	500	1.47	2	7.87	55.84	1000	10
60 min	500	1.54	2	7.87	55.84	1000	10
90 min	500	1.54	2	7.87	55.84	1000	10
120 min	500	1.26	2	7.87	55.84	1000	10
30 min	600	1.12	2	7.87	55.84	1000	10
60 min	600	1.96	2	7.87	55.84	1000	10
90 min	600	1.4	2	7.87	55.84	1000	10
120 min	600	1.4	2	7.87	55.84	1000	10

Tableau (N° II-3) : Représentation des paramètres opératoire de l'essai de corrosion

II. 2. 1 Préparation de l'électrode de travail

Nous avons préparé des échantillons pour les essais de corrosion. La préparation des échantillons consiste à les souder, les enrober à les polir comme suit : le soudage à l'étain s'effectue entre échantillon et le fil conducteur en cuivre enrobé d'une gaine en caoutchouc.

Le soudage assure un bon contact électrique entre échantillon et le fil conducteur pour assurer une bonne passe de courant. Nous avons effectué par la suite l'enrobage des échantillons à l'aide d'une résine thermodurcissable (Aral dite) et des moules adéquats aux dimensions des échantillons. L'enrobage nous permet d'assurer seulement la surface étudiée en contact avec la solution électrolytique

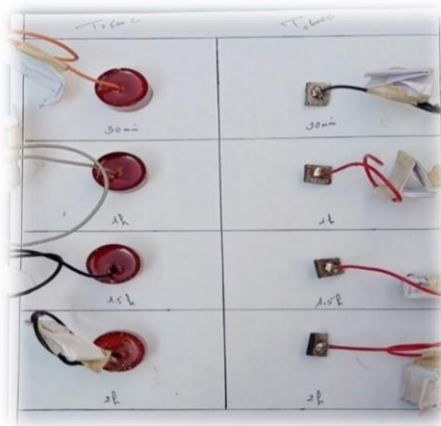


Figure II.2.1 : la préparation des électrodes de travail.

II. 2. 2 Préparation des solutions

La solution de corrosion est un salin sodium chloride NaCl, préparé de 33 g de NaCl dans un 1000 ml d'eau distillée. L'électrode de travail, l'électrode de référence (Calomel saturé) et l'électrode auxiliaire (Platine) sont immergées dans une solution électrolytique et connectées à un potentiostat, qui est une source de courant dont le rôle principal est de maintenir le potentiel constant entre l'électrode de travail et l'électrode de référence au moyen d'un amplificateur. L'ensemble est lié à un microordinateur muni d'un logiciel (EC-Lab) permettant le tracé des courbes :

$E = f(t)$ et $I = f(E)$ et $\log |i| = f(E)$, et détermine ainsi le taux de corrosion et la vitesse de corrosion.

II. 2. 3 Le montage électrochimique

Les études électrochimiques ont été menées au moyen d'un montage électrochimique à trois électrodes que l'on peut voir sur la figure II.2.2. Une cellule en verre ouverte a été adaptée pour contenir des électrodes et la solution à étudier. dans tous les cas nous avons travaillé dans des solutions aérées. après avoir rempli la cellule par la solution à étudier, nous y plaçons trois électrodes : une électrode de travail, une électrode de référence et une électrode auxiliaire. Une contre électrode appelée aussi électrode auxiliaire en platine. L'électrode de référence est une électrode au calomel saturée ecs (+0.24v/enh).

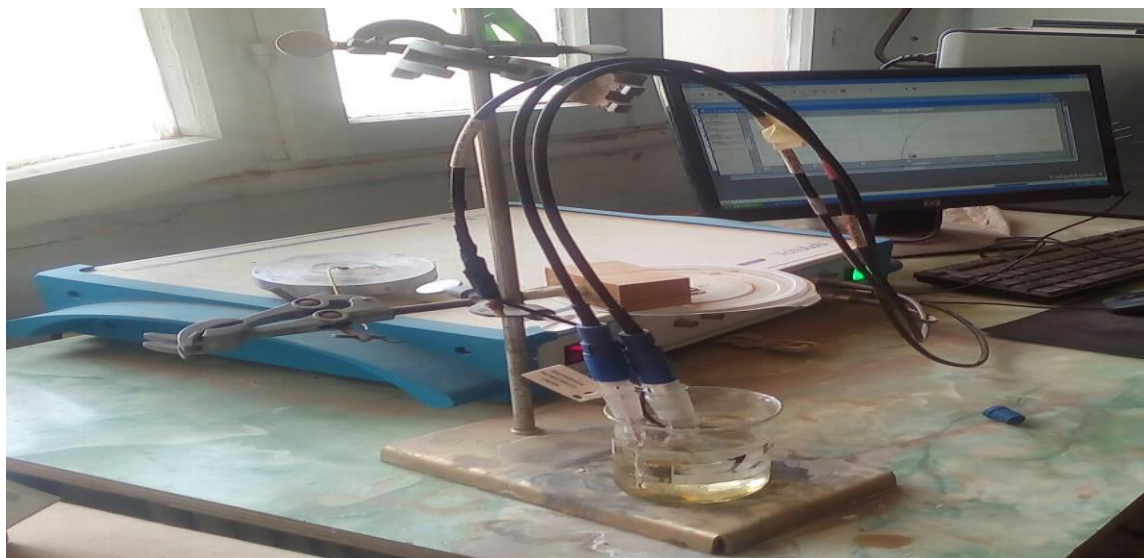


Figure II.2.2 : Dispositif Expérimental de la technique potentiostatique

L'électrode de travail (ET)

Est constituée de l'un des échantillons

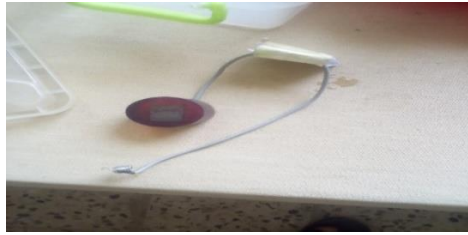


Figure II.2.3 : Les électrodes de travail

L'électrode de référence (ER)

Est une électrode au calomel saturée Ag/ Ag Cl constituée d'un fil de platine plongé dans une solution KCl



Figure II.2.4 : Electrode de référence au calomel saturée.

La collecte du courant est assurée par l'**électrode auxiliaire (EA)** composée d'une feuille de platine de 20 cm². Le platine est un bon conducteur électrique et il est suffisamment inerte chimiquement.

L'équipement électrochimique

Le principe du voltamètre consiste à appliquer un potentiel à travers l'électrode auxiliaire vers l'électrolyte pour accélérer l'opération de corrosion, et enregistrer la densité de courant (vitesse de corrosion) à l'aide du potentiostat (Voltalab 40 PGZ 301 de marque EG&G). Le potentiel de balayage débute à (-1000 mv jusqu'à -100 mv) avec une vitesse de balayage est égale à 1mV/s (60 mV/mn).



Figure II.2.5 : L'équipement électrochimique

II. 2. 4 Volta Master 4

Volta master 4 est un logiciel spécialement conçu pour tous les modelés des appareils voltalabe, le volta master 4 offre de nombreuses méthodes de calculer, (voltamètre, impédance, électrochimique, pulses analytique corrosion, étude des batteries) ; toutes les méthodes sont très souples et faciles et sont commandées par un ordinateur ; la II.2.6 montre l'interface de volta master 4. ce logiciel nous permet d'utiliser d'une chaine de méthode dans d'une même opération.

