

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingéniorat  
Département de Génie Mécanique

# Mémoire

Présenté par

**Naima AKILAL**

Pour l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**

Filière : Génie Mécanique

Option : Sciences des Matériaux

## Thème

**Étude de la corrosion de la soudure de  
l'acier A33 utilisé en construction navale**

**Soutenu le:**

**Devant le jury composé de:**

L. MAKHLOUFI	Professeur, Université A Mira – Béjaïa	Président
M. KERKAR	Professeur, Université A Mira – Béjaïa	Rapporteur
F. HELLAL	Professeur, ENP – Alger	Examineur
K. BELHAMEL	Maître de Conférences, Université A Mira–Béjaïa	Examineur
Y. KHELFAOUI	Maître de Conférences, Université A Mira–Béjaïa	Invité

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur **Moussa KERKAR**, Professeur à l'Université de Béjaïa, pour avoir accepté la charge d'encadrer ce présent travail. Je lui adresse ma gratitude pour l'attention, les conseils, les encouragements, la patience dont il a fait preuve tout au long de ma deuxième année post-graduation. Il a su me donner une grande liberté d'initiative avec des conseils permanents et judicieux. Et sans qui ce mémoire aurait été difficilement réalisable.

Je remercie sincèrement Monsieur **Youcef KHELFAOUI**, Maître de conférences à l'Université de Béjaïa, qui m'a aidé en me faisant profiter de ses connaissances.

Je suis très reconnaissante à Monsieur **Kamel YAYA**, chargé de cours à l'université de Béjaïa, pour son aide en Microscopie optique.

Ma sincère reconnaissance va à Monsieur **Laid MAKHLOUFI**, Professeur à l'Université de Béjaïa, pour avoir accepté de présider le jury, et d'avoir mis à ma disposition son laboratoire et tout le matériel nécessaire pour la bonne réalisation de la partie électrochimique.

Comme je tiens à remercier Monsieur **Fatah HELLAL**, Professeur à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, et Monsieur **Kamel BELHAMEL**, Maître de conférences à l'Université de Béjaïa, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je souhaite remercier chaleureusement tous **les membres de l'équipe Électrochimie-Corrosion** pour leurs amitiés et leurs aides, qu'ils ont su me témoigner, en rendant les jours que j'ai passé en leur compagnie très agréables.

Je tiens à remercier **les Enseignants du Département Génie Mécanique** ainsi que **les Techniciens du Hall de Technologie** pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur soutien.

Enfin, je dois ma grande gratitude à **mes parents** qui m'ont toujours soutenu, encouragé et aidé. Qu'ils trouvent, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de leurs efforts.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION</b> -----	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I</b> -----	<b>3</b>
<b>ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> -----	<b>3</b>
<b>I.1 LA CORROSION</b> -----	<b>3</b>
I.1.1 Définition -----	3
I.1.2 Les diverses formes de corrosion -----	3
a. La corrosion uniforme -----	4
b. La corrosion localisée-----	4
c. La corrosion sous contrainte -----	6
I.1.2 Les mécanismes de la corrosion-----	6
I.1.3 Réactions électrochimiques et corrosion métallique -----	8
I.1.4 Condition nécessaire pour qu'un métal se corrode -----	8
I.1.5 Les paramètres qui influent sur la résistance à la corrosion dans un milieu aqueu ----	-9
I.1.4 Diagramme de Pourbaix -----	10
<b>I.2 LE SOUDAGE</b> -----	<b>12</b>
I.2.1 Définition -----	12
I.2.2 La zone affectée thermiquement -----	12
a. Définition de la zone affectée thermiquement -----	12
b. Détermination de la zone affectée thermiquement-----	12
c. Structure de la zone affectée thermiquement -----	13
d. Initiation de la corrosion-----	13
I.2.3 Influence des paramètres de soudage sur la résistance à la corrosion -----	14
I.2.4 Effet des gaz -----	14
<b>CHAPITRE II</b> -----	<b>16</b>
<b>MATERIAU ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES</b> -----	<b>16</b>
<b>II.1 LE MATERIAU</b> -----	<b>17</b>
II.1.1 la composition chimique -----	17
<b>II.2 PREPARATION DES ECHANTILLONS</b> -----	<b>18</b>
II.2.1 Le Soudage des tôles -----	18
II.2.2 Détermination des différentes zones affectées thermiquement-----	18
II.2.3 Réalisation des disques -----	19
II.2.4 Réalisation des embouts de l'électrode tournante -----	20

<b>II.3 CONDITIONS ET TECHNIQUES ELECTROCHIMIQUES</b> -----	<b>22</b>
II.3.1 Conditions électrochimiques -----	22
a. L'électrolyte-----	22
b. Les électrodes-----	22
II.3.2 Méthodes électrochimiques-----	22
II.3.2.1 Chronopotentiométrie -----	23
II.3.2.2 La voltamétrie -----	23
II.3.2.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique-----	27
<b>II.4 OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES ET ESSAIS DE MICRODURETE</b> -----	<b>31</b>
II.4.1 Observation microscopique-----	31
a. Polissage mécanique -----	31
b. Attaque chimique-----	31
c. Microscopie optique -----	32
II.4.2 Microdureté-----	32
a. Dispositif expérimental-----	32
<b>CHAPITRE III</b> -----	<b>34</b>
<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS</b> -----	<b>34</b>
<b>INTRODUCTION</b> -----	<b>34</b>
<b>III.1 DETERMINATION DES ZONE LES PLUS SENSIBLES A LA CORROSION ET COMPREHENSION DES PROCESSUS AYANT LIEU A L'INTERFACE METAL/SOLUTION</b> -----	<b>35</b>
III.1.1 Soudure de la tôle de livraison-----	36
a. Courbes chronopotentiométriques-----	36
b. Voltamétrie -----	37
b.1 Les courbes cathodiques -----	38
b.2 Les courbes anodiques -----	39
b.3 Courbes de Tafel-----	40
c. Spectroscopie d'impédance électrochimique -----	41
d. Observations microscopiques-----	43
e. Essais de microdureté-----	44
III.1.2 Assemblage de deux tôles saines -----	45
a. Courbes chronopotentiométriques-----	45
b. Voltamétrie-----	46
b.1 Les courbes cathodiques -----	47
b.2 Les courbes anodiques -----	48
b.3 Courbes de Tafel-----	48
c. Spectroscopie d'impédance électrochimique -----	50
d. Observations microscopiques-----	52
e. Essais de microdureté-----	53
III.1.3 Assemblage de deux tôles usagées-----	54
a. Courbes chronopotentiométriques-----	54
b. Voltamétrie-----	55
b.1 Les courbes cathodiques -----	56
b.2 Les courbes anodiques -----	57

b.3 Courbes de Tafel-----	57
c. Spectroscopie d'impédance électrochimique -----	69
d. Observations microscopiques-----	61
e. Essais de microdureté-----	62
III.1.4 Assemblage mixte-----	63
a. Courbes chronopotentiométriques-----	63
b. Voltamétrie-----	64
b. 1 Les courbes cathodiques -----	65
b.2 Les courbes anodiques -----	66
b.3 Courbes de Tafel-----	66
c. Spectroscopie d'impédance électrochimique -----	68
d. Observations microscopiques-----	70
e. Essais de microdureté-----	71
<b>CONCLUSION -----</b>	<b>72</b>
<b>III.2 ÉVOLUTION DE LA CORROSION DANS UN MILIEU NA<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> A 3%-----</b>	<b>74</b>
III.2.1 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure de la tôle de livraison-----	74
III.2.2 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure de deux tôles saines -----	77
III.2.3 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure de deux tôles usagées -----	80
III.2.4 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure d'un Assemblage mixte-----	83
<b>CONCLUSION -----</b>	<b>83</b>
<b>III.3 COMPARAISON ELECTROCHIMIQUE ENTRE LES DIFFERENTS ASSEMBLAGES -----</b>	<b>86</b>
III.3.1 Comparaison électrochimique entre les cordons de soudures des différents assemblages-----	87
III.3.2 Comparaison électrochimique entre les zones affectées thermiquement des différents assemblages-----	88
<b>CONCLUSION -----</b>	<b>89</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES -----</b>	<b>90</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----</b>	<b>92</b>

## **Introduction**

Le milieu marin est un électrolyte très conducteur et riche en ions chlorure qui provoque un grand nombre de formes de corrosion touchant pratiquement tous les matériaux de construction.

La corrosion marine est souvent considérée comme étant un problème, actuellement, très répandu dans le monde touchant beaucoup les pays ayant une activité industrielle en mer.

L'importance économique de la lutte contre corrosion n'est plus à démontrer. Ce phénomène nuisible affecte de nombreuses structures, particulièrement les matériaux métalliques [1]. On estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par seconde [2]. Les enjeux économiques liés à la corrosion sont très importants, ce qui justifie les efforts intensifiés des chercheurs pour la compréhension des divers mécanismes complexes de cette dernière, la prévention et la lutte contre la détérioration des matériaux métalliques en milieu naturel.

La présente étude s'inscrit dans l'optique précitée, car ses objectifs sont la compréhension du mécanisme de la corrosion dans les diverses zones de soudage des tôles marines, la détermination de la zone la plus sensible à la corrosion et la détermination de la soudure qui résiste mieux à la corrosion.

## **Plan du mémoire**

Le présent mémoire comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique de la corrosion des matériaux, du soudage, de la zone affectée thermiquement et de l'influence des gaz et des ségrégations sur la résistance à la corrosion de cette dernière.

La présentation du matériau étudié, la préparation des échantillons et les techniques expérimentales utilisées pour les caractérisations électrochimique et métallurgique sont exposées dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation des différents résultats ainsi que leurs interprétations.

Enfin nous terminons par une conclusion générale qui résume l'ensemble de cette étude.

# Chapitre I

## Étude bibliographique

Dans ce chapitre nous présentons une étude bibliographique de la corrosion, sous ses diverses formes, ses mécanismes et les divers facteurs qui ont une influence sur la corrosion des structures métalliques dans le milieu marin. Nous présentons aussi le soudage, les différentes zones d'un assemblage soudé, la zone affectée thermiquement et sa détermination, l'influence des paramètres de soudage, la structure de la zone affectée thermiquement, l'initiation de la corrosion dans un assemblage soudé et l'influence des ségrégations et des gaz sur les propriétés mécaniques, et la résistance à la corrosion des soudures.

### I.1 La corrosion

#### I.1.1 Définition

La corrosion peut être définie comme une dégradation physique du matériau et de ses propriétés chimiques sous l'influence des paramètres divers de son environnement [1], ou encore comme une réaction inter faciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement [2,3].

#### I.1.2 Les diverses formes de corrosion

L'eau de mer est un électrolyte très conducteur et riche en ions chlorure qui provoque un grand nombre de formes de corrosion touchant pratiquement tous les matériaux de construction [4].

Les diverses formes de corrosion touchant les matériaux métalliques en milieu marin, sont :

la corrosion uniforme,

la corrosion localisée,

la corrosion sous contraintes.

### **a. La corrosion uniforme**

La corrosion uniforme est une forme de corrosion dans laquelle la perte est pratiquement uniformément répartie sur l'ensemble de la surface exposée au milieu. Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques. Les concepteurs d'appareillages peuvent en tenir compte en prévoyant des surépaisseurs consommables par la corrosion. Ce type de corrosion est donc souvent peu dangereux même s'il peut être très coûteux [5].

### **b. La corrosion localisée**

La corrosion localisée survient sur une partie du métal à un taux bien supérieur au reste de la surface et elle peut avoir plusieurs formes [6,7], telle que: la corrosion par piqûres, la corrosion cavernueuse, la corrosion galvanique, la corrosion intergranulaire, la corrosion sélective et la corrosion bactérienne.

#### **b.1 La corrosion par piqûres**

La corrosion par piqûres se traduit par la formation, sur la surface du métal, de cavités aux formes irrégulières dont le diamètre et la profondeur varient suivant plusieurs paramètres propre au métal, au milieu et conditions de service [8]. Cette forme de corrosion nécessite la présence d'anions agressifs, notamment les ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  et  $\text{I}^-$ , et d'un oxydant [2].

#### **b.2 La corrosion cavernueuse**

La corrosion cavernueuse ou corrosion par crevasses est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autre endroits peu accessibles à l'oxygène [2].

### **b.3 La corrosion galvanique**

La corrosion galvanique apparaît lorsque deux métaux différents sont en contact, dans le milieu aqueux. La différence de potentiel qui existe entre eux initie l'attaque sur le métal le moins noble des deux [6]. Cette forme de corrosion est souvent liée à une mauvaise conception des installations. Par exemple, des erreurs de montage de la statue de la liberté ont occasionné l'accès d'eau à des dispositifs constitués d'alliages cuivreux et d'acier au carbone dont la corrosion s'est trouvée accélérée de façon importante par contact avec les alliages cuivreux [5]

### **b.4 La corrosion intergranulaire**

La corrosion intergranulaire est une dissolution préférentielle aux environs immédiats des joints de grains qui entraîne une décohésion totale des grains et une perte complète des propriétés mécaniques du matériau [5]. Des analyses spécifiques sur la zone affectée thermiquement (ZAT) ont montré que la corrosion intergranulaire est provoquée par la ségrégation des impuretés telles que le soufre et le phosphore aux frontières des grains [9-11] et la précipitation des carbures est très influencée par la présence de ces éléments mineurs dans l'acier [6,12].

Les cas de corrosion intergranulaire sont nombreux, on peut citer [6] :

- La corrosion intergranulaire de l'aluminium, en milieu alcalin ou acide, qui est due à la présence du fer en tant qu'impureté résiduelle aux joints de grains. Il forme probablement une très bonne cathode locale pour la formation de l'hydrogène.

- La corrosion intergranulaire des aciers inoxydables austénitiques qui est due à la précipitation des carbures de chrome aux joints de grains et cela produit l'appauvrissement en chrome protecteur des régions adjacentes qui deviennent donc anodiques par rapport au reste du matériau.

### **b.5 La corrosion sélective**

La corrosion sélective est une oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure poreuse [2]. Cette corrosion ne se produit que si la teneur en éléments préférentiellement soluble (qui s'oxyde) dépasse un certain seuil. Le cas le plus connu sous cette forme de corrosion est le cas de la dézincification des laitons [5].

## b.6 La corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne est due au développement des organismes vivants sur des surfaces métalliques modifiant ainsi localement les milieux et les rend très agressifs. La corrosion sous l'action de bactéries sulfatoréductrices qui transforme des sulfates généralement inoffensifs en sulfures agressifs est sans doute la plus connue de ces formes de corrosion. Elle est par exemple à l'origine de nombreux dégâts observés sur les palplanches des quais de plusieurs ports en mer du Nord. La corrosion bactérienne est également un problème très répandu dans l'industrie du pétrole car les hydrocarbures sont des milieux très favorables aux développements bactériens [5].

## c. La corrosion sous contrainte

Cette forme de corrosion est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique [13]. Ce type de corrosion, particulièrement dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures intergranulaire ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte. Cette dernière peut être d'origine résiduelle (cintrage, écrouissage, laminage à froid...), d'origine thermique (dilatation, variation de pression), ou inhérente à la fonction de l'installation (câbles de ponts suspendus, structures de soutènement...).