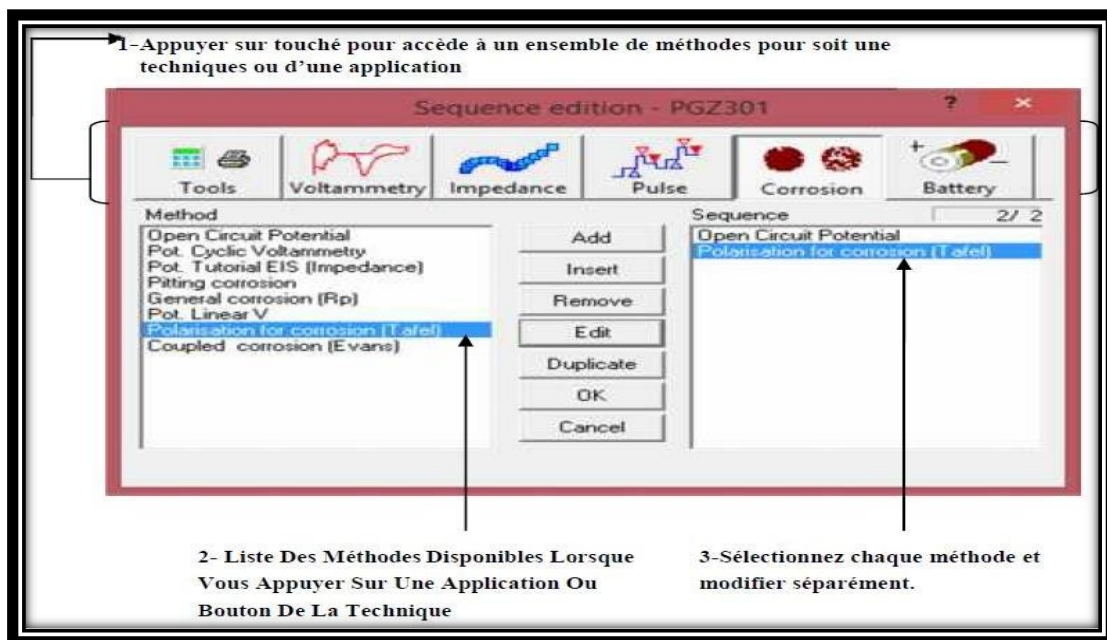


Figure II.2.6 : liste des méthodes disponibles

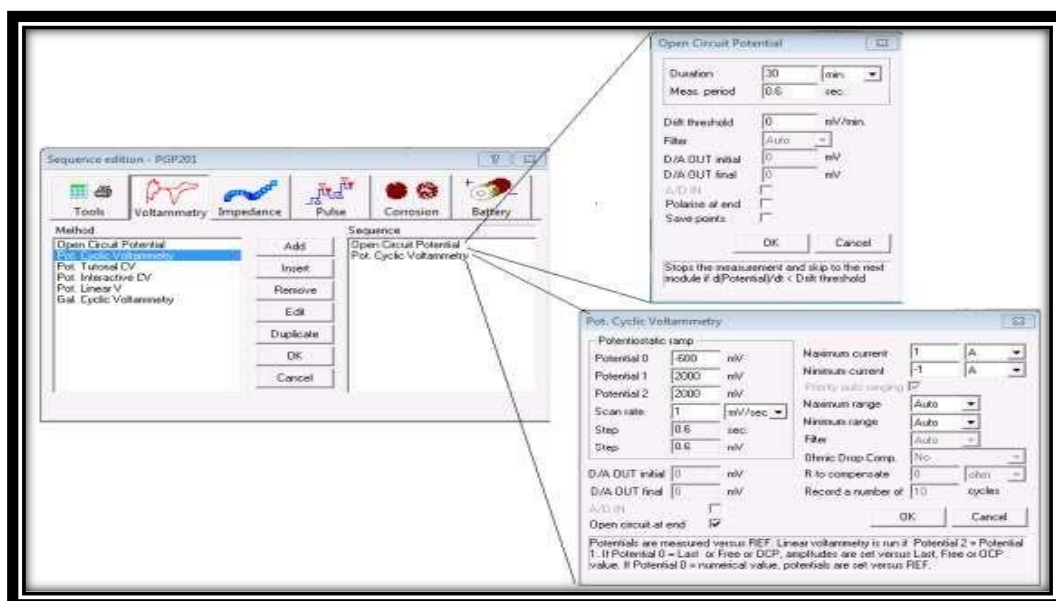


Figure II.2.7 : Conditions de travail

II. 2. 5 Mesure du potentiel libre

Les courbes de polarisation nécessitent la connaissance des potentiels libres, après différents tests, nous avons choisi d'immerger l'échantillon pendant une durée [30 min – 60 min – 90 min –120 min]. Ce temps est suffisant pour obtenir une stabilité satisfaisante du potentiel libre.

II. 2. 6 Choix de la vitesse de balayage

Nous avons opté à une vitesse de balayage égale à 10mV/s, cette dernière nous permet une bonne reproductibilité des résultats sans masquer les phénomènes.

II. 2. 7 Condition de polarisation

Courbes de polarisation : Le tracé des courbes a été effectué dans un domaine de potentiel allant de -1 à +1V.

Courbe de polarisation et droites de Tafel :

Pour le tracé de ces courbes on a choisi le domaine de linéarité des branches cathodiques et anodiques du courbe $\log I=f(E)$.

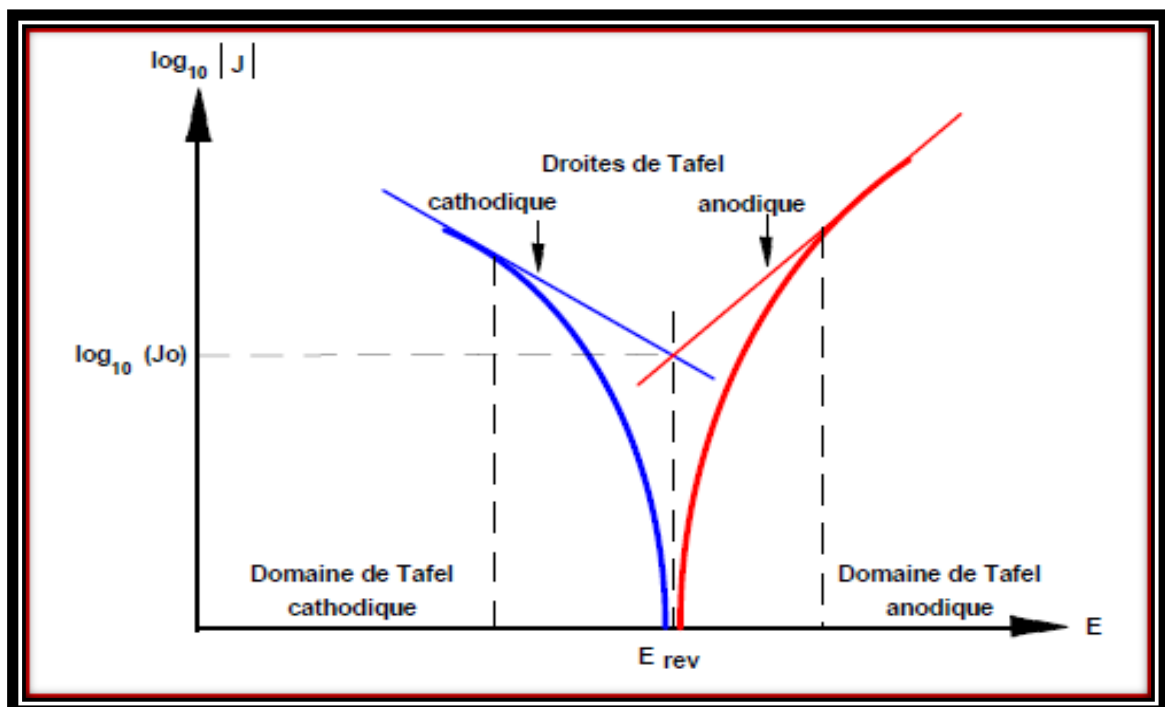


Figure II.2.8 : Courbe $\log|I|=f(E)$ et les droites de Tafel

CHAPITRE III

Résultats Et Interprétation

III.1. Caractérisation microstructurale d'un acier X70

On a examiné les microstructures des trois échantillons étudiés (sans traitement thermique, traité thermiquement à 500°C et à 600°C) en trois zones, dans le métal de (MB), la (ZAT) et le métal fondu.

III.1.1 Etat initial

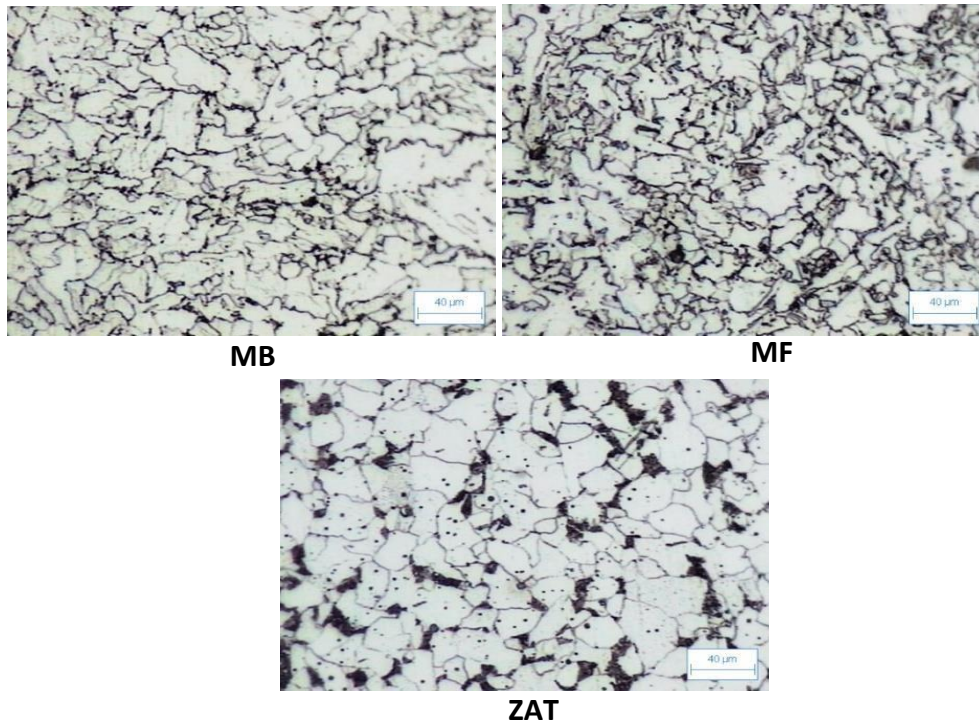
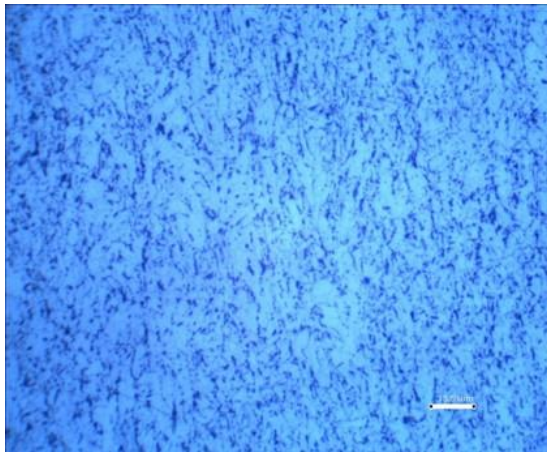


Figure III. 1.1 : les microstructures des zones de la soudure, avant le traitement thermique

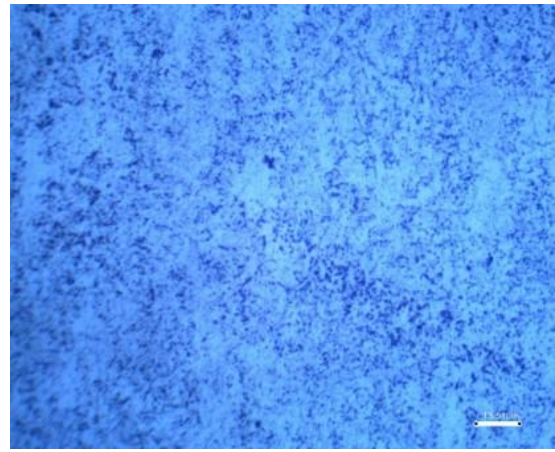
La microstructure initiale du matériau de base (MB) est ferrito-perlitique, la zone affectée thermiquement (ZAT) se défait dans la forme et le type de la ferrite (ferrite aciculaire+ferrite quasipolygonale), elle dépend de l'emplacement de la zone étudiée par rapport au bain de fusion (zone fondue MF). La ZAT avant traitement est constituée de deux zones : ZAT à gros grains et ZAT à grains fins. La première zone a une microstructure biphasée qui constitue principalement de perlite et de ferrite quasi-polygonale à gros grains et la ferrite aciculaire. On remarque aussi la présence des précipitations grossières des éléments de micro-alliage en comparaison avec les tailles ultrafines habituelles de ces précipitations dans le métal de base. La zone à grains fins adjacente à la zone à gros grains ayant une microstructure de ferrite polygonale à grains fins et la dissolution des précipités des éléments de micro-alliage. La microstructure de la zone fondue est constituée principalement de la ferrite polygonale, des zones perlitiques, des précipitations.