## I.1.2 Les mécanismes de la corrosion

Bien que les formes de corrosion soient diverses, les mécanismes de base de la corrosion d'un matériau métallique en milieu aqueux sont au départ de nature électrochimique. Ils résultent d'un ensemble de réactions se produisant à l'interface métal-solution mettant en jeu des électrons et des espèces chimiques. Les réactions électrochimiques simplifiées peuvent être décrites de la façon suivante :

- a) Réaction anodique de dissolution du métal **M**



- b) Réaction cathodique de réduction d'une espèce de l'électrolyte **O**

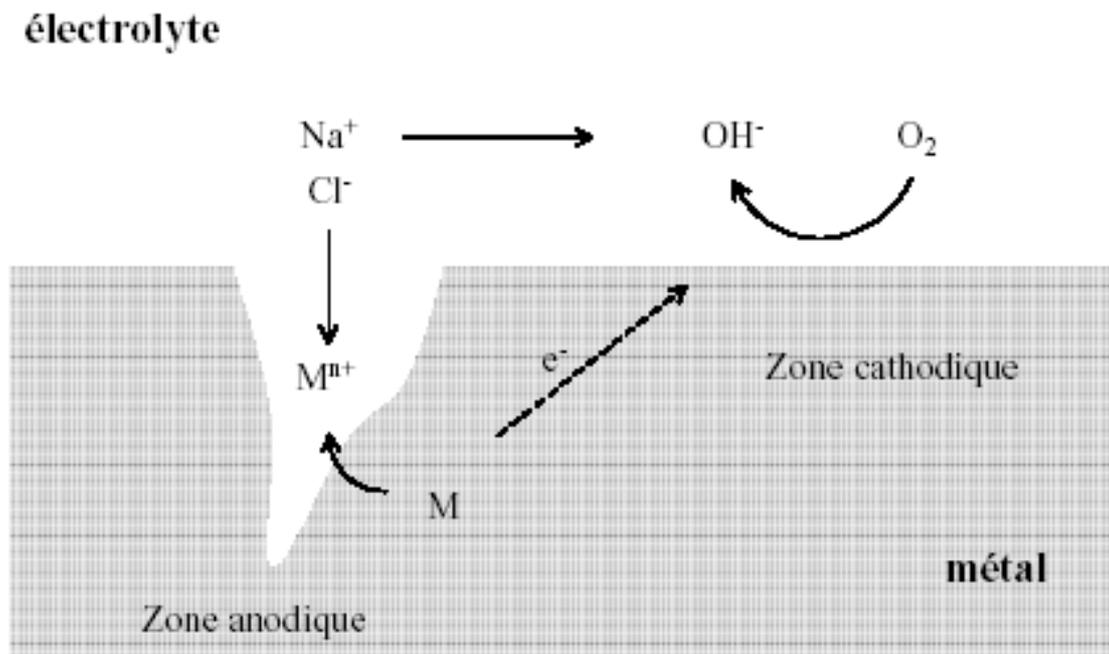


Avec :

O : Oxydant,

R : Réducteur.

L'espèce susceptible de se réduire doit être présente en quantité suffisamment importante dans le milieu. L'oxygène fait partie des éléments oxydant les plus abondants sur la planète et joue donc un rôle très important dans les mécanismes de corrosion des matériaux métalliques en eau de mer. La figure 1.1 représente de façon très simplifiée les différents processus anodiques et cathodiques se produisant à la surface d'un métal lors de la corrosion [1].



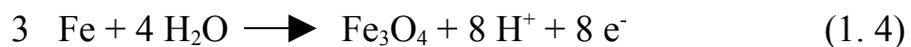
**Figure 1.1** : Représentation schématique d'un processus électrochimique de corrosion [1].

### I.1.3 Réactions électrochimiques et corrosion métallique

La corrosion des matériaux métalliques est en général due à des réactions anodiques provoquant une oxydation du métal. Par exemple :



qui correspond au passage de métal en solution, ou



qui correspond à la formation d'un film de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sur du fer dans l'eau à haute température.

Le maintien de la neutralité électrique implique que la corrosion ne se produit que si une réaction cathodique est possible. Les réactions les plus couramment rencontrées dans les phénomènes de corrosion sont la réduction de l'eau et celle de l'oxygène dissous dans le milieu :



Quand une corrosion spontanée affecte une surface métallique, les réactions anodiques et cathodiques se produisent simultanément sur la surface métallique et leurs cinétiques sont égales en sorte de maintenir la neutralité électrique dans le métal et dans la solution [5].

### I.1.4 Condition nécessaire pour qu'un métal se corrode

La condition nécessaire pour provoquer la corrosion d'un métal donné, est d'avoir un système accepteur (subissant une réduction), capable d'échanger des électrons avec le système donneur d'électrons (le métal) qui subit une oxydation anodique. Autrement dit, si la tension d'équilibre du premier système est supérieure à celle du second, la corrosion de ce dernier est thermodynamiquement possible.

Donc pour qu'un métal se corrode, il est nécessaire (en absence de courant extérieur) qu'il existe dans la solution, un constituant oxydant tel que le potentiel d'équilibre  $E_c$  de la réaction

cathodique soit plus élevé que le potentiel d'équilibre  $E_a$  de la réaction anodique de dissolution du métal. La condition de corrosion est donc :  $E_c > E_a$

### **I.1.5 Les paramètres qui influent sur la résistance à la corrosion dans un milieu aqueux**

Le milieu marin constitue un environnement particulièrement favorable à la détérioration des matériaux métalliques. L'agressivité de l'eau de mer découle notamment de ses propriétés physico-chimiques : conductivité élevée due à une salinité importante, forte teneur en ions chlorure, oxygène dissous etc.... Celle-ci se trouve également renforcée par l'action des organismes vivants (bactéries, micro algues etc...) contenus dans le milieu [1].

Dans son article, David A. Shifler [14], a rassemblé les différents facteurs qui influent sur la résistance à la corrosion des matériaux métalliques, et les différentes méthodes de lutte contre cette corrosion. L'oxygène, le pH et la température jouent un rôle très important sur la résistance à la corrosion des matériaux métalliques dans le milieu marin. Le taux de corrosion augmente avec l'augmentation de la température du milieu. La solubilité de l'oxygène, dans l'eau, décroît avec l'augmentation de la température.

L'influence de l'oxygène dissout sur la corrosion dépend du métal ou de l'alliage. Une forte concentration d'oxygène favorise la formation du film passif des aciers inoxydables et de l'aluminium car, il retarde l'initiation de la corrosion aux défauts de surface et la pénétration du film d'oxyde protecteur. Dans le milieu marin complètement aéré, le film passif déposé sur la surface peut engendrer une concentration de cellules d'oxygène, lesquelles peuvent causer, dans des sites localisés, la corrosion par piqûres ou la corrosion crevasse. Une fois que la piqûration est initiée, le taux de propagation croît avec l'augmentation de l'oxygène dissout. Pour les aciers courants et les alliages de cuivre, l'effet de l'oxygène dépend de la vitesse de l'écoulement de l'eau. Pour les métaux tels que le fer et l'acier, à une température constante, le taux de corrosion augmente linéairement avec l'augmentation de la concentration de l'oxygène [14-16]. Pour la plupart des métaux et des alliages, la variation de pH n'a pas d'effet sur la corrosion sauf pour l'aluminium.

### I.1.4 Diagramme de Pourbaix

C'est la représentation isotherme de la tension d'un métal donné en fonction du pH d'une solution près de la surface. Ces diagrammes représentent l'ensemble du comportement électrochimique des métaux en contact avec l'eau, en précisant dans quelles conditions une réaction est thermodynamiquement possible, mais sans toutefois donner d'informations sur la vitesse du processus.

Les diagrammes de Pourbaix permettent de déterminer les espèces stables, leur solubilité et le sens des réactions possibles. Mais sauf si un métal est dans son domaine d'immunité, ils ne permettent de tirer aucune conclusion directe sur les phénomènes de corrosion, notamment sur des aspects cinétiques. Ces diagrammes constituent néanmoins un outil indispensable à l'étude des problèmes de corrosion. Depuis une quinzaine d'années, un effort important a notamment été fait pour établir des diagrammes de Pourbaix des métaux pour des températures élevées (100 à 300 °C), notamment pour l'étude des problèmes de corrosion dans les réacteurs nucléaires à eau [5]. La figure 1.2 représente le diagramme de Pourbaix du fer à 25 °C.

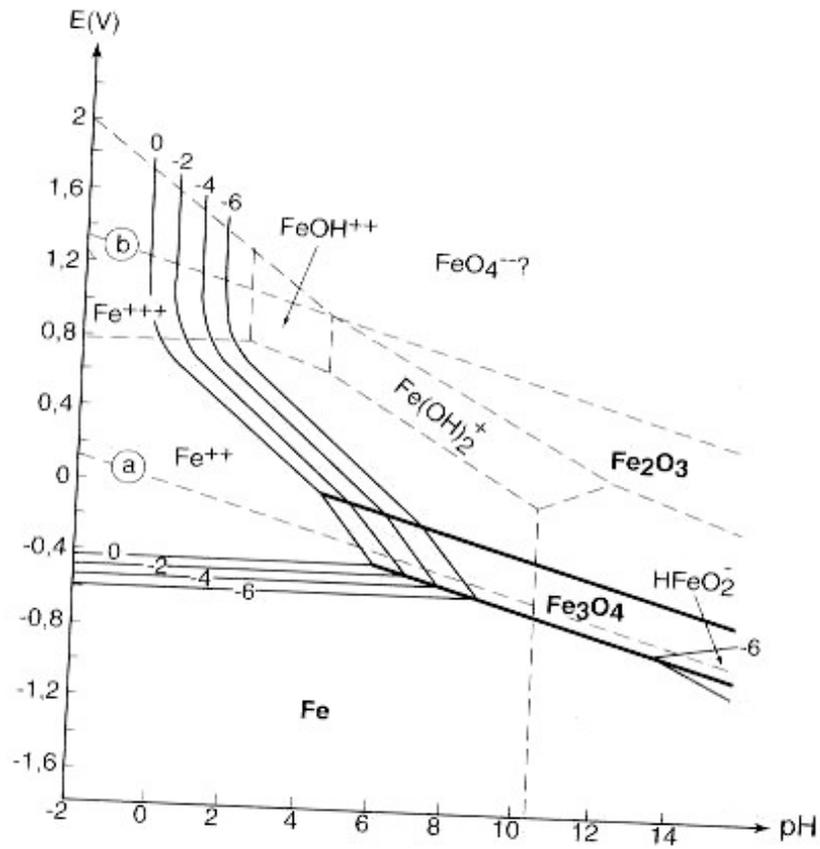


Figure 1.2 : Diagramme de Pourbaix du Fer à 25°C [5]

## I.2 Le soudage

En milieu marin, les coques des navires sont souvent les plus touchées par la corrosion. Ces dernières sont formées à partir de tôles reliées entre elles par soudage.

### I.2.1 Définition

Le soudage est une opération qui consiste à relier entre deux ou plusieurs éléments d'un assemblage. Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide, à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage [17, 18].

### I.2.2 La zone affectée thermiquement

Les joints soudés d'un assemblage sont caractérisés par trois zones distinctes, la zone de soudure (**ZS**), la zone affectée thermiquement (**ZAT**) et le métal de base (**MB**).

#### a. Définition de la zone affectée thermiquement

La zone affectée thermiquement est une zone adjacente de la zone fondue (zone de soudure), sa microstructure, ses propriétés mécaniques et sa composition chimique sont différentes de celles du métal de base. Cette différence est due à l'effet thermique causé par le soudage.

#### b. Détermination de la zone affectée thermiquement

Les méthodes utilisées pour déterminer cette zone (**ZAT**), sont, les mesures de microdureté et les observations microscopiques [19-21].

C. A. Huang *et al* [19], ont étudié les différentes zones affectées thermiquement des tôles en acier Inconel 718 soudées avant et après traitements thermiques. Pour leur étude, ces auteurs ont utilisé trois méthodes.

La première méthode, est le balayage de microdureté. Avec cette méthode, seule la zone affectée thermiquement des tôles qui ont été chauffées à 950°C pendant une heure puis trempées à l'eau, avant soudage, a pu être déterminée.

La deuxième méthode, est celle des observations microscopiques. A l'aide d'un microscope optique, aucune zone affectée thermiquement n'a pu être déterminée. Avec un microscope électronique à balayage, la zone affectée thermiquement a été observée pour les échantillons qui ont subi des traitements thermiques avant soudage, mais pour les tôles qui n'ont pas subi de traitements thermiques cette zone n'a pas été observée.

La dernière méthode, est la méthode de polarisation anodique à deux volts dans une solution de NaCl à 3.5% pendant 120 secondes. Ce n'est qu'après cette polarisation que ces auteurs ont réussi à observer les différentes zones affectées thermiquement à l'aide d'un microscope optique.

### **c. Structure de la zone affectée thermiquement**

La structure de la zone affectée thermiquement est différente de celle du métal de base. Cette différence est due à l'effet thermique causé par le soudage. J. Nowaki et A. Lukojé [22] ont étudié la structure et les propriétés de zone affectée thermiquement des aciers duplex à joints soudés. La microstructure de cette dernière se compose de ferrite primaire  $\alpha$ , austénite primaire  $\gamma$  et, d'austénite secondaire  $\gamma_2$  formée comme produit de post de soudage. La nucléation et croissance de  $\gamma_2$  peut se produire dans les frontières des grains de la phase  $\alpha$ - $\gamma$ , ou à l'intérieur des grains de ferrite [22,23]. Sa présence dans les aciers duplex, (en respectant la composition chimique, la distribution, l'emplacement et la morphologie des phases) cause une perte d'équilibre chimique entre la ferrite et l'austénite et cause aussi un déclin local de la résistance à la corrosion, particulièrement la corrosion par piqûres, de l'alliage [22,24-28].

### **d. Initiation de la corrosion**

La zone affectée thermiquement est la zone la plus sensible à la corrosion, dans un assemblage par soudage, elle fait l'objet de plusieurs études lesquelles ont montré que la corrosion s'initie dans cette dernière. Y. Cui et Carl D. Lundin [29] ont pu évaluer l'emplacement initial de la corrosion dans les aciers inoxydables austénitiques E316L soudés. Comme lors du soudage, les multiples cycles thermiques peuvent causer la production des ségrégations dans le chauvauchement de la zone affectée thermiquement, et le problème de

corrosion des aciers inoxydables austénitiques est généralement lié aux ségrégations chimiques et aux différences galvaniques, la corrosion s'initie préférentiellement dans le chauvauchement des multipasses de soudage.

### **I.2.3 Influence des paramètres de soudage sur la résistance à la corrosion**

B. T. Lu *et al* [30] déduisent que, le taux de chaleur élevée et le faible taux de refroidissement sont deux paramètres importants qui induisent la dégradation de la résistance à la corrosion par piqûres et la résistance à la corrosion sous contraintes des aciers austénitiques inoxydables lors du soudage. Ces deux paramètres induisent probablement la ségrégation des éléments d'alliage et la formation des zones réduites de chrome qui aboutissent à la dégradation de la résistance à la corrosion localisée.

### **I.2.4 Effet des gaz**

Le métal en fusion fixe une quantité plus ou moins importante des gaz de l'atmosphère ou des produits de décomposition de l'enrobage ou du flux solide (humidité du flux, eau de cristallisation de certains produits chimiques). La solubilité de ces derniers décroît nettement à mesure que l'on s'approche de la température ambiante, ce qui produit dans le réseau métallique une sursaturation gazeuse qui peut être préjudiciable aux joints soudés (compacité du métal, étanchéité de certaines soudures). Le phénomène de diffusion permet aux gaz d'évacuer la zone fondue, soit directement vers l'extérieur, soit vers le métal de base (zone de liaison), à condition que la zone fondue soit moins trempante (transformation structurale moins rapide).

Parmi les gaz que le métal fixe à l'état de fusion, on peut citer : l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. A l'état dissous, l'oxygène exerce une action défavorable sur les caractéristiques mécaniques du matériau (la résistance à la rupture et la résilience diminuent). L'hydrogène est à l'origine de certaines microfissures dans la zone affectée thermiquement ou des soufflures dans la zone fondue. Quand à l'azote, il donne des nitrures de fer qui agissent surtout sur la résilience et l'aptitude du métal au vieillissement [18].

Horn- Yih Liou *et al* [31], ont étudié l'effet de la variation de l'azote et du taux de refroidissement sur la microstructure et la résistance à la corrosion sous contrainte de la zone affectée thermiquement de l'acier duplex inoxydable (DSS<sub>s</sub>). Ils sont arrivés à la conclusion suivante : la résistance à la corrosion sous contrainte augmente avec, l'augmentation de

l'azote et la diminution du taux de refroidissement. Ils ont mentionné par ailleurs [31-34], que le nitrogène est l'un des plus importants éléments qui améliorent la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques de la zone affectée thermiquement. Il peut retarder la précipitation des composés intermétalliques par l'augmentation de la  $\delta$ - ferrite, à la température  $A_4$  (1400°C), et aide la reformation de la phase d'austénite dans la zone affectée thermiquement. D'autre part [31,35], il est mentionné que les précipités de  $Cr_2N$  agissent comme sites préférentiels de nucléation pour la corrosion par piqûres.

Hornng- Yih Liou *et al* [36], ont aussi évalué l'effet du nitrogène et du taux de refroidissement sur la microstructure et la résistance à la corrosion par piqûres de la zone affectée thermiquement de l'acier duplex inoxydable 2205. Ils ont remarqué que :

- la taille des grains de la phase  $\alpha$  et le taux des précipités  $Cr_2N$ , dans la zone affectée thermiquement, diminue avec l'accroissement de la phase austénitique,
- la précipitation de  $Cr_2N$  est plus importante avec la réduction de nitrogène,
- la corrosion par piqûres n'a pas eu lieu dans la région où la précipitation de  $Cr_2N$  est basse.

Ils ont déduit que la présence de  $Cr_2N$ , dans la zone affectée thermiquement, est la cause principale de la détérioration de la résistance à la corrosion par piqûres. Par ailleurs, il est mentionné que, la corrosion par piqûres peut être induite par la précipitation de  $Cr_2N$  dans la ferrite [36-40].

## **Chapitre II**

### **Matériau et techniques expérimentales**

Ce chapitre est partagé en trois parties. La première partie est consacrée à la définition du matériau sur lequel est basée notre étude et aux différentes étapes de la préparation des échantillons utilisés dans nos expériences. La deuxième partie, est la partie électrochimique où sont exposées les conditions expérimentales et les différentes techniques électrochimiques que nous avons utilisées, telles que :

- la chronopotentiométrie à courant nul (circuit ouvert), pour la détermination du potentiel d'équilibre des différents échantillons à l'état stationnaire,
- la voltamétrie linéaire, pour la détermination du potentiel de corrosion du courant de corrosion et de la résistance à la polarisation des différentes zones,
- la spectroscopie d'impédance électrochimique, pour rendre compte de l'ensemble des processus intervenant à la interface métal - électrolyte.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les techniques des observations métallographiques et des essais de microdureté.

## II.1 Le matériau

Le matériau sur lequel est basée notre étude est une tôle marine d'acier de nuance **A33**. Cet acier fourni par l'Entreprise National de Réparation Naval (Unité de Bejaia), est livré sous forme de tôle de 6mm d'épaisseur.

### II.1.1 la composition chimique

L'analyse chimique de l'acier A33 a été réalisée par la spectrométrie de fluorescence x [41]. Les résultats de cette dernière sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2.1** : Composition chimique de l'acier A33.

Nuance	Composition chimique	
Acier A33	Fe	99,3154
	Cr	0,0046
	Ni	0,0058
	Mn	0,2538
	Si	0,1125
	Cu	0,0164
	Co	0,0085
	V	0,0075
	S	0,0123
	P	0,0148
	Ti	0,0021
	Al	0,0163
	Mo	0,0011
	C	0,1080

## II.2 Préparation des échantillons

Les échantillons que nous avons utilisés dans cette étude, sont des disques que nous avons réalisés à partir des différentes zones des tôles soudées. La surface latérale de chaque disque, est enrobée avec de l'araldite et insérée avec force dans un tube en téflon, de telle sorte que seule la surface circulaire est exposée au milieu d'étude.

Les différentes étapes de la réalisation des échantillons, sont :

- le soudage des tôles,
- la détermination des différentes zones affectées thermiquement,
- la réalisation des disques à partir des différentes zones,
- la fabrication des embouts de l'électrode tournante.

### II.2.1 Le Soudage des tôles

Le procédé de soudage que nous avons utilisé est le soudage à l'arc électrique et les différents assemblages que nous avons réalisés, sont :

- l'assemblage de deux tôles saines,
- l'assemblage de deux tôles usagées,
- l'assemblage mixte (tôle saines + tôle usagée).

Dans nos études électrochimique et métallurgique, nous avons pris comme référence, une tôle marine soudée extraite de la partie immergée d'un bateau.

### II.2.2 Détermination des différentes zones affectées thermiquement

La méthode que nous avons choisie pour la détermination des différentes zones affectées thermiquement, est la méthode des observations microscopiques après polarisation anodique des assemblages, à 2V pendant 20 secondes dans une solution de NaCl à 3,5% [19]. Les largeurs maximales des différentes zones affectées thermiquement sont mentionnées dans le tableau 2.2.

**Tableau 2.2** : Les largeurs maximales des différentes zones affectées thermiquement.

Zone	ZATL	ZATS	ZATU	ZAUSU	ZAUSS
<b>Largeur maximale (mm)</b>	6	6	6	4,5	5,5

Avec :

ZATL : zone affectée thermiquement de la tôle de livraison (d'un bateau).

ZATA : zone affectée thermiquement d'un assemblage de deux tôles saines.

ZATU : zone affectée thermiquement d'un assemblage de deux tôles usagées.

ZAUSU : zone affectée thermiquement d'un assemblage mixte (coté usagé).

ZAUSS : zone affectée thermiquement d'un assemblage mixte (coté sain).

### II.2.3 Réalisation des disques

Après détermination des zones affectées thermiquement, nous avons réalisé un prélèvement d'échantillons sous forme carrée, de chaque zone, à l'aide d'une micro tronçonneuse. Puis nous avons transformé les carrés en disques, à l'aide d'une meule sous arrosage. Les diamètres des différents disques sont mentionnés dans le tableau 2.3 ci-dessous :

**Tableau 2.3** : Diamètres des différents disques.

<b>Disque</b>	<b>Diamètre (mm)</b>
<b>MBTL</b>	10
<b>MBTS</b>	10
<b>MBTU</b>	10
<b>CSTL</b>	10
<b>CSTS</b>	10
<b>CSTU</b>	10
<b>CSTSTU</b>	10
<b>ZATL</b>	6
<b>ZATS</b>	6
<b>ZATU</b>	6
<b>ZAUSU</b>	4,5
<b>ZAUSS</b>	5,5

Avec :

MBTL : Métal de base de la tôle de livraison (du bateau).

MBTS : Métal de base de la tôle saine.

MBTU : Métal de base de la tôle usagée.

CSTL : Cordon de soudure de la tôle de livraison.

CSTS : Cordon de soudure de l'assemblage des deux tôles saines.

CSTU: Cordon de soudure de l'assemblage des deux tôles usagées.

CSTSTU : Cordon de soudure de l'assemblage mixte.

#### **II.2.4 Réalisation des embouts de l'électrode tournante**

Les embouts que nous avons réalisés se comportent trois parties (Voir figure 2.1) :

- un tube fileté, en téflon, sur lequel est inséré le disque,
- une vis fileté et taraudée,
- une tige en acier A33.



**Figure 2.1** : Les différents constituants de l'embout

## II.3 Conditions et techniques électrochimiques

### II.3.1 Conditions électrochimiques

#### a. L'électrolyte

Nous avons utilisé comme milieu corrosif une solution de chlorure de sodium (NaCl) à 3%. Cette composition a été maintenue constante durant toutes les expériences.

#### b. Les électrodes

La cellule électrochimique que nous avons utilisé est composée de trois électrodes, à savoir : l'électrode de travail, l'électrode de référence et la contre électrode.

##### b.1 L'électrode de travail

Les électrodes de travail que nous avons utilisé, sont des embouts que nous avons fabriqués et qui contiennent notre matériau sous forme de disque. Ces derniers sont montés, un pour chaque expérience, sur une électrode tournante.

##### b.2 L'électrode de référence

Nous avons utilisé une électrode au calomel saturé en KCl (ECS). Tous les potentiels ont été référencés par rapport à cette électrode (ECS) dont le potentiel par rapport à l'électrode à hydrogène (ENH) à 25°C est de +0,244 mV.

##### b.3 La contre électrode

La contre électrode que nous avons utilisé était un fil en platine tissé sous forme de grille.

### II.3.2 Méthodes électrochimiques

L'intérêt des méthodes électrochimiques tient au fait qu'il est possible en quelques heures de réaliser des essais dont les principes sont basés sur la mesure des courants  $i$  en fonction de la variation de la tension appliquée à l'échantillon [8,42].

Les différentes méthodes électrochimiques que nous avons utilisées sont la chronopotentiométrie, la voltamétrie et la spectroscopie d'impédance électrochimique.

Toutes les mesures qui ont été effectuées dans ce travail, ont été faites à l'aide d'une électrode tournante.

### II.3.2.1 Chronopotentiométrie

#### a. Tension d'abandon

La tension d'abandon ou tension sous courant nul d'une électrode, noté  $E_{I=0}$ , est la tension de l'électrode lorsque aucun courant ne la traverse. Lorsqu'un équilibre électrochimique est réalisé à l'interface électrode/électrolyte entre deux espèces d'un couple redox, la tension d'abandon de l'électrode est égale au potentiel thermodynamique d'oxydoréduction du couple et elle obéit à la loi de Nernst [43].

#### b. Principe du Suivi du potentiel d'abandon

Cette technique permet de suivre l'évolution du potentiel de l'électrode de travail en fonction du temps [44, 45]. L'échantillon est immergé dans l'électrolyte et le potentiel libre de l'électrode de travail est mesuré en fonction du temps pendant l'immersion. Son évolution donne des informations sur les phénomènes qui se déroulent à l'interface métal/solution, ce qui permet d'évaluer la stationnarité du système.

Le temps d'immersion des électrodes dans l'électrolyte est fixé à 5 heures, temps très suffisant pour atteindre l'état stationnaire à l'équilibre.

Le but du suivi du potentiel d'abandon est la détermination du potentiel d'équilibre. Ce dernier est nécessaire pour fixer le domaine de balayage lors du tracé des courbes de polarisation.

### II.3.2.2 La voltamétrie

La voltamétrie est une méthode potentiodynamique. La technique consiste à appliquer à l'électrode de travail un potentiel ( $E$ ) variant linéairement avec le temps définissant la vitesse de balayage. La réponse en courant induit permet de tracer les courbes de polarisation  $i = f(E)$  ou  $\log [abs(i)] = f(E)$  caractéristiques des phénomènes électrochimiques qui s'effectuent à la surface de l'électrode.

Le tracé des courbes de polarisation renseigne sur la cinétique de l'étape la plus lente du processus global de corrosion qui se compose de différentes réactions élémentaires

(transfert de charge, transfert de matière, adsorption des espèces sur l'électrode etc...). Etant donnée que la vitesse de la réaction globale est déterminée par celle de l'étape la plus lente, le tracé des courbes de polarisation peut être exploité pour mesurer la vitesse de corrosion.

Trois types de courbes de polarisation sont observés en fonction de la cinétique de la réaction :

- Cinétique d'activation (ou transfert de charge) : dans ce cas on obtient une réaction linéaire entre le potentiel et le logarithme du courant mesuré  $E = b \log(I) + a$  (loi de Tafel). L'extrapolation de la droite de Tafel au potentiel de corrosion fournit le courant de corrosion (Fig 2.1.a). La densité de courant de corrosion n'est pas affectée par la rotation de l'électrode de travail.
- Cinétique de diffusion (ou transfert de matière) : les courbes de polarisation font apparaître un palier de diffusion auquel correspond un courant limite  $I_L$ . La vitesse de corrosion est égale à la densité du courant limite de diffusion. Dans ce cas la vitesse de corrosion est affectée par l'agitation de la solution ou la rotation de l'électrode (Figure 2.2b).
- Cinétique mixte : Grâce à une corrélation de diffusion à l'aide de la formule

$$1/I = 1/I^* + 1/I_L \quad (2.1)$$

où  $I$  est le courant mesuré, correspondant au processus mixte,  $I^*$  le courant corrigé de la d'activation et  $I_L$  le courant du palier de diffusion, on obtient une relation linéaire de type Tafel et  $I_{\text{corr}}$  est obtenu par extrapolation au potentiel de corrosion, comme dans le cas d'une cinétique d'activation pure (Figure 2. 2. c) [46].

## b. Choix de la vitesse de balayage

Des essais préliminaires nous ont permis de choisir une vitesse de balayage des potentiels de 0,5 mV/s, car cette dernière est suffisamment faible pour assurer des conditions stationnaires à l'interface métal / solution.