III.1.2 Revenu à 500 °C

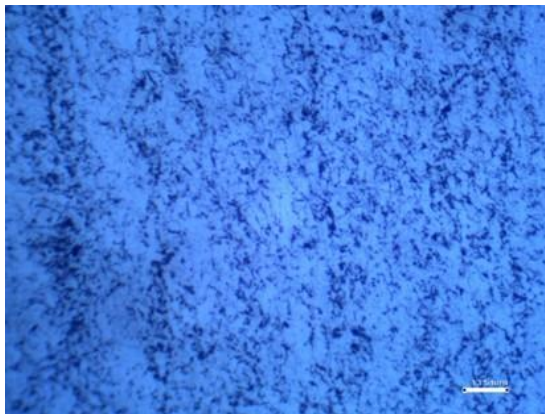
III.1.2.1 Métal de base



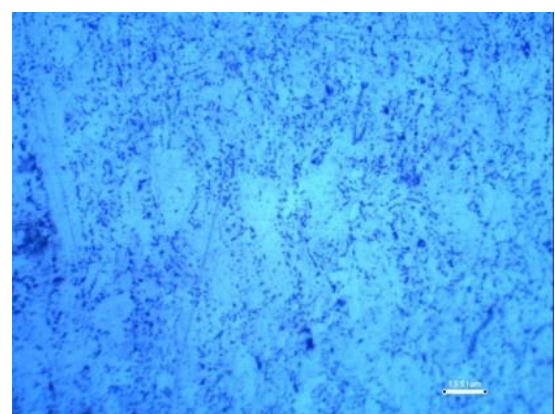
30 min



60 min



90 min

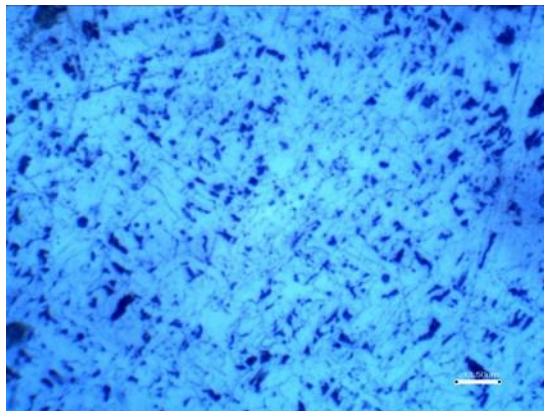


120 min

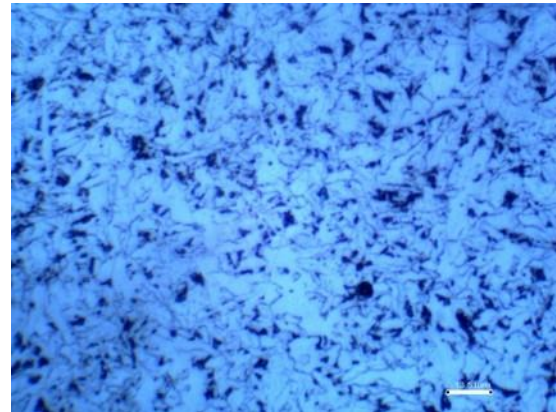
Figure III.1.2.1 : Micrographie de la zone Métal de base du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 500°C

- Les constituants de cette zone sont la ferrite, ferrite quasi polygonale et perlite.

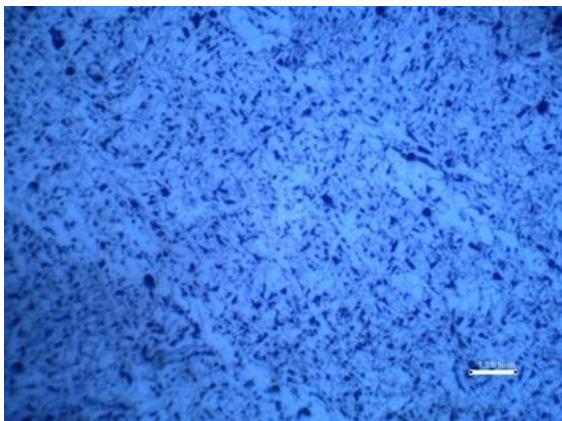
III.1.2.2 Metal fondu



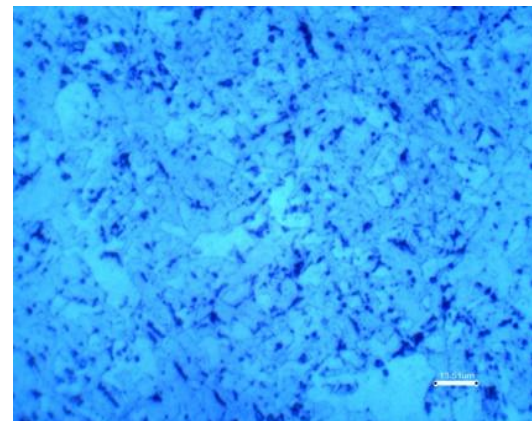
30 min



60 min



90 min

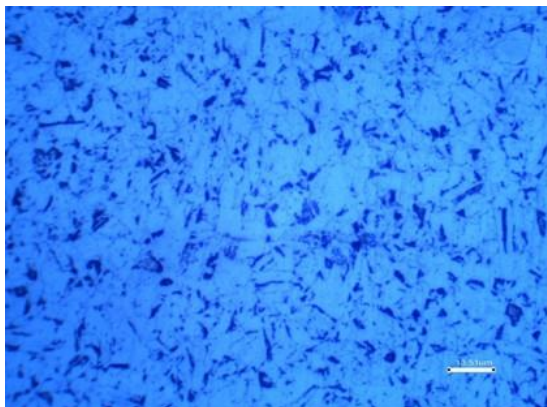


120 min

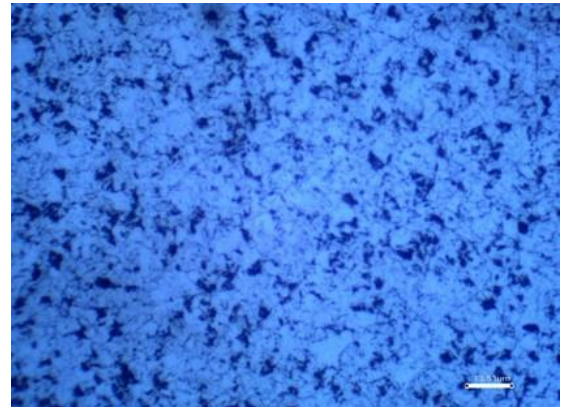
Figure III.1.2.2 : Micrographie de la zone métal fondu du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 500°C

- On remarque que le taux de perlite augmente dans le métal fondu avec l'augmentation de la température de revenu et le temps de maintien
- La coalescence des précipités semble très claire à cette température.

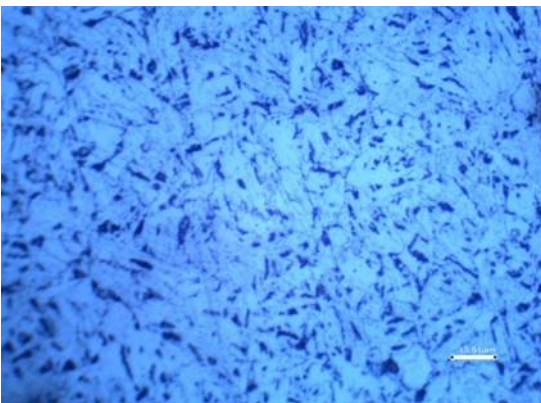
III.1.2.3 Zone affectue thermique



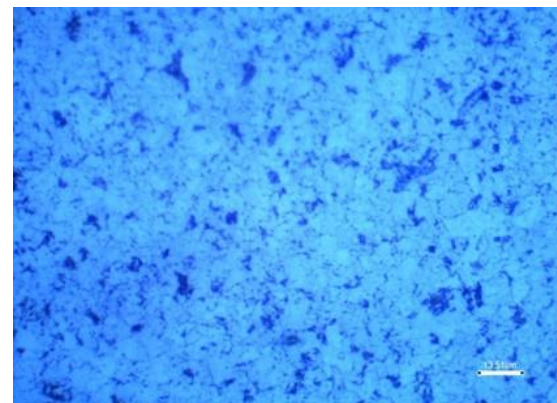
30 min



60 min



90 min



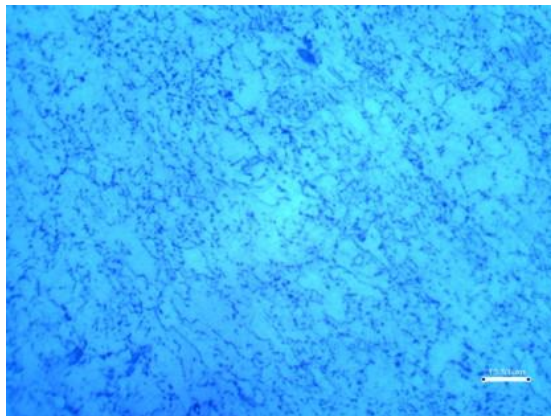
120 min

Figure III.1.2.3: Micrographie de la zone affectue thermique du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 500°C

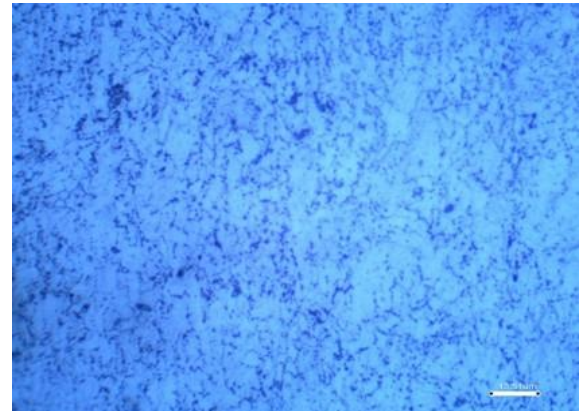
- Le Zone affecté thermique présente une microstructure ferrito-perlitique très fine, présentant des grains allongés dans le sens de laminage. aciculaire sous forme d'aiguille orientée aléatoirement.