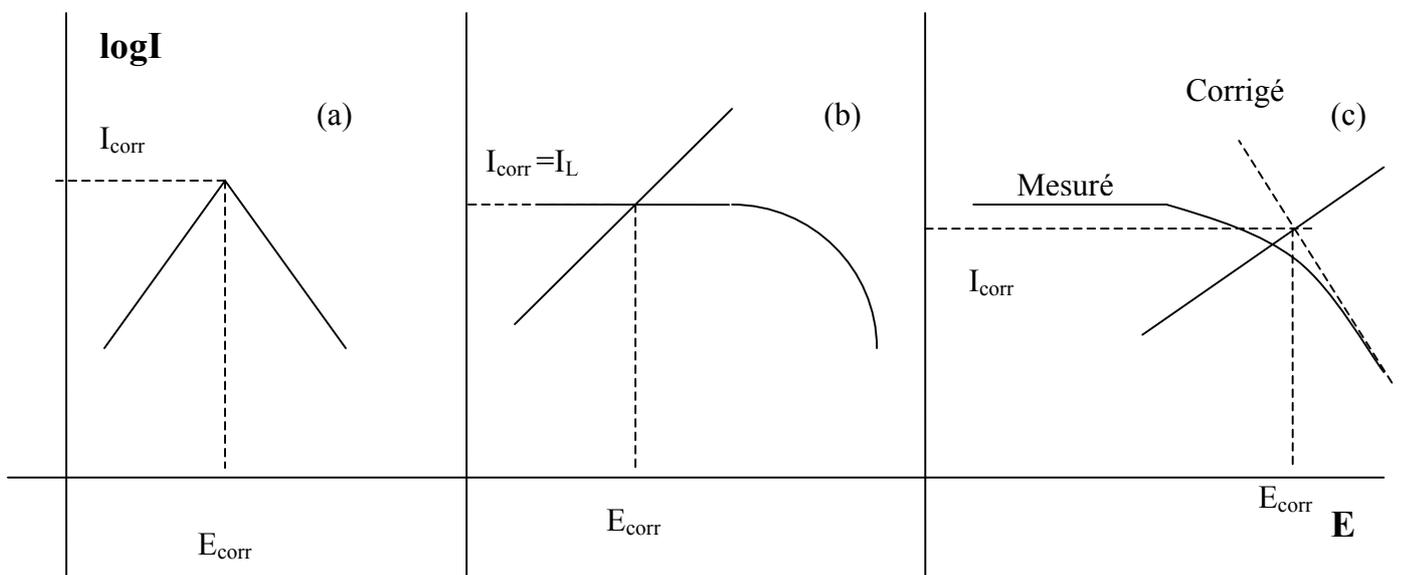
## c. Courbes de polarisation

Le tracé des courbes intensité-potentiel ( $i$ - $E$ ) s'effectue en deux étapes :

-Balayage du potentiel d'équilibre jusqu'à un potentiel cathodique de valeur limite  $E_c = -1200 \text{ mV}$ ,

-Balayage du potentiel d'équilibre jusqu'à un potentiel anodique de valeur limite  $E_a = 200 \text{ mV}$ .

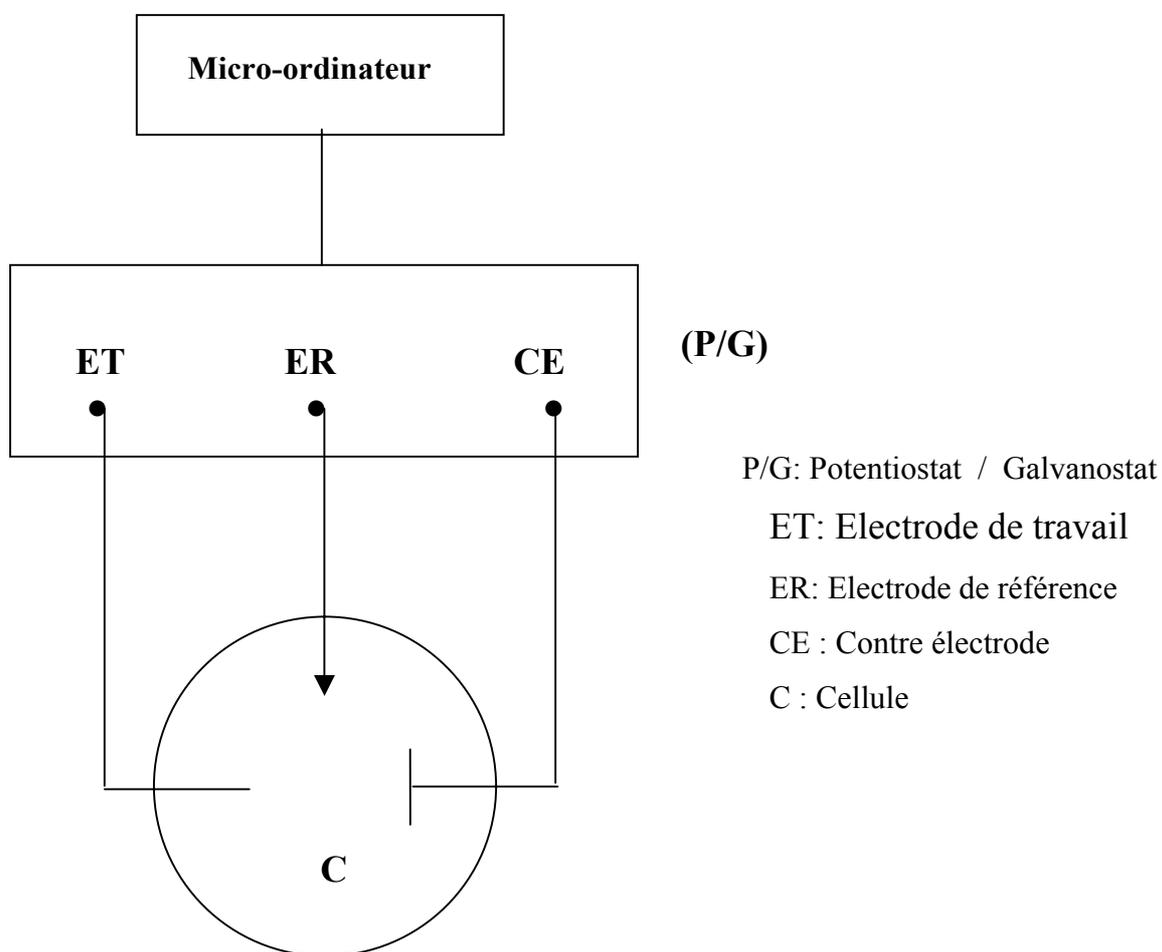
Dans notre étude, l'intérêt des essais de voltamétrie est la détermination du courant de corrosion et du potentiel de corrosion. Avant chaque balayage, l'électrode de travail subit un polissage puis une immersion de 5 heures dans l'électrolyte. Le polissage des électrodes se fait avec des abrasifs de granulométrie de plus en plus fines (400, 600, 800, 1200, 2000 et 2500).



**Figure 2.2** : Représentation schématique des courbes intensité-potentiel caractéristique d'une cinétique : d'activation (a), sous control diffusionnel (b) et sous control mixte (c) [46].

### e. Montage expérimental utilisé pour les essais de chronopotentiométrie et de voltamétrie

Le montage expérimental utilisé pour le tracé des courbes chronopotentiométriques à circuit ouvert et les courbes de polarisation est représenté sur la figure 2.3. Les électrodes de travail, de référence et auxiliaire sont reliées au potentiostat / galvanostat (P/G) de type PGP201 de marque Tacussel. Ce dernier est piloté par un micro-ordinateur muni d'un logiciel d'application « Volta Master ». Ce logiciel contrôle l'ensemble des fonctions du PGP201 et permet de traiter les résultats obtenus.



**Figure 2.3 :** Montage expérimental utilisé pour le tracé des courbes chronopotentiométriques à circuit ouvert et les courbes de polarisation.

### II.3.2.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique

La méthode d'impédance consiste à imposer une perturbation sinusoïdale en potentiel à l'électrode de travail et à mesurer la réponse en courant de l'électrode également sinusoïdale [47, 48]. Le signal perturbateur est de la forme suivante :

$$\Delta E = |\Delta E| \sin(\omega t) \quad (2. 2)$$

Le signal doit être de faible amplitude afin de conserver la linéarité du système électrochimique. Le courant induit est ainsi de forme sinusoïdale déphasé d'un angle  $\varphi$  par rapport au potentiel :

$$\Delta I = |\Delta I| \sin(\omega t - \varphi) \quad (2. 3)$$

L'impédance  $Z$  est définie par l'équation suivante :

$$Z = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{|\Delta E| \exp(j\omega t)}{|\Delta I| \exp(j(\omega t - \varphi))} = |Z| \exp(j\varphi) \quad (2. 4)$$

$|Z|$  : étant le module et  $\varphi$  le déphasage. L'impédance peut être représentée dans l'espace des nombres complexes comme la somme d'une partie réelle et imaginaire

$$|Z| = \text{Re}(Z) + j \text{Im}(Z) \quad (2. 5)$$

Son module s'écrit alors :

$$|Z| = (\text{Re}(Z)^2 + \text{Im}(Z)^2)^{-1/2} \quad (2. 6)$$

Et son angle de déphasage :

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} \right] \quad (2. 7)$$

Deux types de diagrammes peuvent être tracés :

- les diagrammes de Bode

$$|Z| = f(\text{fréquence}) \text{ et } \varphi = f(\text{fréquence}) \quad (2.8)$$

- le diagramme de Nyquist

$$\text{Im}(Z) = f(\text{Re}(Z)) \quad (2.9)$$

Cette dernière représentation sera celle choisie dans ce travail.

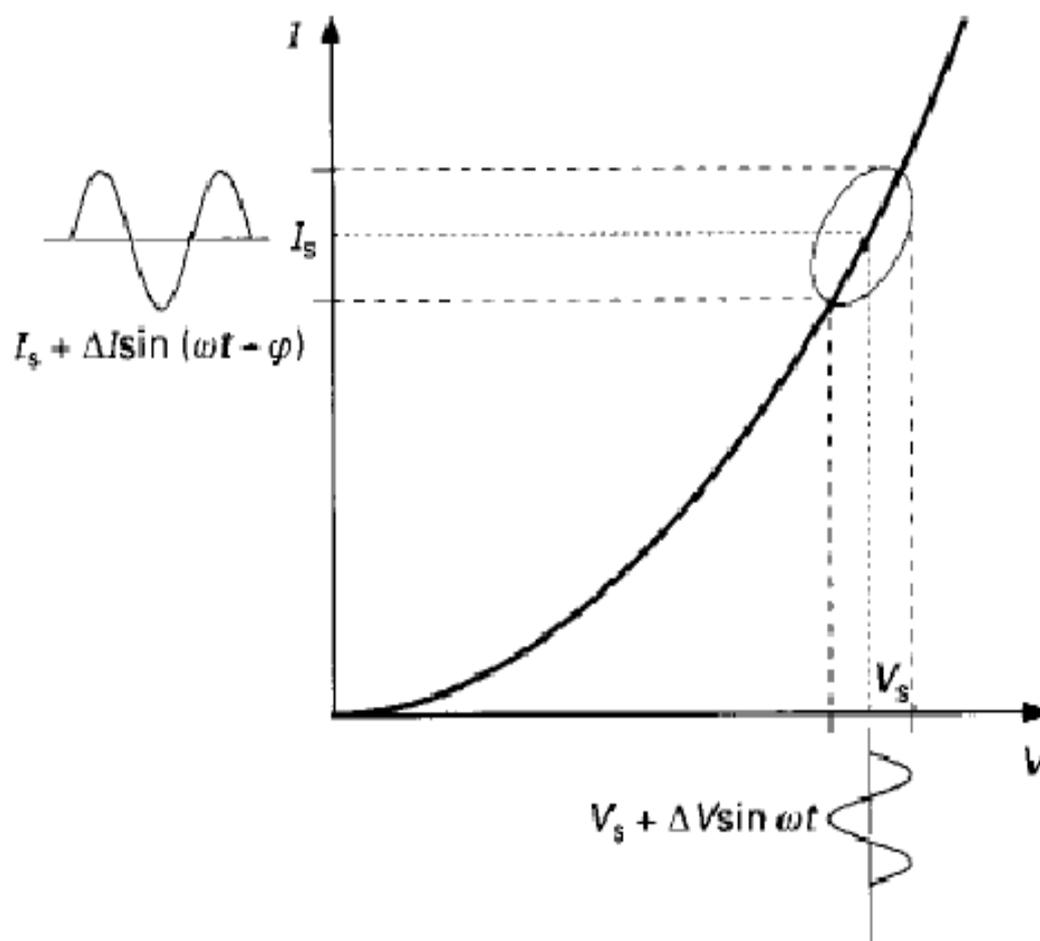
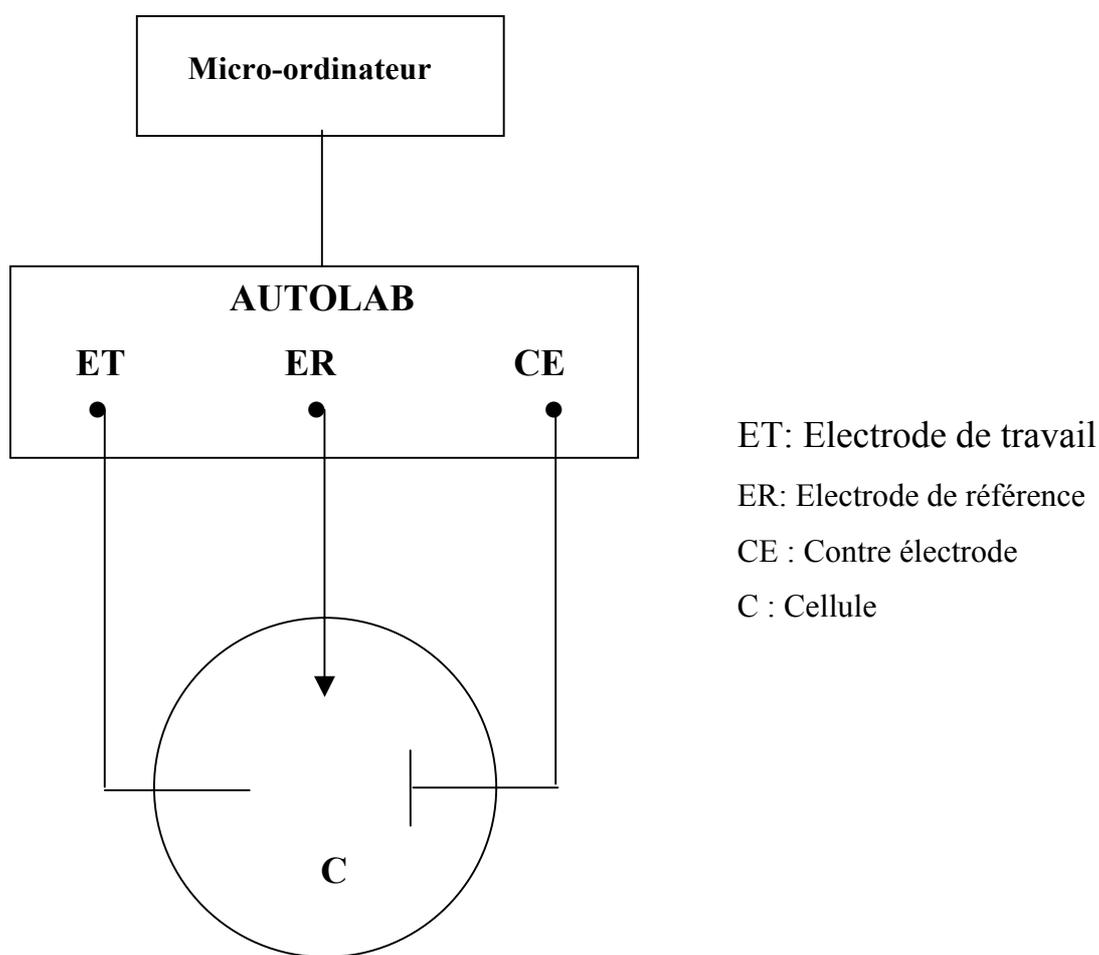


Figure 2.4 : Perturbation du système électrochimique [47].

### a. Montage expérimental utilisé pour les mesures d'impédance électrochimiques

Le montage électrique utilisé pour les mesures d'impédance électrochimiques est représenté sur la figure 2.5. La cellule électrochimique est reliée à un appareil de mesure de marque AUTOLAB intégrant un potentiostat / galvanostat. Cet appareil qui est relié à un micro-ordinateur, est piloté par un logiciel FRA.