III.1.3 Revenu à 600 °C

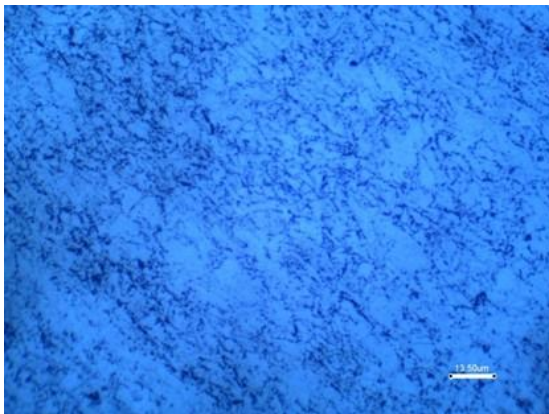
III.1.3.1 Métal de base



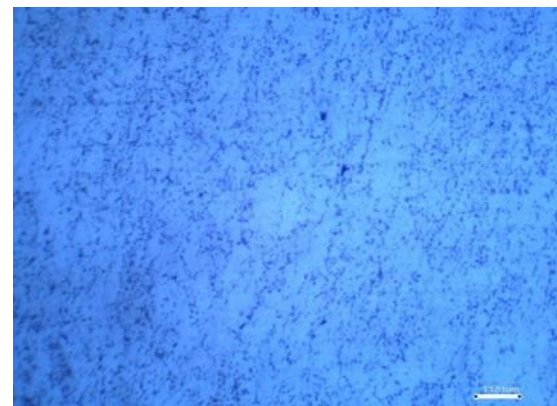
30 min



60 min



90 min

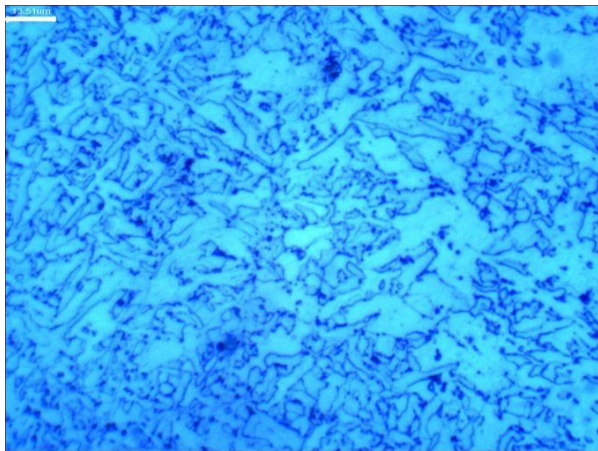


120 min

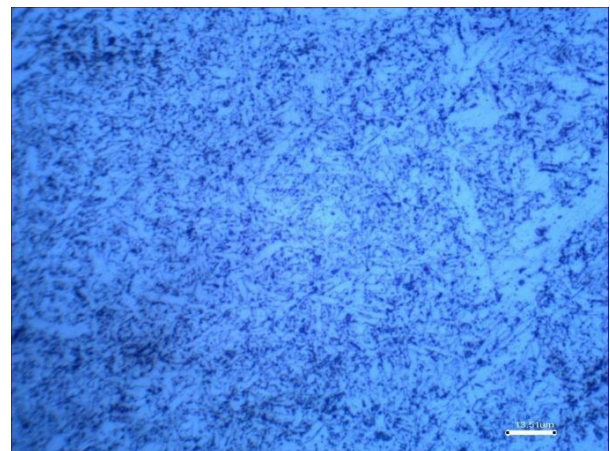
Figure .1.3.1: Micrographie de la zone Métal de base du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 600°C

- On remarque que le taux de perlite augmente dans le métal base avec l'augmentation de la température de revenu et le temps de maintien.

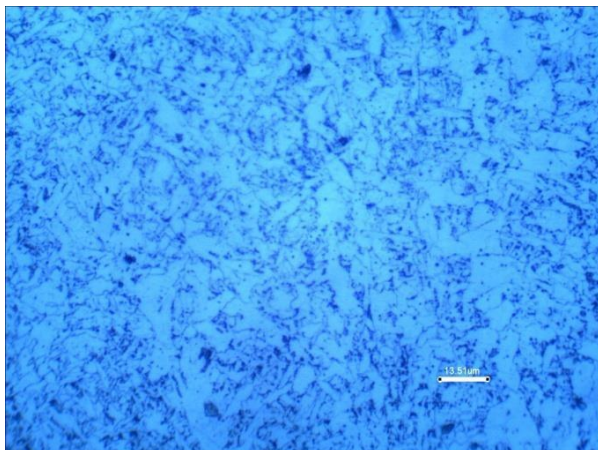
III.1.3.2 Metal fondu



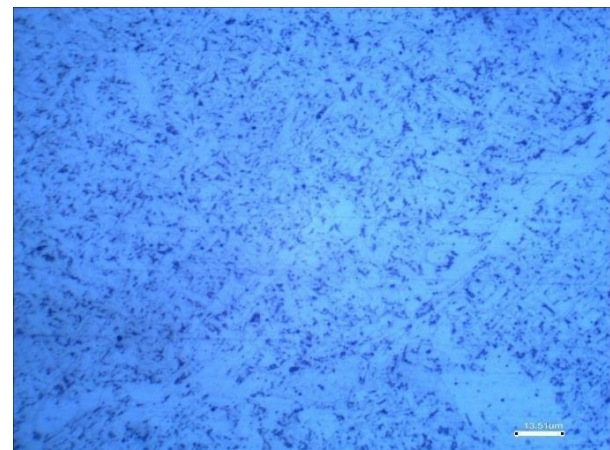
30 min



60 min



90 min

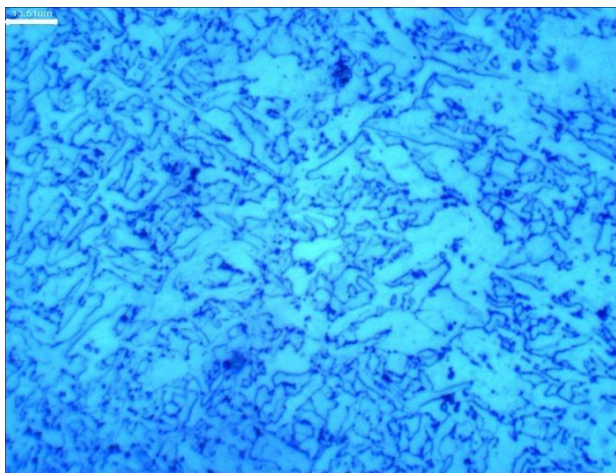


120 min

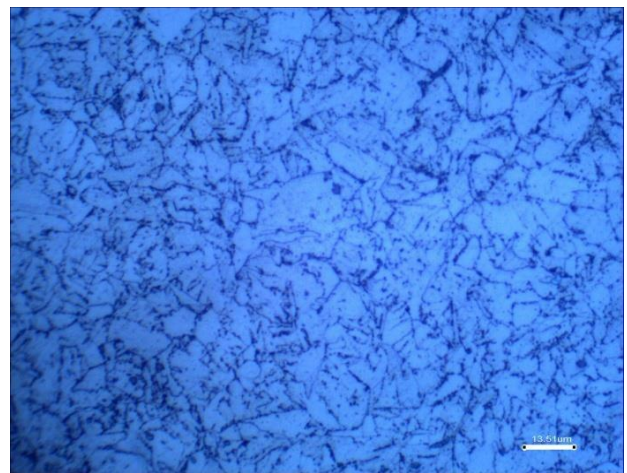
Figure III.1.3.2: Micrographie de la zone métal fondu du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 600°C

- La microstructure de la zone fondue est constituée principalement de la ferrite polygonale, des zones perlitiques, des précipitations, ne change pas la structure.

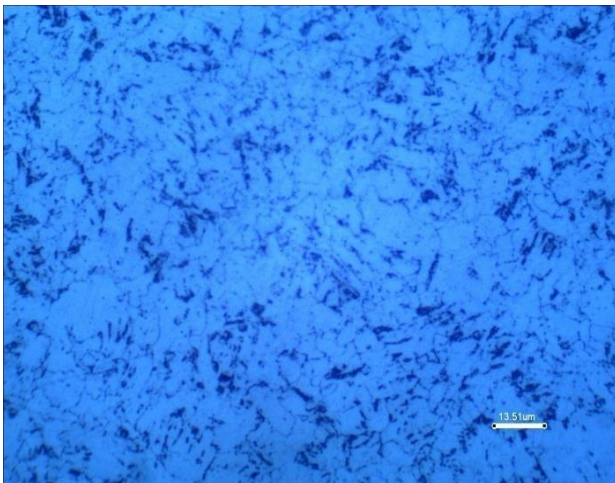
III.1.3.3 Zone affectue thermique



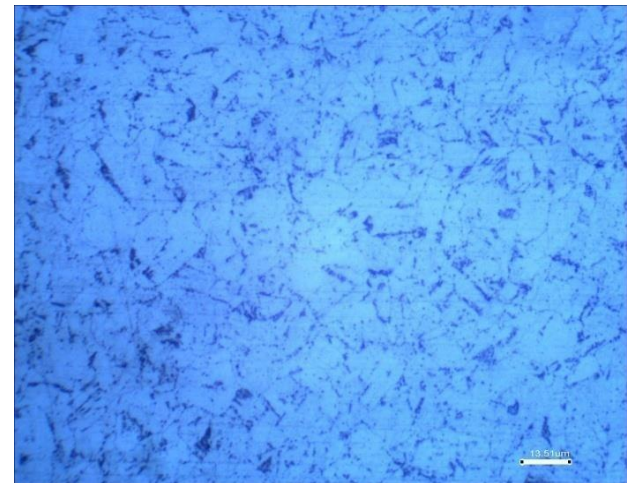
30 min



60 min



90 min



120 min

Figure III.1.3.3 : Micrographie de la zone affectue thermique du cordon de l'acier X70 (x500) avec traitement thermique à 600°C

- Ne change pas la structure a 600 °c et augment le temp de maintien aussi ne change pas.

III.2 Caractérisation électrochimique

L'objectif d'après cette caractérisation est de tracer les courbes de polarisation ainsi les courbes de Tafel et l'extrapolation des paramètres de la cinétique de la corrosion du cordon de soudure dans l'acide sulfurique, avant et après traitements thermiques.

III.2.1 Témoin

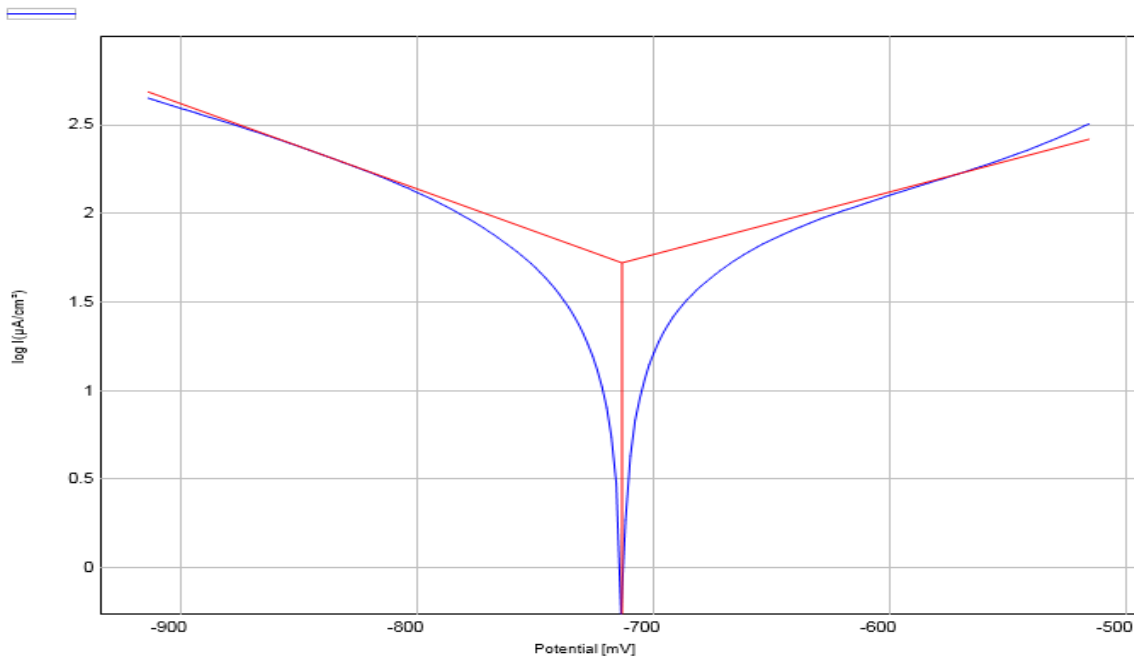


Figure III. 2.1 : Droites de Tafel pour témoin de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-713.6 mV
i corrosion	52.5503 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Rp	798.38 ohm.cm ²
Beta a	280.5 mV
Beta c	-207.6 mV
Vitesse de corrosion	614.6 $\mu\text{m}/\text{AN}$

Tableau (N° III -1): Résultats obtenus de droites de Tafel pour témoin de l'acier X70, dans une solution (NaCl).

- L'échantillon qui n'a subi à aucun traitement thermique présente une faible résistance à la corrosion, et ça peut être dû à l'existence des contraintes résiduelles.

III.2.2 Revenu à 500 °C

III.2.2.1 Temps de maintien à 30 min

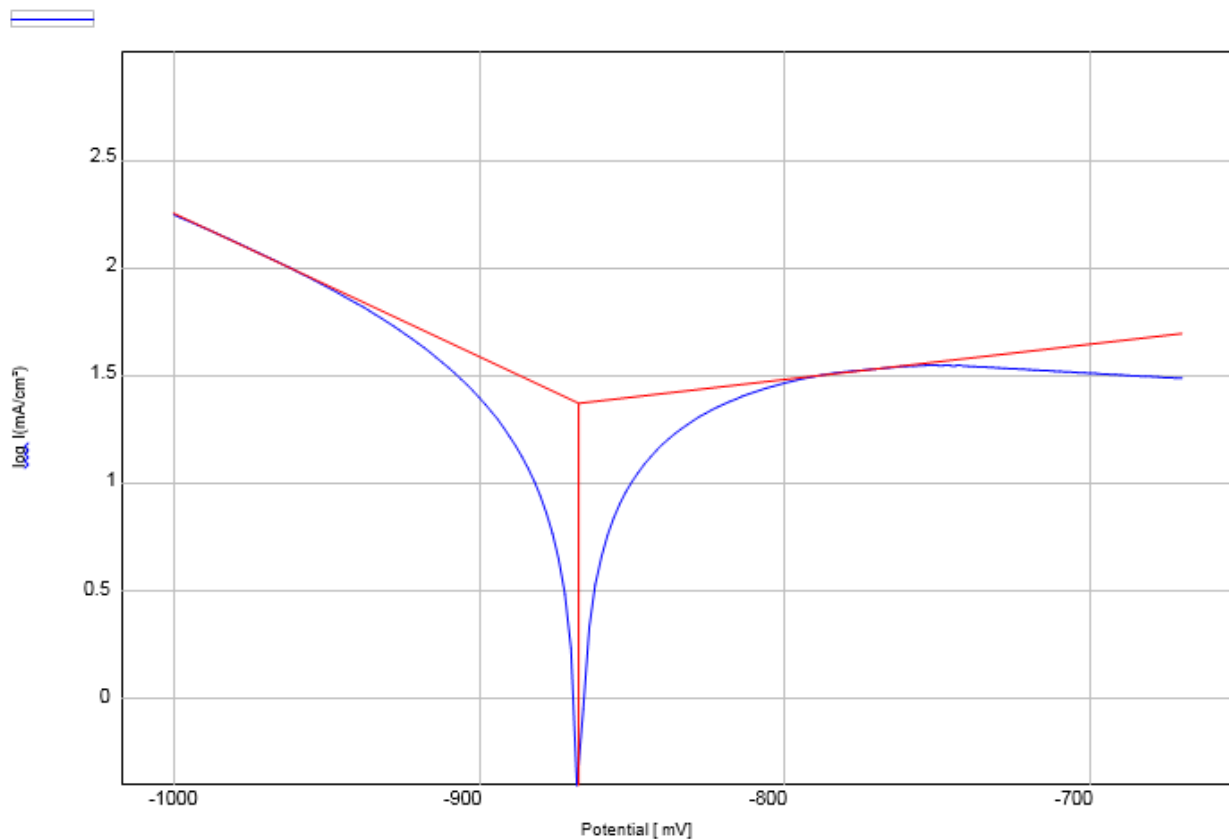


Figure III. 2.2.1 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-867.4 mV
i corrosion	2.3669 mA/cm ²
Rp	15.73 ohm.cm ²
Beta a	611.6 mV
Beta c	-150.3 mV
Vitesse de corrosion	27.68 μm/AN

Tableau (N° III -2): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- On remarque que la vitesse de corrosion diminue après les traitements thermiques et ça due à la relaxation du matériau.