**Figure 2.5 :** Montage expérimental utilisé pour le tracé des courbes d'impédance électrochimiques.

## II.4 Observations microscopiques et essais de microdureté

### II.4.1 Observation microscopique

Avant chaque observation microscopique les échantillons subissent un polissage mécanique puis une attaque chimique.

#### a. Polissage mécanique

Le polissage consiste à rendre la surface de l'échantillon plane, brillante et sans rayures. Dans le but de réaliser un bon polissage, on a procédé d'abord, par un pré polissage des surfaces à examiner, qu'on a réalisé avec un touret sous eau et des abrasifs de plus en plus fin de granulométrie 180,400, 600, 800, 1200,2000 et 2500, puis par une finition réalisée à l'aide d'une pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur un disque de feutre.

#### b. Attaque chimique

L'attaque chimique révèle les joints des cristaux et donne des différences de coloration entre les différents constituants ce qui permet de les observer. Pour cela nous avons utilisé l'effet des réactifs qui vont donner une coloration aux surfaces polies. Pour avoir une bonne microstructure, nous avons choisi le nital. La composition chimique de ce dernier et la durée de l'attaque chimique sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.4 :** Composition du nital et durée de l'attaque chimique.

Nuance	Réactif	Durée
A33	Nital : -5ml d'acidenitrique $\text{HNO}_3$ . -95ml d'alcool éthylique $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ .	3à5 secondes.

### c. Microscopie optique

La microscopie optique est une méthode physique d'observation des métaux, qui consiste à examiner par réflexion au microscope une surface polie et généralement attaquée [49]. Elle a pour but principal, la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques. Nos examens de microscopie optique ont été réalisés à l'aide d'un microscope optique et une caméra CCD dont l'ensemble est relié à un ordinateur. Le but des observations microscopiques, est la détermination des structures des différents échantillons et le suivi de l'évolution de la corrosion en fonction du temps.

## II.4.2 Microdureté

La microdureté est une mesure de la résistance opposée par la surface d'un matériau à la pénétration d'un indenteur plus dur, sous faible charge (de 0.01N à 10N). Le teste de microdureté permet de mesurer la dureté des différentes phases d'une microstructure, d'établir le profil de dureté de la couche déformée sous la surface usée et, dans les revêtements, de contrôler la qualité des traitements de surface et des revêtements [50].

### a. Dispositif expérimental

Les essais de microdureté ont été réalisés sous une charge de 200g au moyen d'un microduromètre de marque Zwick (**ZHV10**) (Figure 2.6) équipé d'une camera CCD. L'ensemble est relié à un ordinateur permettant le traitement de données et des observations de microstructures.



**Figure 2.6 :** Microduromètre ZHV10

## **Chapitre III**

### **Résultats et discussions**

#### **Introduction**

Ce chapitre est partagé en trois parties. Le but de la première partie est de déterminer la zone la plus sensible à la corrosion et de comprendre les processus ayant lieu à l'interface métal/ électrolyte. Le deuxième volet de ce chapitre a pour objectif de déterminer les différentes formes de corrosion qui puissent exister sur les différentes zones qui constituent les soudures des assemblages. Dans la dernière partie, une comparaison entre les assemblages soudés a été réalisée.

Les assemblages soudés sont composés de trois zones ; métal de base, cordon de soudure et zone affectée thermiquement. Pour déterminer la zone la plus sensible à la corrosion, des méthodes électrochimiques stationnaires, des observations microscopiques et des essais de microdureté ont été utilisés. Et afin d'avoir une idée claire sur les processus ayant lieu à l'interface métal – électrolyte, la méthode d'impédance électrochimique a été mise en œuvre.

Le suivi de l'évolution de la corrosion des différentes zones en fonction du temps a été réalisé à l'aide des observations microscopiques après polissage mécanique puis immersion des échantillons, pendant trois jours et dix jours, dans une solution de NaCl à 3%. Ceci dans le but de déterminer les différentes formes de corrosion qui puissent exister sur les zones qui constituent les assemblages soudés.

Enfin, pour déterminer la soudure qui résiste mieux à la corrosion, une comparaison électrochimique entre les différents assemblages a été réalisée.

### **III.1 Détermination des zone les plus sensibles à la corrosion et compréhension des processus ayant lieu à l'interface**

#### **Métal/Solution**

Cette partie est consacrée à la détermination de la zone la plus sensible à la corrosion et des processus ayant lieu à l'interface métal/ solution. Pour ce faire, des méthodes électrochimiques ainsi que des observations microscopiques et des essais de microdureté ont été utilisés.

La détermination des potentiels de corrosion et des courants de corrosion des différentes zones a été obtenue en utilisant des courbes de Tafel tracées à partir des courbes anodiques et des courbes cathodiques de différents échantillons. Ceci après immersion de ces derniers pendant 5 heures dans une solution NaCl à 3%.

Dans cette partie, les diagrammes d'impédance électrochimiques ont été utilisées afin d'avoir une idée claire sur les processus ayant lieu à l'interface métal – électrolyte.

Enfin, les observations microscopiques et les essais de microdureté réalisés pour les différentes zones ont été exploités pour compléter l'interprétation des résultats obtenus des essais électrochimiques.

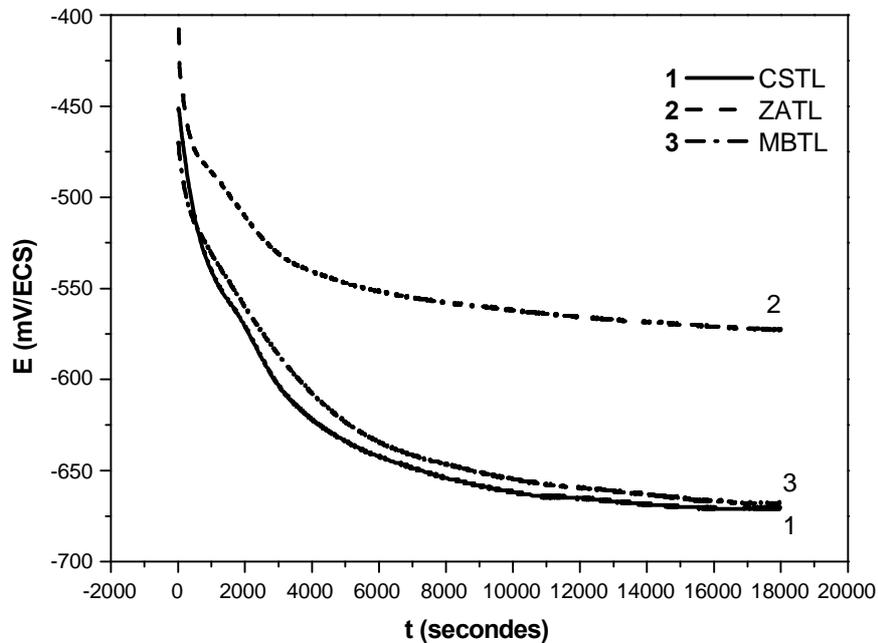
Dans cette partie, les quatre types d'assemblages ont été étudiés indépendamment.

### III.1.1 Soudure de la tôle de livraison

#### a. Courbes chronopotentiométriques

Le suivi des potentiels d'abandon des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison, pendant 5 heures d'immersion, a été fait à l'aide du montage (2.6) décrit dans le chapitre précédent.

La figure 3.1, rassemble les courbes de chronopotentiométrie à circuit ouvert des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison, et le tableau 3.1 regroupe les potentiels d'abandon des différentes zones, enregistrés après 5 heures d'immersion des électrodes de travail.



**Figure 3.1 :** Courbes chronopotentiométriques des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3% .

**Tableau 3.1:** Potentiels d'abandon des différentes zones de la soudure de la tôle De livraison, enregistrés après 5 heures d'immersion dans une solution NaCl à 3%.

Assemblage	Zone	Potentiel d'abandon (mV / ECS)
ATL	CSTL	-670
	ZATL	-573
	MBTL	-668

Le potentiel d'abandon du cordon de soudure (CSTL) évolue rapidement pendant les 50 premières minutes vers des valeurs négatives en potentiel puis tend progressivement vers une valeur limite quasi-stationnaire  $E = -670 \text{ mV / ECS}$ . Le potentiel d'abandon du métal de base suit la même évolution. Sa valeur limite, enregistrée après 5 heures d'immersion dans une solution de NaCl à 3%, est de  $-668 \text{ mV / ECS}$ . Les potentiels d'abandon de ces deux zones sont très proches. Contrairement à ces derniers, on constate que la valeur limite quasi-stationnaire du potentiel d'abandon enregistrée pour la zone affectée thermiquement (ZATL) est plus positive ; laquelle est de  $-573 \text{ mV / ECS}$ .

L'analyse du diagramme tension – pH relatif au système Fe / H<sub>2</sub>O à 25°C montre que pour un pH=7.36, les tensions d'abandon limites quasi-stationnaires enregistrées pour les différentes zones se situent dans le domaine de corrosion.

## b. Voltamétrie

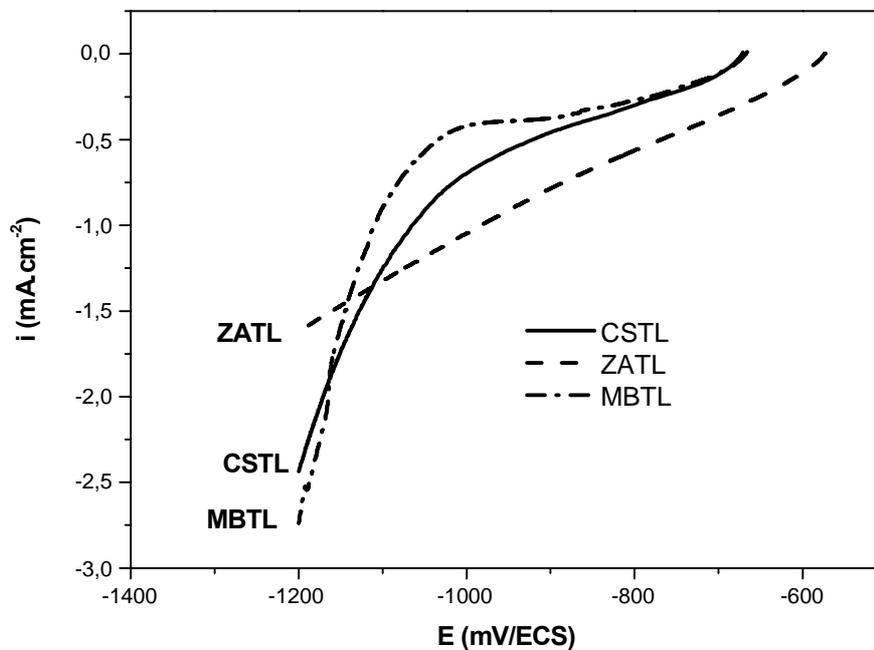
Après avoir déterminé les différents potentiels d'abandon à l'état stationnaire, des essais de polarisations anodiques et cathodiques ont été effectués sur les différentes zones de la soudure de la tôle de livraison avec une vitesse de balayage de  $0.5 \text{ mV/s}$ . Ces essais ont été effectués après immersion des échantillons pendant 5 heures. Les tracés des courbes cathodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :

$[E_{\text{équilibre}}, -1200 \text{ mV/ECS}]$ . Et les tracés des courbes anodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, 200 \text{ mV/ECS}]$ .

Les différentes courbes anodiques et les différentes courbes cathodiques sont rassemblées dans les figures 3.2 et 3.3 respectivement.

### b.1 Les courbes cathodiques

La figure 3.2, rassemble les courbes cathodiques des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison.



**Figure 3.2 :** Courbes cathodiques des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

L'examen de la figure 3.2, montre clairement la présence du palier de diffusion sur la courbe cathodique du cordon de soudure et sur celle du métal de base, et l'absence de ce dernier sur la courbe cathodique de la zone affectée thermiquement. Ceci nous amène à déduire que la cinétique de réaction de la zone affectée thermiquement est différente de celle du métal de base et celle du cordon de soudure.

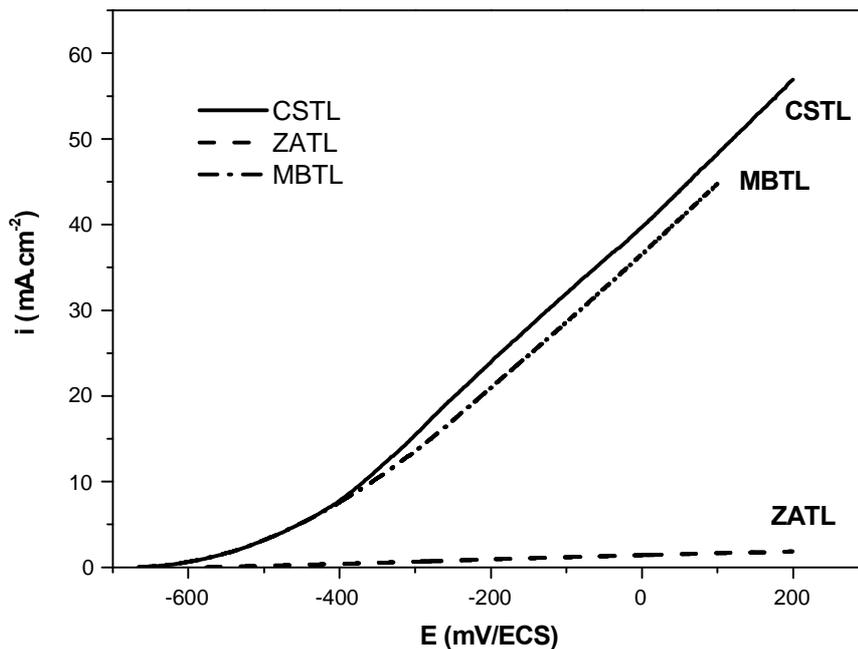
Sur la courbe cathodique du métal de base et celle du cordon de soudure, on remarque une croissance rapide et continue du courant aux fortes surtensions cathodiques (de -1200 mV/ECS jusqu'à -660 mV/ECS). Cette dernière est due à la réduction de l'eau et celle de l'oxygène dissous dans le milieu :



On constate aussi que, la réaction cathodique du métal de base est la plus lente et celle de la zone affectée thermiquement est la plus rapide. Ce qui signifie que la corrosion évolue plus rapidement dans la zone affectée thermiquement.

### b.2 Les courbes anodiques

La figure 3.3, regroupe les courbes anodiques des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison.

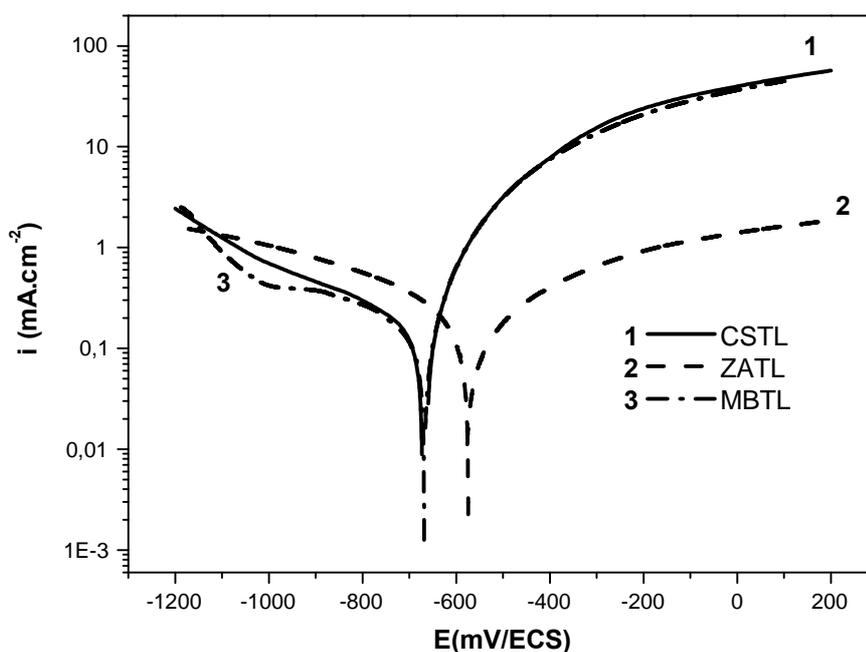


**Figure 3. 3 :** Courbes anodiques des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3% .

À partir de -400 mV/ ECS, la courbe anodique du cordon de soudure et celle du métal de base présentent une augmentation rapide du courant de corrosion. L'absence du palier de passivation sur ces deux zones, traduit leurs dépassivations faciles sur toute la surface ou localisée avec la formation des piqûres. La vitesse de corrosion déterminée de la courbe anodique relative à la zone affectée thermiquement (ZATL) est très faibles comparativement à celles obtenue pour les deux autres zones. Cette faible densité de courant montre l'existence d'une couche d'oxyde compact sur la zone affectée thermiquement.

### b.3 Courbes de Tafel

Les courbes de Tafel présentées sur la figure 3.4, sont réalisées à partir de l'exploitation des courbes anodiques et cathodiques des différentes zones qui constituent la soudure de la tôle d'origine. Ces courbes nous ont permis de déterminer, pour chaque zone, le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) et la densité du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ). Les résultats de l'exploitation des courbes de Tafel, sont regroupés dans le tableau 3.2.



**Figure 3.4 :** Courbes de Tafel des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3. 2 :** Potentiels de corrosion et densités des courants de corrosion des différentes zones de la soudure de la tôle d'origine.

Assemblage	Zone	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)
ATL	CSTL	170	-674
	ZATL	107	-569
	MBTL	163	-670

Les courbes de Tafel du cordon de soudure et du métal de base sont presque superposables.

L'examen du tableau 3.2, montre que la zone affectée thermiquement (ZATL) présente la densité de courant de corrosion la moins élevée. Cette faible densité de courant montre l'existence d'une couche d'oxyde compact sur la zone affectée thermiquement.

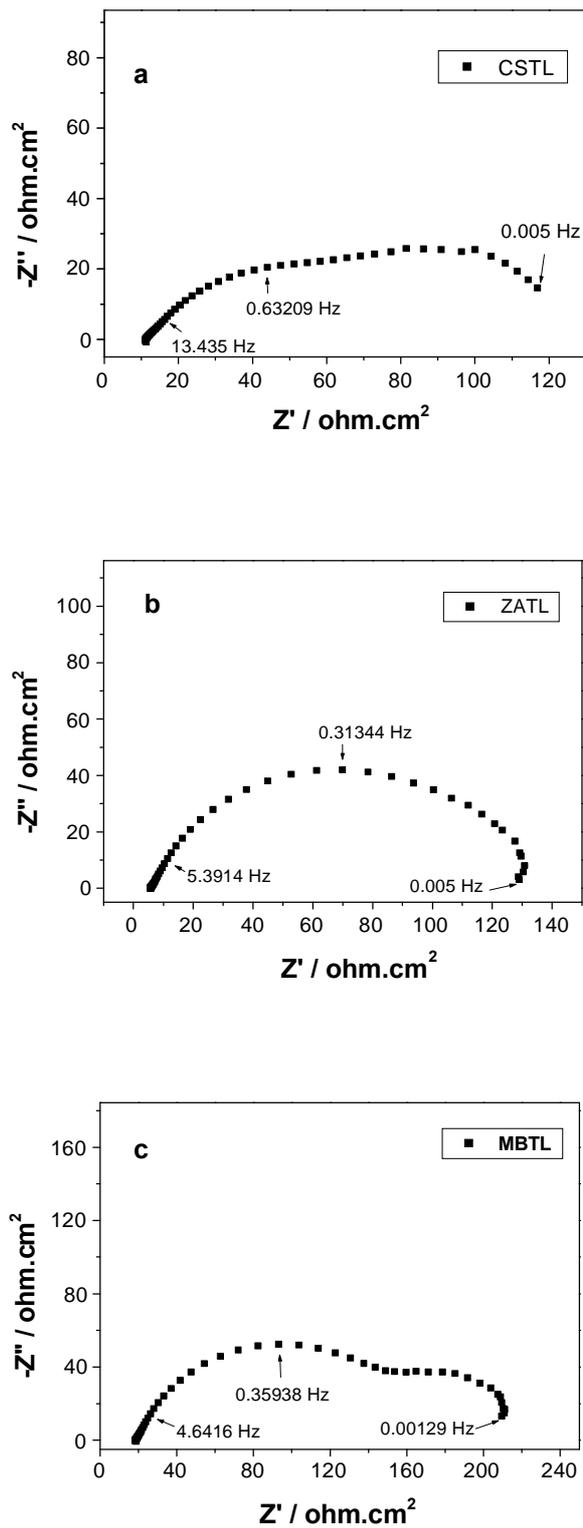
### c. Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les mesures d'impédance ont été réalisées dans un domaine de fréquence variant, de 10 KHz à 5 mHz pour le cordon de soudure et la zone affectée thermiquement, et de 10 KHz à 1 mHz pour le métal de base après 5 heures d'immersion. Les différents diagrammes sont présentés dans les figures 3.5a, b et c.

Le diagramme d'impédance électrochimique du cordon de soudure de la tôle de livraison obtenu au potentiel d'équilibre, après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%, est composé de deux boucles capacitatives qui ne se distinguent pas clairement aux hautes fréquences **HF** et aux basses fréquences **BF**. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). On constate que le rayon de la deuxième boucle (BF) est plus grand que celui de la première (HF). Ceci signifie que le cordon de soudure devient plus résistant.

Le diagramme d'impédance électrochimique de la zone affectée thermiquement de la soudure de la tôle de livraison est composé d'une boucle capacitive qui est attribuée à la formation de la couche d'oxyde qui couvre la surface de l'électrode. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime d'activation. Probablement les faibles densités de courant enregistrées sur la courbe anodique de cette zone, sont dûes à la couche d'oxyde compact qui est formée sur la surface de l'électrode.

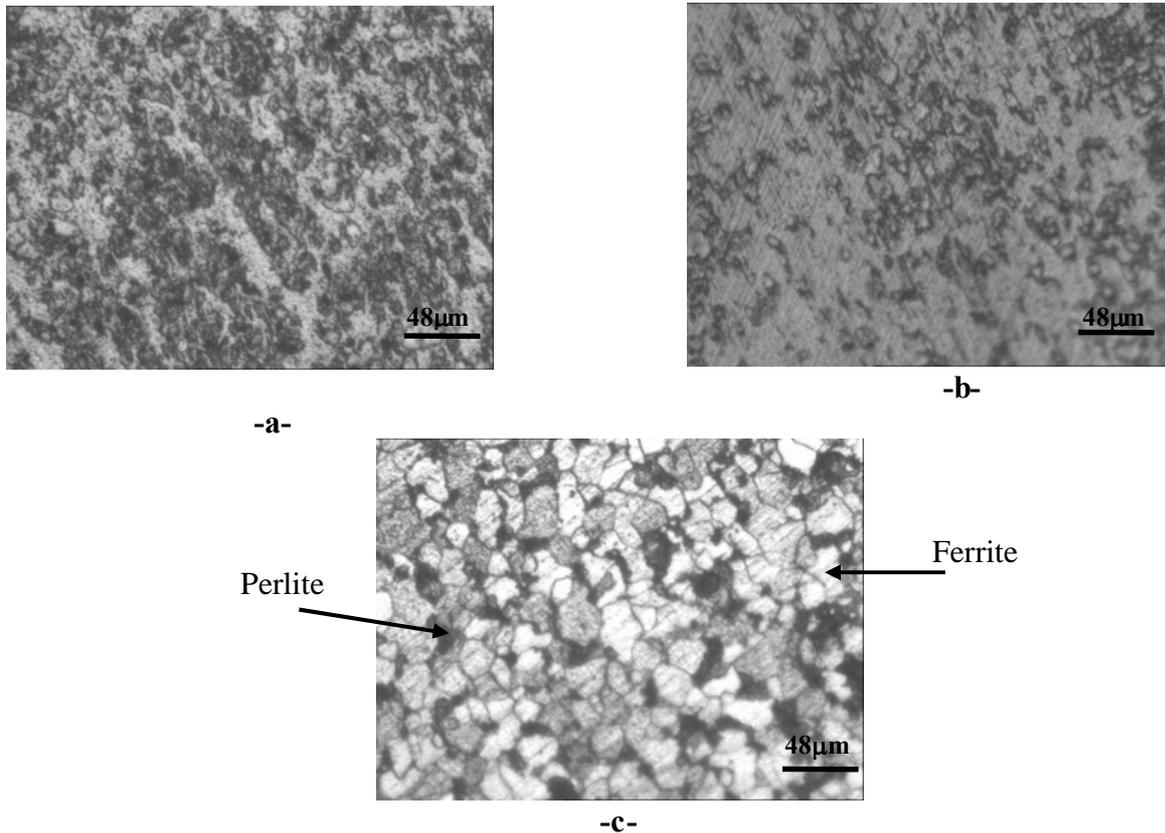
Le diagramme d'impédance électrochimique du métal de base de la tôle de livraison obtenu au potentiel d'équilibre, après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans la solution, est composé de deux boucles capacitatives aux hautes et aux basses fréquences. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). Contrairement au cordon de soudure, on constate que dans le cas du métal de base, le rayon de la deuxième boucle (BF) est plus petit que celui de la première (HF). Ce qui montre la rupture de la couche de passivation formée sur l'électrode et l'accélération de la vitesse de corrosion.



**Figure 3.5** : Diagrammes d'impédance des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison, obtenus au potentiel d'équilibre après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%. **a** :cordon de soudure (CSTL) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATL) ; **c** : métal de base (MBTL).

#### d. Observations microscopiques

Les figures 3.6a, b et c, présentent les micrographies des différentes zones qui constituent la soudure de la tôle de livraison observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200 après polissage et attaque chimique des échantillons.



**Figure 3.6 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200.

**a :** cordon de soudure (CSTL) ; **b :** zone affectée thermiquement (ZATL) ;  
**c :** métal de base (MBTL).

La structure résultante de l'observation microscopique du cordon de soudure de la tôle de livraison (CSTL) est ferrito-perlitique à grains fins. L'observation microscopique de la zone affectée thermiquement, par contre, met en évidence une structure qui est composée de ferrite, de perlite et probablement d'austénite résiduelle. Dans ce cas, la quantité de perlite observée est moins importante que celle observée sur la micrographie du cordon de soudure.

Quand à la structure résultante de l'observation microscopique du métal de base, elle est ferrito-perlitique équiaxiale dont la taille des grains, dans ce cas, est plus importante que celle des grains qui constituent le cordon de soudure.

### e. Essais de microdureté

Les essais de microdureté réalisés sur les différentes zones qui constituent la soudure de la tôle de livraison sont réalisés sous une charge de 200g. Les différents résultats obtenus sont illustrés par la figure 3.7 et les valeurs moyennes de microdureté des différentes zones sont rassemblées dans le tableau 3.3.

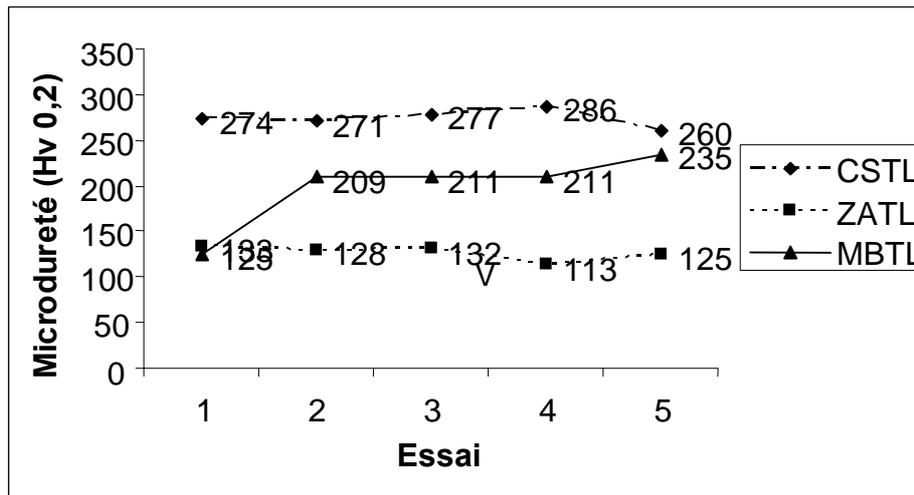


Figure 3.7 : Microduretés des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison.

Tableau 3.3 : Microduretés moyennes des différentes zones de la soudure de la tôle d'origine.

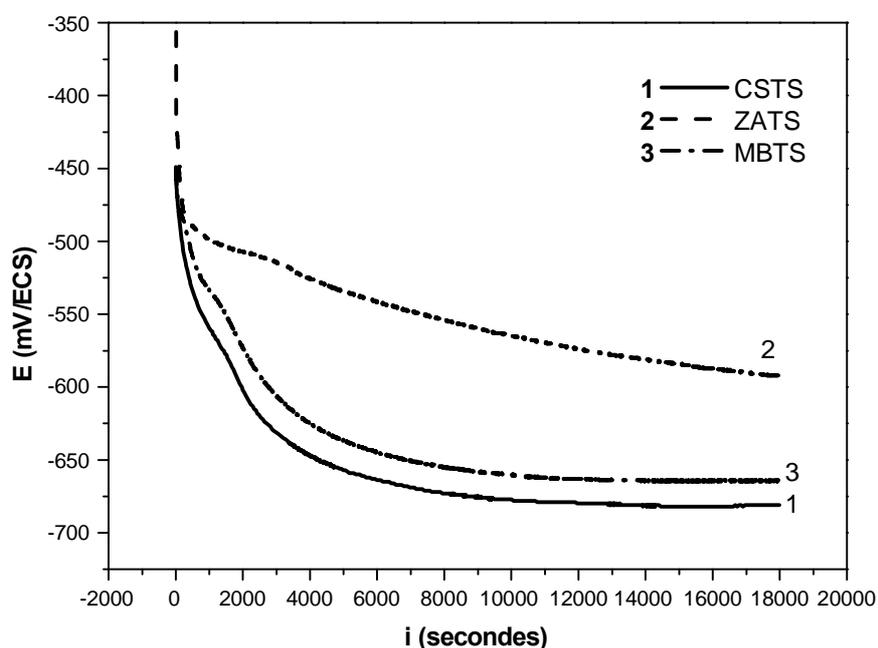
Assemblage	Zone	Microdureté moyenne (Hv <sub>0,2</sub> )
ATL	CSTL	273.6
	ZATL	126.2
	MBTL	198.2

L'analyse des résultats rassemblés dans le tableau 3.3, montre que la microdureté moyenne du cordon de soudure est supérieure à celles des deux autres zones. Cela est probablement dû à sa structure fine comparativement à celle du métal de base. Contrairement au cordon de soudure, la microdureté moyenne de la zone affectée thermiquement est la plus faible. Ce qui est probablement dû à la faible concentration de cette dernière en perlite et sa forte concentration en ferrite et en austénite.