III.2.2.2 Temps de maintien à 60 min

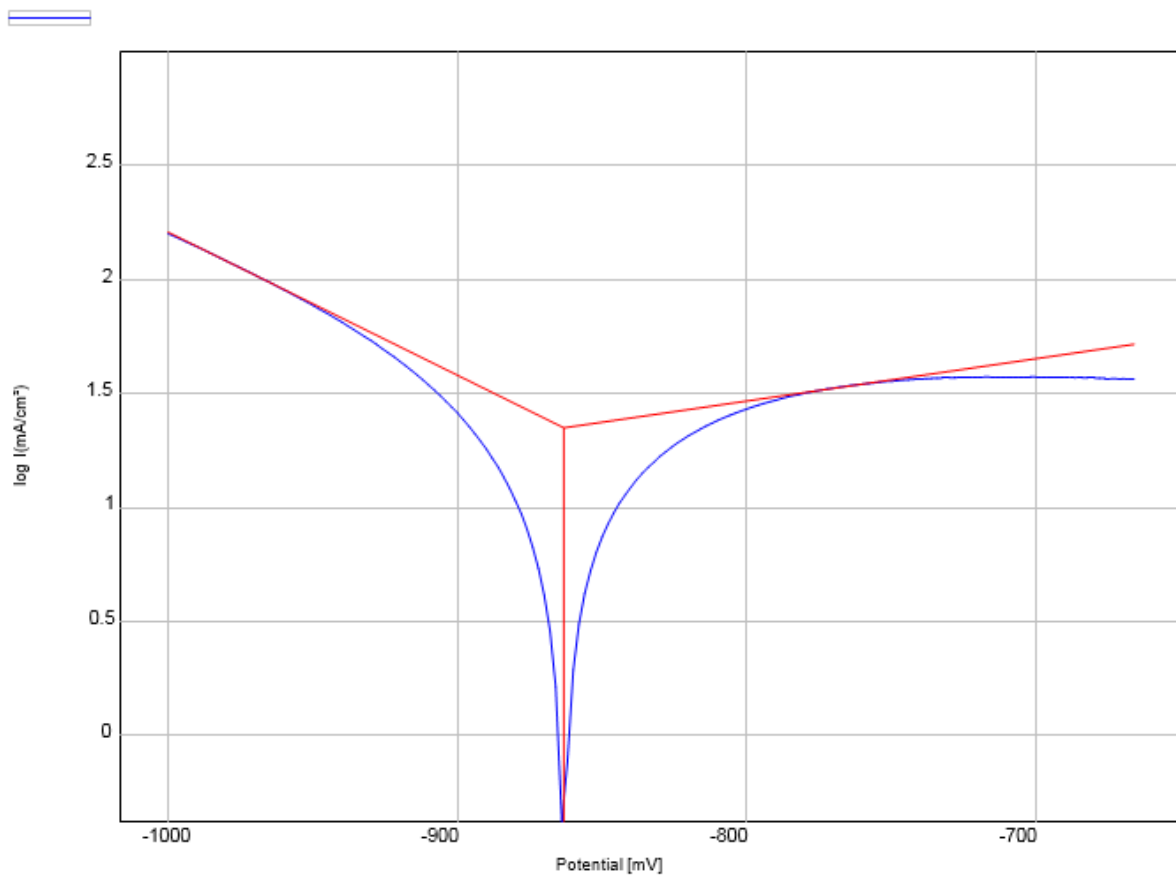


Figure III. 2.2.2 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-863.3 mV
i corrosion	2.2433 mA/cm ²
Rp	17.04 ohm.cm ²
Beta a	540.5 mV
Beta c	-159.5 mV
Vitesse de corrosion	26.23 μm/AN

Tableau (N° III -3): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 °C et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- On remarque que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de Rp

III.2.2.3 Temps de maintien à 90 min

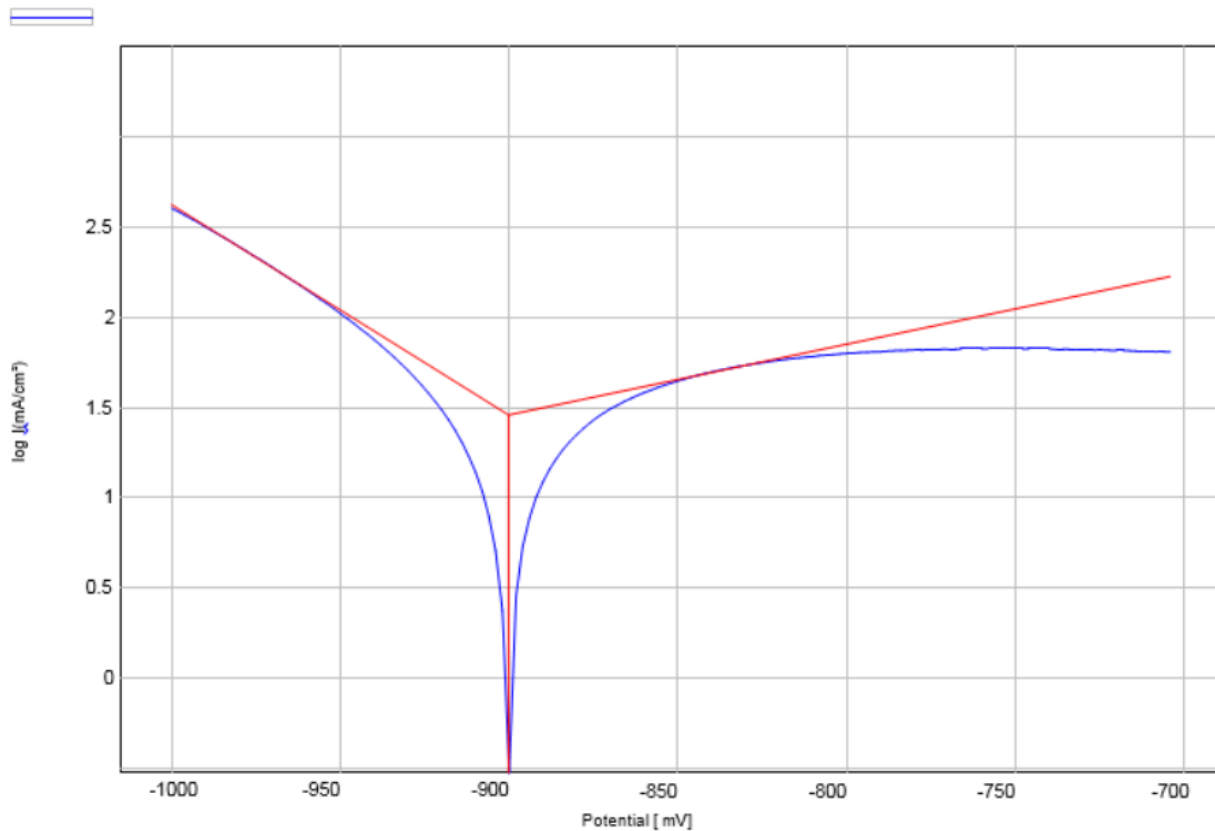


Figure III.2.2.3 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-900.1 mV
i corrosion	0.9128 mA/cm ²
Rp	25.03 ohm.cm ²
Beta a	255.2 mV
Beta c	-85.7 mV
Vitesse de corrosion	10.67 μm/AN

Tableau (N° III -4): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- On remarque que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de temps

III.2.2.4 Temps de maintien à 120 min

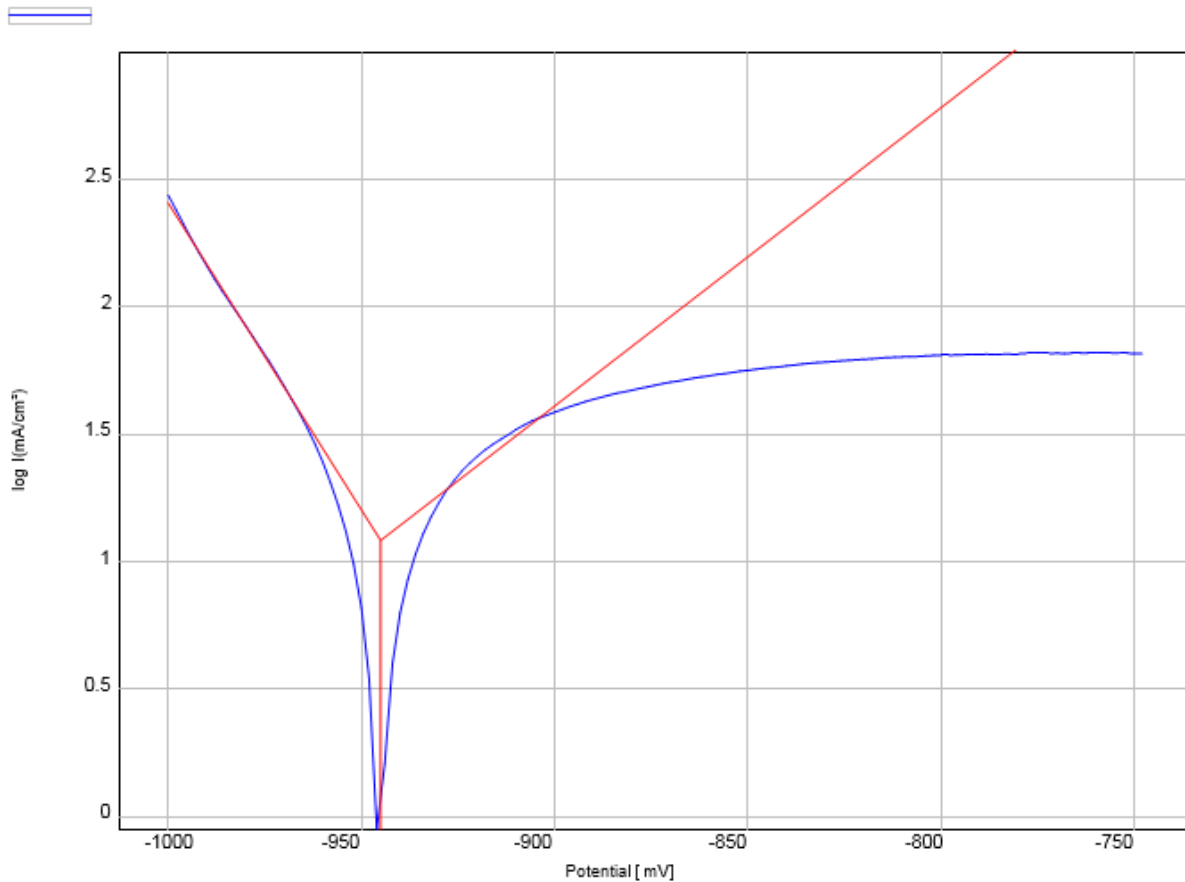


Figure III. 2.2.4 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 500 °C et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-945.0 mV
i corrosion	0.1213 mA/cm ²
R_p	78.62 ohm.cm ²
Beta a	86.1 mV
Beta c	-41.5 mV
Vitesse de corrosion	1.419 μm/AN

Tableau (N° III -5): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 500 ° et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- une bonne résistance à la corrosion