### III.1.2 Assemblage de deux tôles saines

#### a. Courbes chronopotentiométriques

L'évolution des potentiels d'abandon  $E$  ( $i=0$ ) relatifs aux différentes zones de la soudure de deux tôles saines en milieu NaCl à 3% est enregistrée en fonction du temps. Les courbes chronopotentiométriques  $E$  ( $i=0$ ) =  $f$  ( $t$ ) des différentes zones, obtenues après 5 heures d'immersion, sont représentées sur la figure 3.8. Les potentiels d'équilibre de ces zones sont regroupés dans le tableau 3.4.



**Figure 3.8 :** Courbes chronopotentiométriques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.4 :** Potentiels d'abandon des différentes zones de la soudure de deux tôles saines, enregistrés après 5 heures d'immersion dans une solution NaCl à 3%.

Assemblage	Zone	Potentiel d'abandon (mV/ECS)
ATSTS	CSTS	-681
	ZATS	-592
	MBTS	-664

Les allures des courbes chronopotentiométriques à circuit ouvert du cordon de soudure (CSTS) et du métal de base (MBTS) sont très proches. Les potentiels d'abandon de ces deux derniers évoluent très rapidement pendant les 50 premières minutes. Au delà, les potentiels d'abandon du cordon et du métal de base tendent respectivement vers les valeurs limites quasi-stationnaires -681 mV/ECS et -664 mV/ECS. Le potentiel d'abandon de la zone affectée thermiquement (ZATS) évolue rapidement pendant les 9 premières minutes puis tend vers une valeur limite quasi-stationnaire de -592 mV/ECS. Cette dernière est plus positive que celles enregistrées pour les deux autres zones.

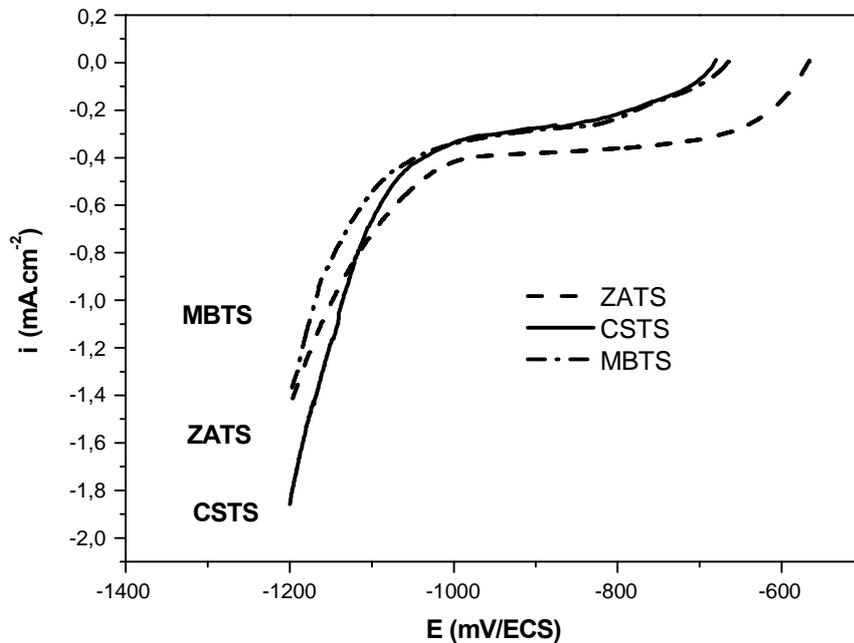
### **b. Voltamétrie**

Les essais de polarisations anodiques et cathodiques effectués pour les différentes zones de la soudure de deux tôles saines ont été réalisés avec une vitesse de balayage de 0.5 mV/s après une immersion de 5 heures. Les tracés des courbes cathodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, -1200 \text{ mV/ECS}]$ . Et les tracés des courbes anodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, 200 \text{ mV/ECS}]$ .

Les différentes courbes anodiques et les différentes courbes cathodiques sont rassemblées dans les figures 3.9 et 3.10 respectivement.

### b.1 Les courbes cathodiques

La figure 3. 7, regroupe les courbes cathodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines.



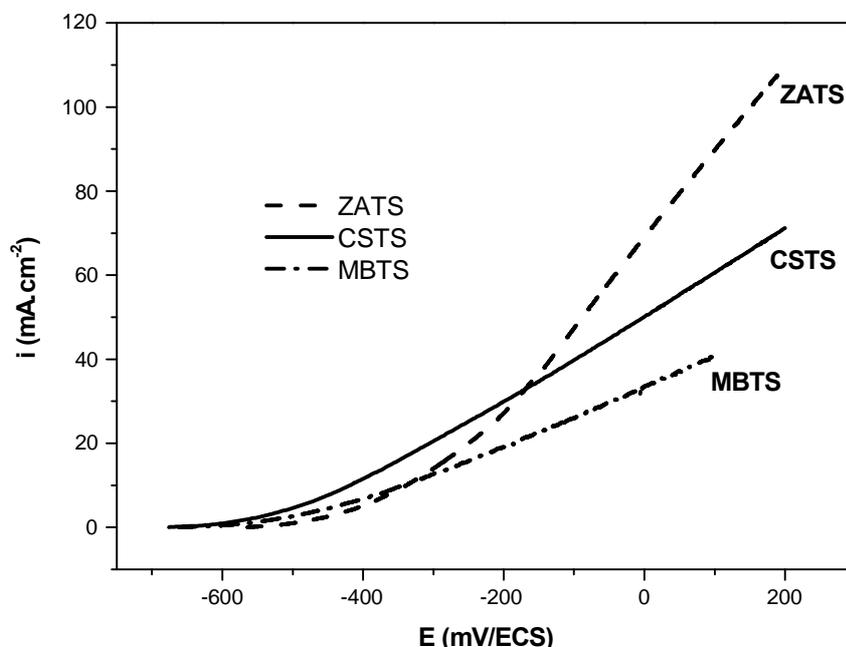
**Figure 3.9 :** Courbes cathodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3% .

La figure 3.9 montre que, de -1200 mV/ECS jusqu'à -1100 mV/ECS, les courbes cathodiques des différentes zones présentent une croissance rapide et continue de la densité de courant. Cette dernière est due à la réduction de l'eau et celle de l'oxygène dissous dans le milieu.

La courbe cathodique du métal de base et celle du cordon de soudure présentent des paliers de diffusion superposables. Contrairement à ces dernières, la courbe cathodique de la zone affectée thermiquement (ZATS) présente un palier de diffusion dont la hauteur est relativement plus importante que celles des deux autres zones. De ce fait, la réaction cathodique de la zone affectée thermiquement est la plus rapide.

## b.2 Les courbes anodiques

La figure 3.10, regroupe les courbes anodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines.

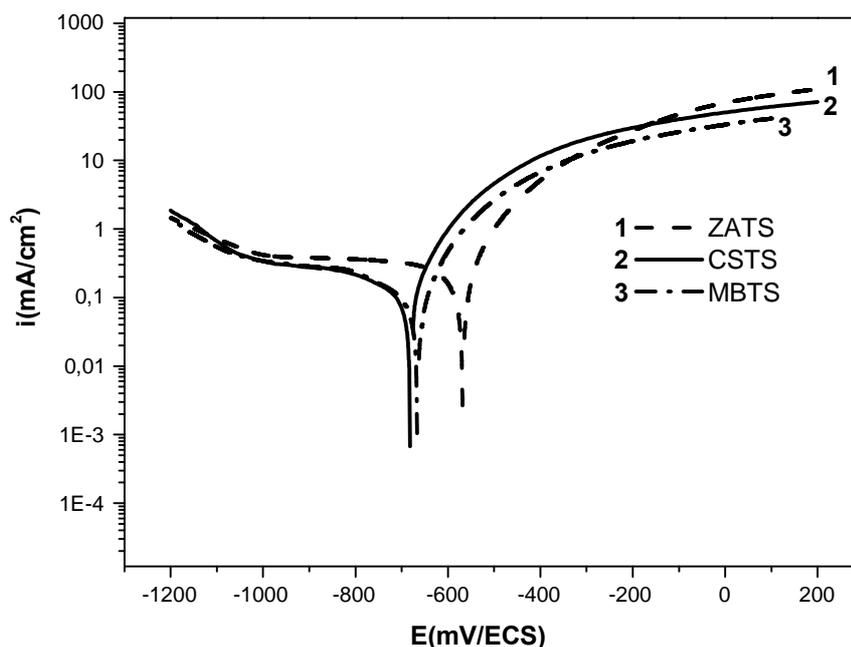


**Figure 3.10** : Courbes anodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

Les courbes anodiques des échantillons montrent que les différentes zones subissent une corrosion qui est caractérisée par l'augmentation de la densité de courant de corrosion avec l'augmentation du potentiel anodique, d'où la dissolution continue du matériau. On constate que la réaction anodique de la zone affectée thermiquement (ZATS) est la plus rapide.

## b.3 Courbes de Tafel

Les courbes de Tafel représentées sur la figure 3.11, ont été tracées à partir de l'exploitation des courbes anodiques et cathodiques des différentes zones de la soudure de deux tôles saines. L'objectif de ces expériences est de déterminer pour chaque zone, le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) et la densité du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ). Les résultats de l'exploitation des courbes de Tafel, sont résumés dans le tableau 3.4.



**Figure 3.11 :** Courbes de Tafel des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.5 :** Potentiels de corrosion et densités des courants de corrosion des différentes zones de la soudure de deux tôles saines.

Assemblage	Zone	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)
ATSTS	CSTS	170	-678
	ZATS	199	-597
	MBTS	135	-668

La figure 3.11 montre que les courbes de Tafel du cordon de soudure et du métal de base sont presque superposables. Par ailleurs, l'examen du tableau ci-dessus montre que la zone affectée thermiquement de l'assemblage de deux tôles saines présente une densité de courant de corrosion très élevée par rapport à celle du cordon de soudure et celle de ce dernier est plus importante que celle du métal de base. Probablement, la couche d'oxyde passive qui s'est formée sur la zone affectée thermiquement est la moins résistante et celle qui s'est formée sur le métal de base est la plus résistante.

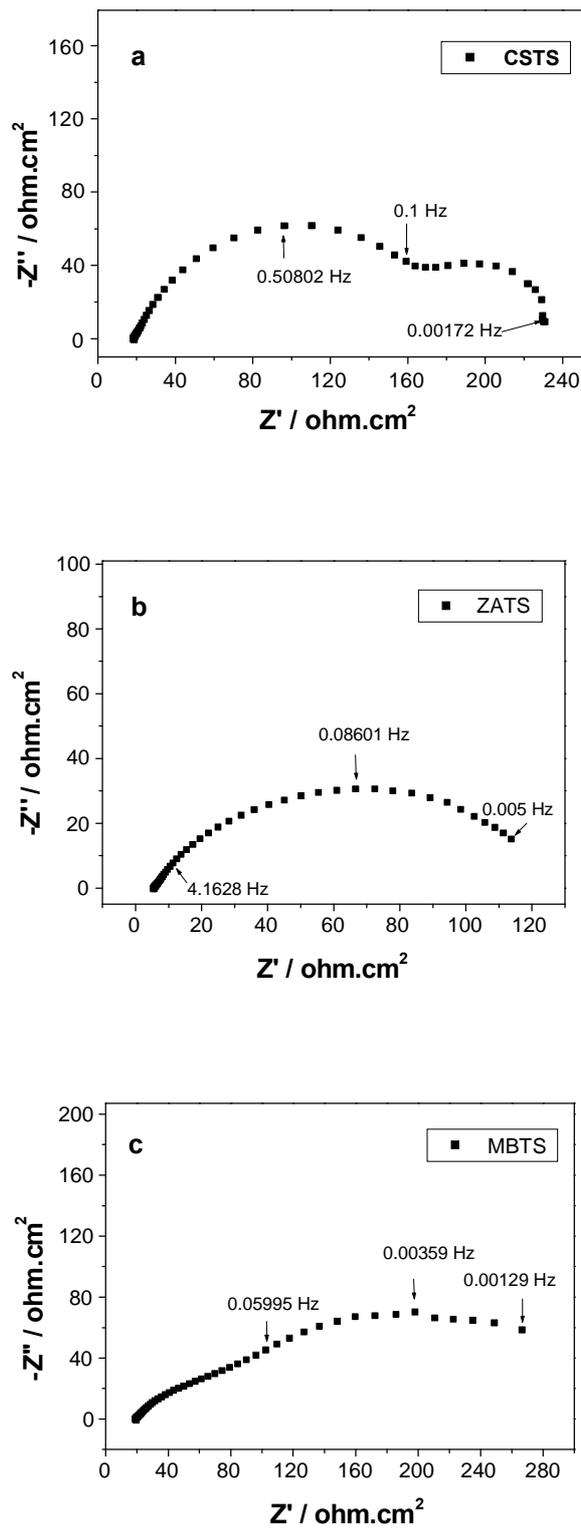
### c. Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les mesures d'impédance ont été réalisées dans un domaine de fréquence variant, de 10 KHz à 5 mHz pour le cordon de soudure et la zone affectée thermiquement, et de 10 KHz à 1 mHz pour le métal de base après 5 heures d'immersion dans la solution. Les différents diagrammes sont illustrés par les figures 3.12.a, b et c.

Le diagramme d'impédance électrochimique du cordon de soudure de la tôle saine est composé de deux boucles capacitives aux hautes fréquences **HF** et aux basses fréquences **BF**. La boucle capacitive aux HF est attribuée à la présence de la couche d'oxyde passive qui couvre la surface de l'électrode. On constate que le rayon de la deuxième boucle (BF) est plus petit que celui de la première boucle, ceci signifie une accélération de la corrosion qui est due à la détérioration de la couche d'oxyde. Dans ce cas, la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion).

Le diagramme d'impédance électrochimique de la zone affectée thermiquement de la soudure de deux tôles saines, est composé d'une boucle capacitive qui est attribuée à la formation de la couche d'oxyde passive qui couvre la surface de l'électrode. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime d'activation.