III.2.3 Revenu à 600 °C

III.2.3.1 Temps de maintien à 30 min

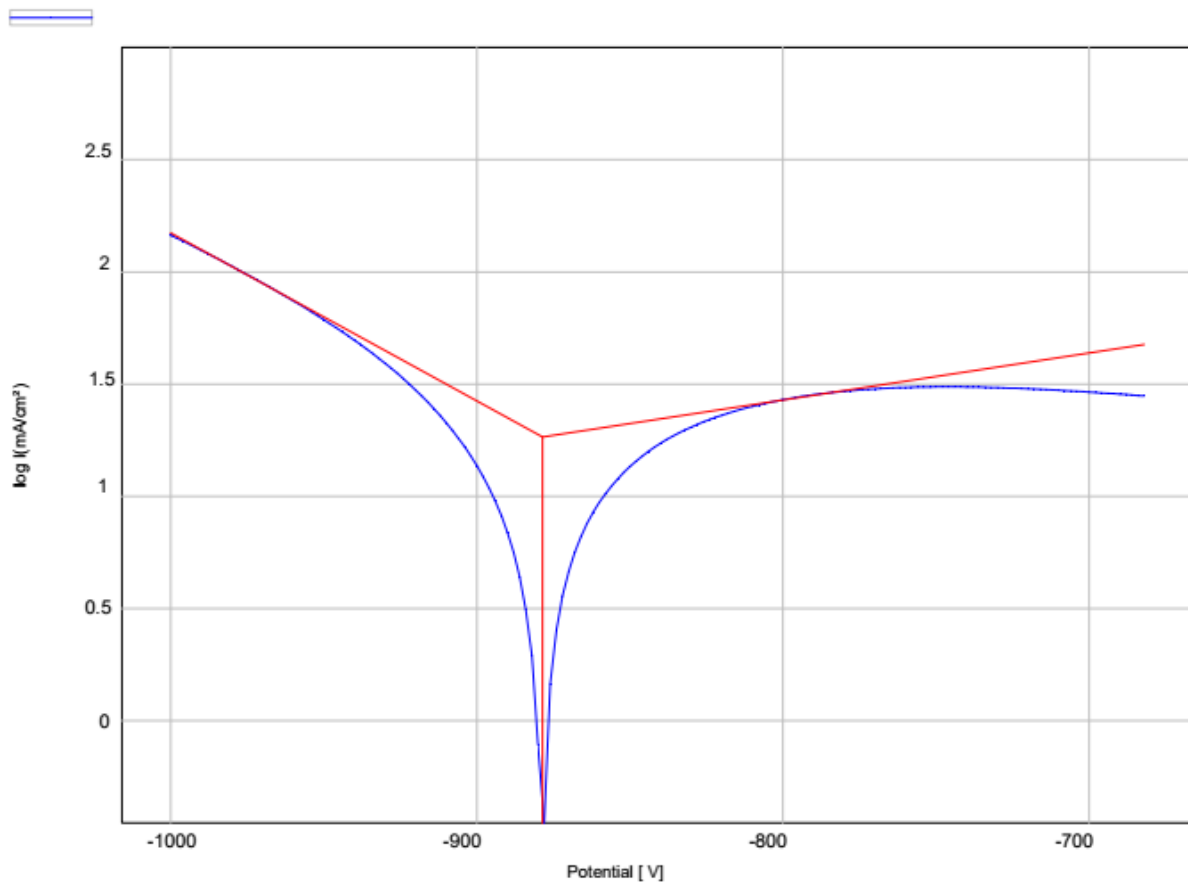


Figure III.2.3.1.: Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-878.6 mV
i corrosion	1.8386 mA/cm ²
Rp	18.14 ohm.cm ²
Beta a	477.4 mV
Beta c	-133.6 mV
Vitesse de corrosion	21.50 μm/AN

Tableau (N° III -6): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (30 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- On constate que la résistance de polarisation augmente avec l'augmentation de la température par rapport à témoin.

III.2.3.2 Temps de maintien à 60 min

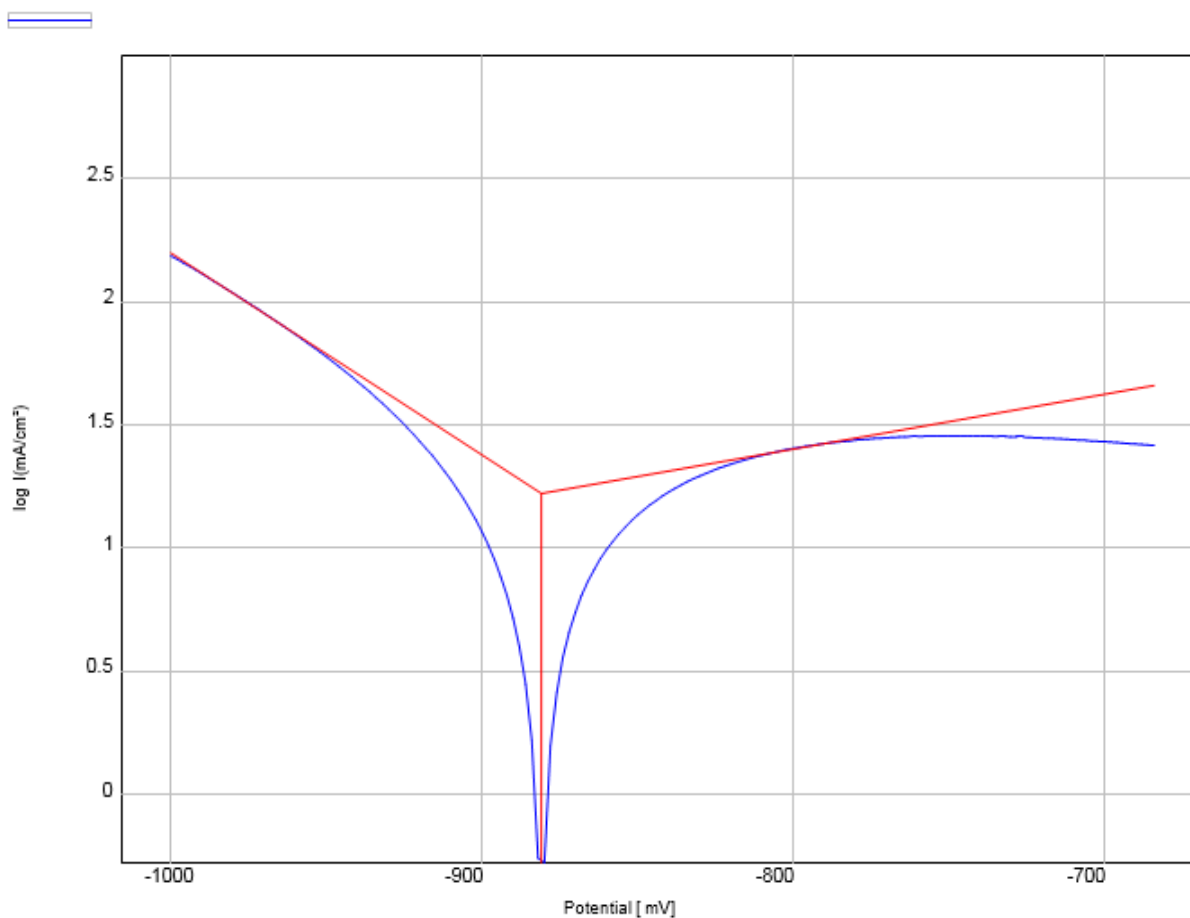


Figure .2.3.2 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-880.9 mV
i corrosion	1.6700 mA/cm ²
Rp	19.06 ohm.cm ²
Beta a	449.8 mV
Beta c	-122.0 mV
Vitesse de corrosion	19.53 μm/AN

Tableau (N° III -7): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (60 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- On remarque que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de temps

III.2.3.3 Temps de maintien à 90 min

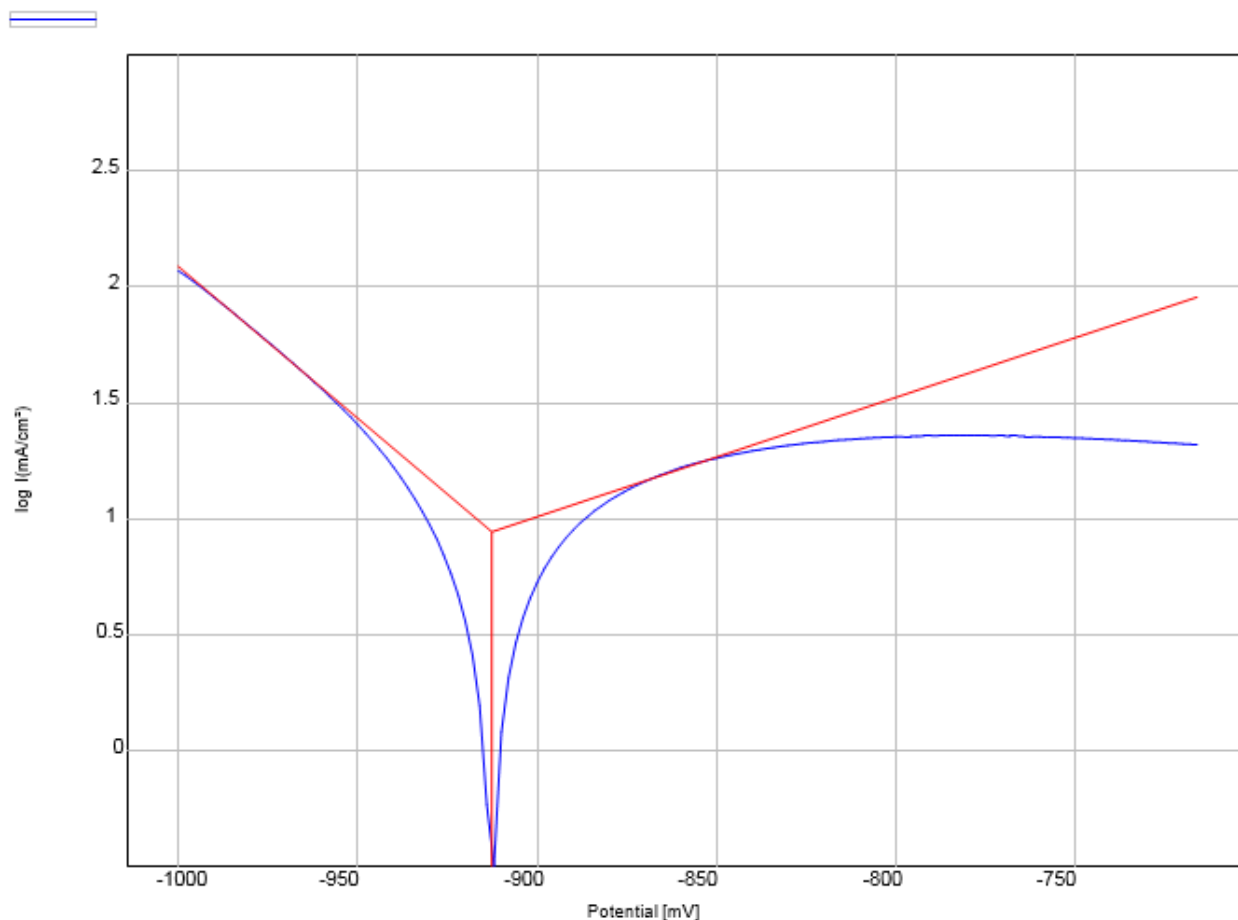


Figure .2.3.3: Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-912.6 mV
i corrosion	0.8814 mA/cm ²
R_p	21.90 ohm.cm ²
Beta a	194.3 mV
Beta c	-76.4 mV
Coefficient	1.0000
Vitesse de corrosion	10.30 μm/AN

Tableau (N° III -8): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (90 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

➤ On remarque que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de temps

III.2.3.4 Temps de maintien à 120 min

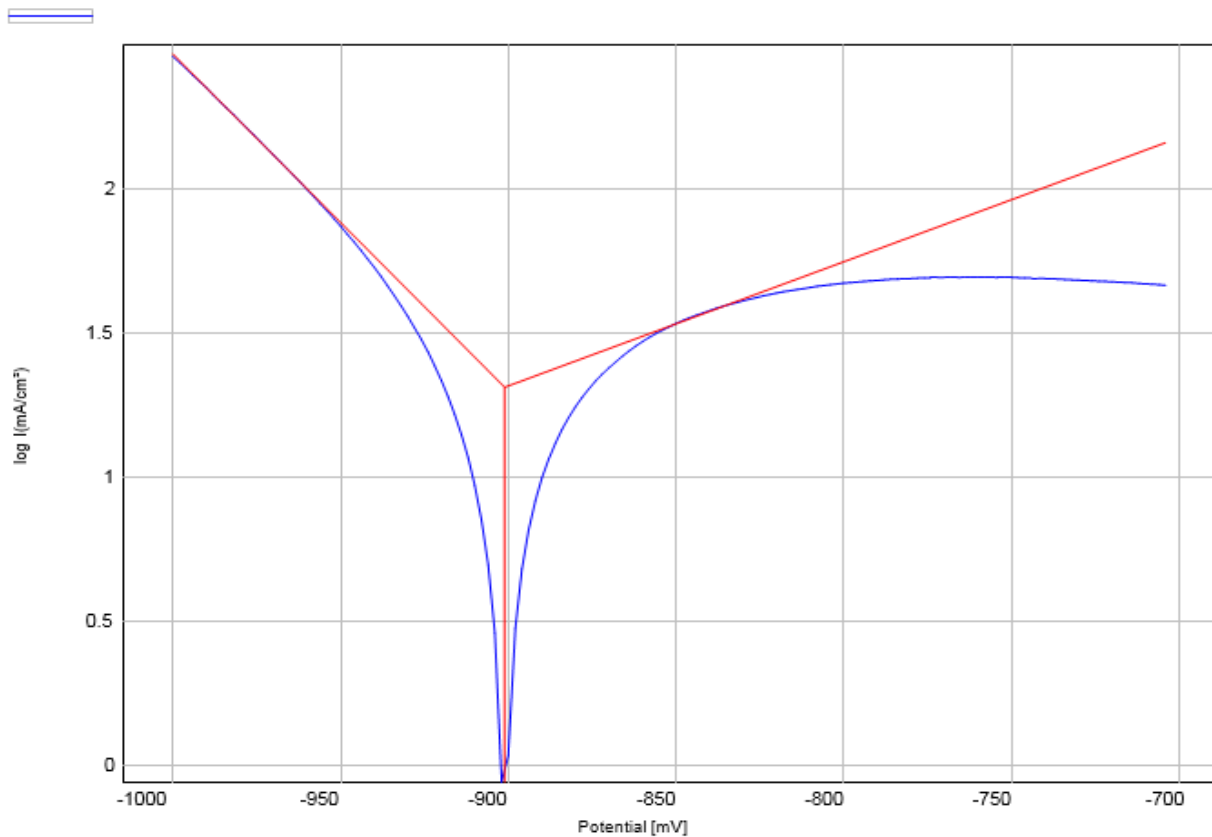


Figure .2.3.4 : Droites de Tafel pour échantillon revenu à 600 °C et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

E(i=0)	-901.0 mV
i corrosion	0.6474 mA/cm ²
Rp	33.46 ohm.cm ²
Beta a	232.2 mV
Beta c	-85.6 mV
Vitesse de corrosion	7.571 μm/AN

Tableau (N° III -9): Résultats obtenus de droites de Tafel pour l'échantillon revenu à 600 ° et temps (120 min) de l'acier X70, dans une solution (NaCl)

- On remarque que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de Rp

Conclusion Générale

Conclusion Générale

D'après l'analyse des résultats obtenus par les traitements thermiques, les conclusions qui peuvent être retiré de cette étude sont :

le traitement thermique a pour conséquence de diminuer les contraintes internes et ordonner la structure cristalline des échantillons.

L'échantillon qui n'a subi à aucun traitement thermique présente une faible résistance à la corrosion.

L'analyse des Courbe de polarisation et droites de Tafel de tests électrochimiques des échantillons dans une solution (NaCl) , indiquent que plus la résistance de l'acier à la corrosion est grande, plus la résistance à la polarisation est grande. R_p et i_{cor} sont inversement proportionnels.

Le traitement thermique a un effet positif sur la vitesse de corrosion.

Références bibliographiques

- [1] : Lahcène SAOU, (2015), Mémoire master (Le procédé de fabrication des pipes (X52) pour transport hydrocarbures (à El-Hadjar)), Université Mohamed Kheider.
- [2] : B. Zouidja, Caractérisation mécanique et microstructurale d'un cordon soudure pour un acier X60 destiné à l'installation des hydrocarbures, Université Amar Thelidji-Laghout, 2012.
- [3] : Metals handbook Vol.1 «Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys», ASM International, USA, 2005.
- [4] :R. Mehibil. Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium. Magister 2008. Université de Skikda.
- [5] : K. ROUIBAH, mémoire de magistère" Contribution à l'étude du comportement électrochimique du couple galvanique acier au carbone/anodes de zinc dans l'eau de mer naturelle", (2003).
- [6] : Guy MURRY Soudage et soudabilité métallurgique des métaux Techniques de l'ingénieur.
- [7] : R.Baus. "Application de soudage aux constructions" ,1979.
- [8] : AMER HAMAIDI, YOUNES MADJOUR (Contrôle qualité des soudures X52M réalisées par les procédés SAW et SMAW) Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou me 2014
- [9] : Cristian Bonnet Le soudage : métallurgie et produit, CTAS,2001.
- [10] : Saouli. Z et Hadjadj. S Mémoire de master, université kasdi Merbah Ouargla,2017.
- [11] : H.El bakouri. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique. Mémoire pour du DESA. Université Mohammed 1 – Oujda.
- [12] : CEFRACOR. Matériaux métalliques : phénomènes de corrosion, quatrième partie :les différentes formes de corrosion aqueuse. CEFRACOR 2003, pp.75-86 ,disponible sur :<http://www.cefracor.org/doc/cours-04/pdf>.
- [13] : Robert D &Richard, Drilling practice, Ch 3, p 75.
- [14] : M. Maha, Mécanisme de transfert direct en corrosion microbienne des aciers : Application geobactersulfurreducens et à l'hydrogénase de clostridium acetobutylicum. Génie des Procédés et de l'environnement, Université de Toulouse, 2009.
- [15] : BENSOUDA Zakariae Extraction, caractérisation et potentiel inhibiteur des huiles essentielles contre la corrosion d'aciers doux dans une solution chlorhydrique molaire, 2018

- [16] : K. Aramaki, T. Shimura, Corrosion. Sci., 47, 2005.
- [17] : Mr. MAREC, Corrosion et Protection cathodique, Ecole D'Application des Technique.
- [18] : https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_contrainte.htm
- [19] : LANDOLT D. : Traité des matériaux. Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [20] C. Defontaine, Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré, Journée thématique, 2011.
- [21] : H.Uhlig, « corrosion et protection », Edition Technique et Documentation, Dunod, Paris, (1970).
- [22] : G. Moretti, G. Quartone et al, Some derivatives of indole as mild steel corrosion inhibitors in 0.5M sulphuric acid, Br. Corros. J, 31, 49, 1996.
- [23] : A. Bendjebbour, Corrosion localisé des aciers API SL - de la ligne D'ASR/MP sollicité en sol algérien, Université de Tlemcen, 2011.
- [24] : JAAP. Schijve, Fatigue of structures and materials, Springer, 2ème edition, p 457-479, 2008
- [25] : <https://www.q8oils.com/fr/travail-des-metaux/3-facons-dinhiber-la-corrosion/>
- [26] : L. Ghilani, Mémoire de Magister, « Tenue a la corrosion d'un dépôt de chrome électrolytique sur un substrat en acier X45 », (2008) p. 41.
- [27] : <https://carbonimpulse.com/principes-et-avantages-de-la-protection-cathodique-des-pipelines/>
- [28] : B.GROSGOGEAT, P.COLON Société Francophone de Biomatériaux Dentaires Date de création du document 2009_2010.