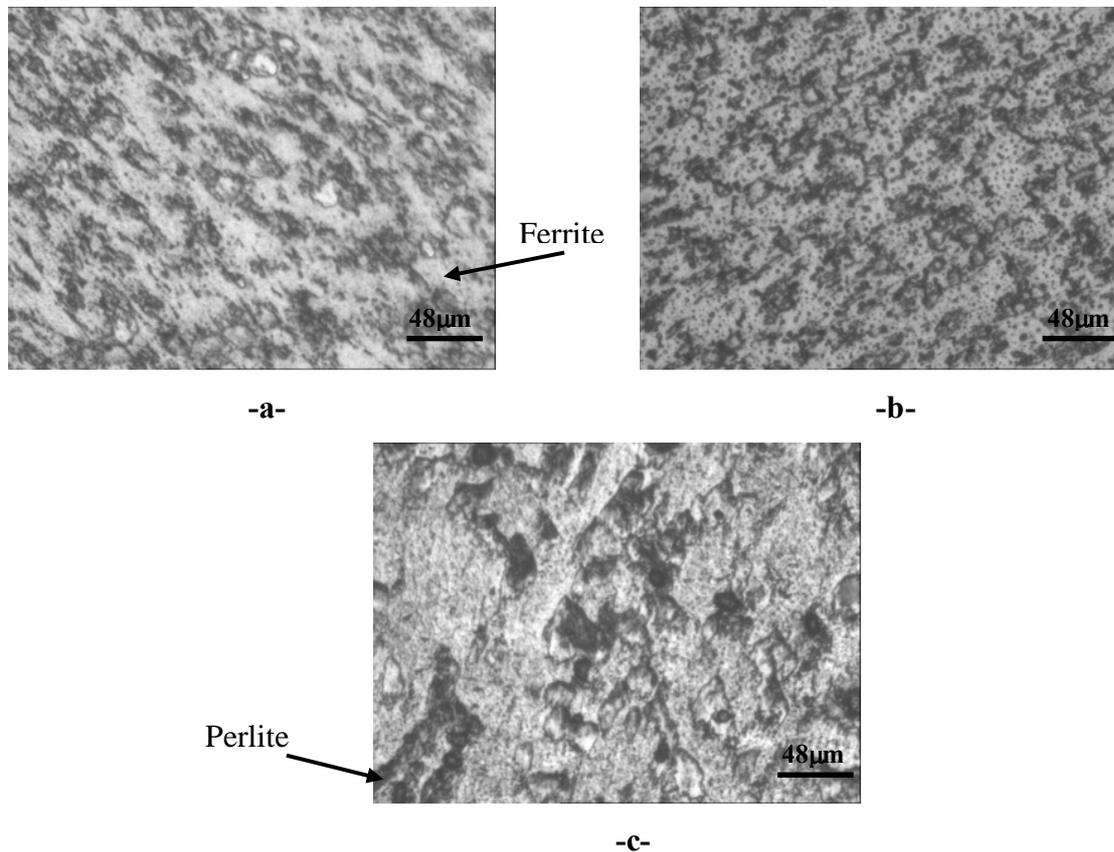
Le diagramme d'impédance électrochimique du métal de base de la tôle saine obtenu au potentiel d'équilibre est composé de deux boucles capacitives, aux hautes fréquences **HF** et aux basses fréquences **BF**, lesquelles ne se distinguent pas clairement. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). On constate que le rayon de la deuxième boucle est plus grand que celui de la première, ce qui signifie une augmentation de la résistance à la corrosion du métal de base.



**Figure 3.12 :** Diagrammes d'impédance des différentes zones de la soudure de deux tôles saines, obtenus au potentiel d'équilibre après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%. **a** : cordon de soudure (CSTS) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATS) ; **c** : métal de base (MBTS).

#### d. Observations microscopiques

Les figures 3.23a, b et c, présentent les micrographies des différentes zones qui constituent la soudure de deux tôles saines observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200 après polissage et attaque chimique des échantillons.



**Figure 3.23 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de deux tôles saines observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200.

**a :** cordon de soudure (CSTS) ; **b :** zone affectée thermiquement (ZATS) ;  
**c :** métal de base (MBTS).

La microstructure du cordon de soudure de la tôle saine est composée de ferrite, d'îlots réguliers de perlite et d'austénite résiduelle. Contrairement au cordon de soudure, la structure de la zone affectée thermiquement est constituée d'une matrice de ferrite sur laquelle on observe de petits îlots de perlite et un rejet de particules qui semble être de l'austénite résiduelle.

La figure 3.23.c montre que la structure du métal de base de la tôle saine est composée de ferrite et d'îlots irréguliers de perlite. La structure du métal de base est moins fine que la structure du cordon de soudure.

### e. Essais de microdureté

Les essais de microdureté réalisés sur les différentes zones qui constituent la soudure de deux tôles saines sont réalisés sous une charge de 200g. Les différents résultats sont illustrés par la figure 3.14 et les valeurs moyennes de microdureté des différentes zones sont rassemblées dans le tableau 3.6.

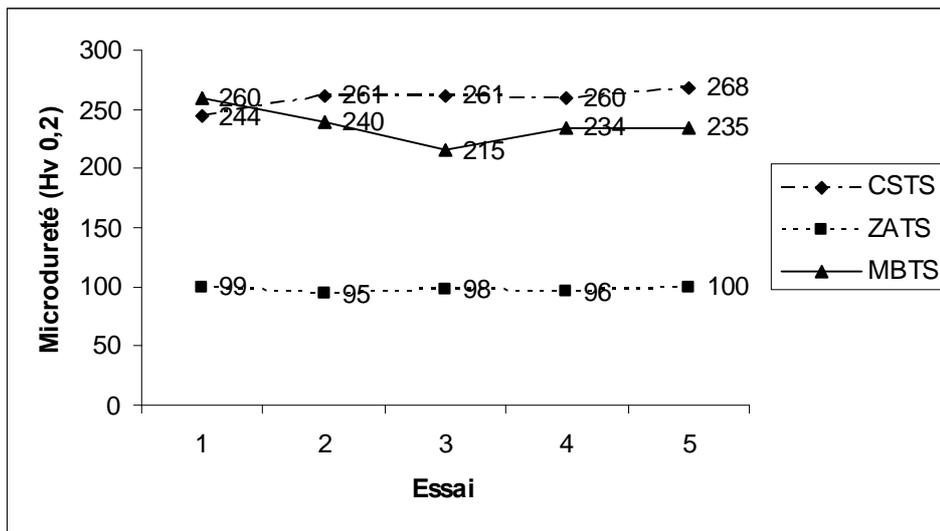


Figure 3.14 : Microduretés des différentes zones de l'assemblage de deux tôles saines.

Tableau 3.6 : Microduretés moyennes des différentes zones de la soudure de deux tôles saines.

Assemblage	Zone	Microdureté moyenne (Hv <sub>0,2</sub> )
ATSTS	CSTS	258.8
	ZATS	97.6
	MBTS	236.8

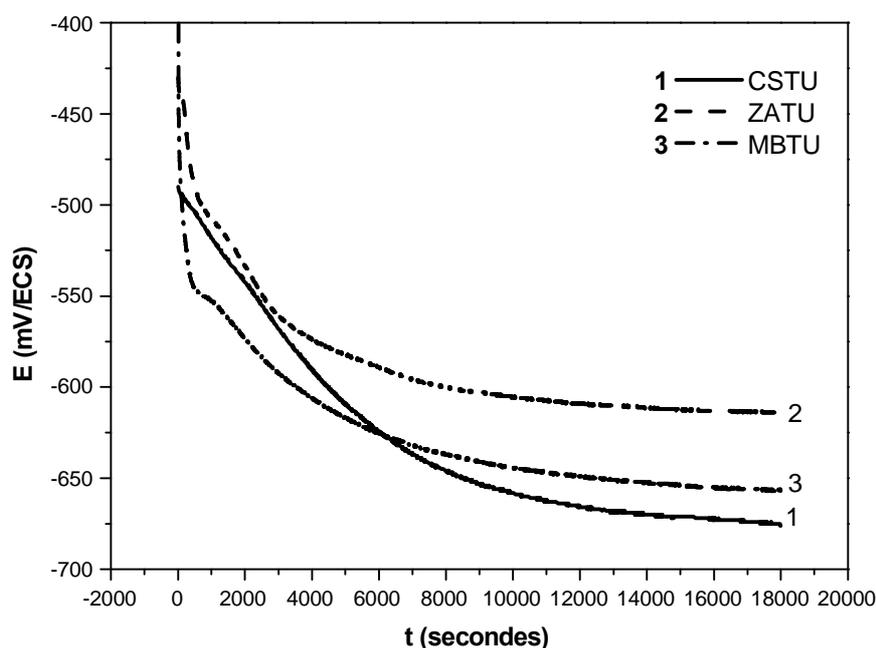
La figure 3.14 montre que les microduretés enregistrées pour la zone affectée thermiquement sont plus basses que celles enregistrées pour les deux autres zones. Ceci est probablement dû à la faible concentration de la zone affectée thermiquement en perlite et sa forte concentration en ferrite, comparativement aux autres zones.

L'analyse des résultats rassemblés dans le tableau 3.6 montre que la microdureté moyenne du cordon de soudure est supérieure à celle du métal de base. Ce qui est probablement dû à sa structure fine comparativement à celle du métal de base.

### III.1.3 Assemblage de deux tôles usagées

#### a. Courbes chronopotentiométriques

L'évolution des potentiels d'abandon  $E (i=0)$  relatifs aux différentes zones de la soudure de deux tôles usagées en milieu NaCl à 3% est enregistrée en fonction du temps. Les courbes chronopotentiométriques  $E (i=0) = f (t)$  des différentes zones, obtenues après 5 heures d'immersion, sont représentées sur la figure 3.15. Les potentiels d'équilibre de ces zones sont regroupés dans le tableau 3.7.



**Figure 3.15 :** Courbes chronopotentiométriques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.7 :** Potentiels d'abandon des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées, enregistrés après 5 heures d'immersion dans une solution NaCl à 3%.

Assemblage	Zone	Potentiel d'abandon (mV / ECS)
ATUTU	CSTU	-676
	ZATU	-614
	MBTU	-657

D'après la figure 3.15, on constate que les allures des courbes chronopotentiométriques à circuit ouvert du cordon de soudure (CSTU) et de la zone affectée thermiquement (ZATU) sont proches. Les potentiels d'abandon de ces deux dernières évoluent très rapidement pendant les 50 premières minutes. Au delà, les potentiels d'abandon du cordon et de la zone affectée thermiquement tendent respectivement vers les valeurs limites quasi-stationnaires -676 mV/ECS et -614 mV/ECS. Le potentiel d'abandon du métal de base (MBTU) décroît rapidement pendant la première heure, puis tend vers une valeur limite quasi-stationnaire -657 mV/ECS. Cette dernière est plus importante que celles enregistrées pour les deux autres zones.

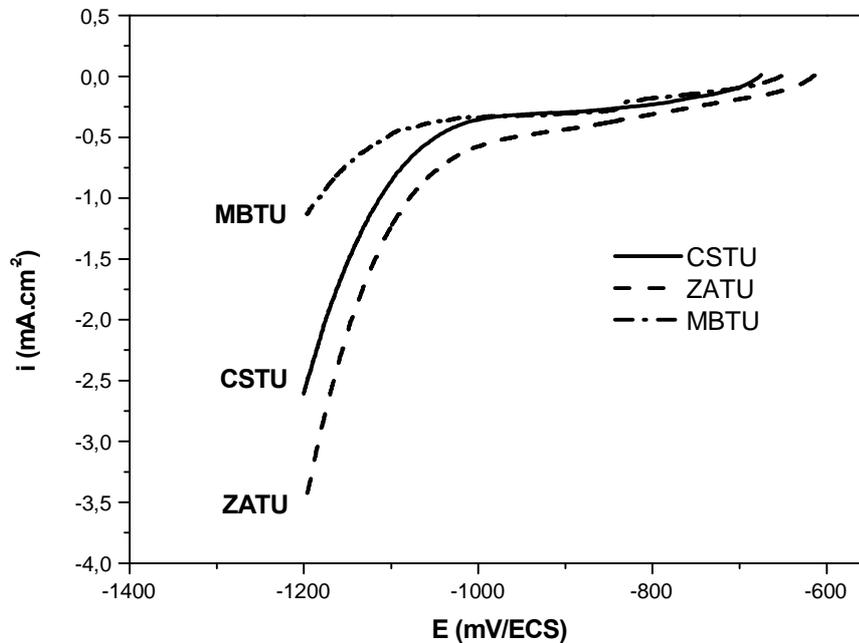
### **b. Voltamétrie**

Les courbes anodiques et cathodiques des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées ont été tracées avec une vitesse de balayage de 0.5 mV/s, après immersion des échantillons pendant 5 heures. Les tracés des courbes cathodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, -1200 \text{ mV/ECS}]$ . Et les tracés des courbes anodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, 200 \text{ mV/ECS}]$ .

Les différentes courbes anodiques et les différentes courbes cathodiques sont rassemblées dans les figures 3.16 et 3.17 respectivement.

### b.1 Les courbes cathodiques

La figure 3.16 rassemble les courbes cathodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées.



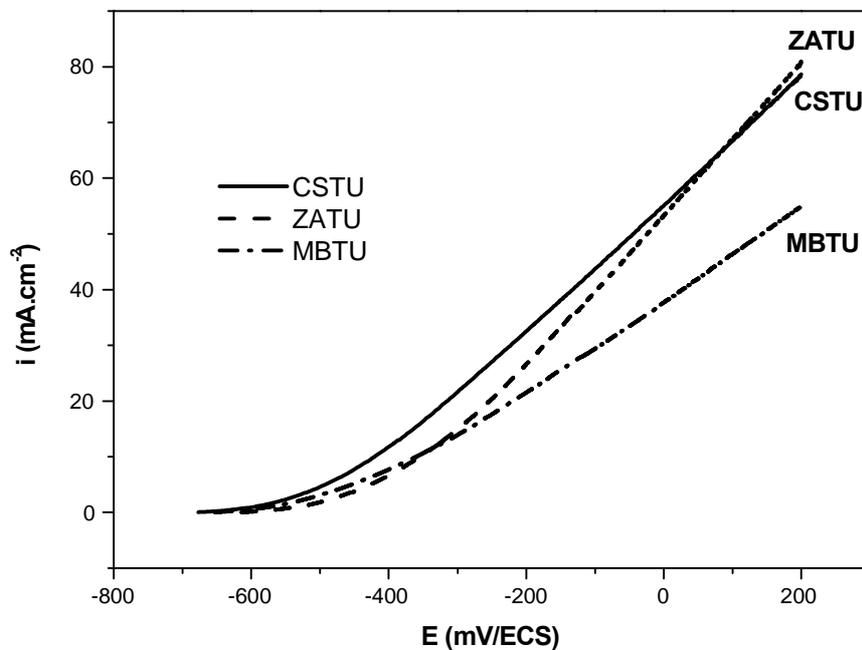
**Figure 3.16 :** Courbes cathodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

L'analyse de la figure 3.16 montre qu'aux fortes surtensions (de -1200 mV / ECS jusqu'à -1000 mV / ECS pour le cordon de soudure et la zone affectée thermiquement, et de -1200 mV / ECS jusqu'à -1100 mV / ECS pour le métal de base), les courbes cathodiques des différentes zones présentent une croissance rapide et continue de la densité de courant. Cette dernière est due à la réduction de l'eau et celle de l'oxygène dissous dans le milieu.

La courbe cathodique du cordon de soudure et celle du métal de base présentent des paliers de diffusion de même hauteur. Contrairement à ces dernières, la courbe cathodique de la zone affectée thermiquement présente un palier de diffusion dont la hauteur est la plus importante. Donc la réaction cathodique de la zone affectée thermiquement est la plus rapide.

## b.2 Les courbes anodiques

La figure 3.17, regroupe les courbes anodiques des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées.



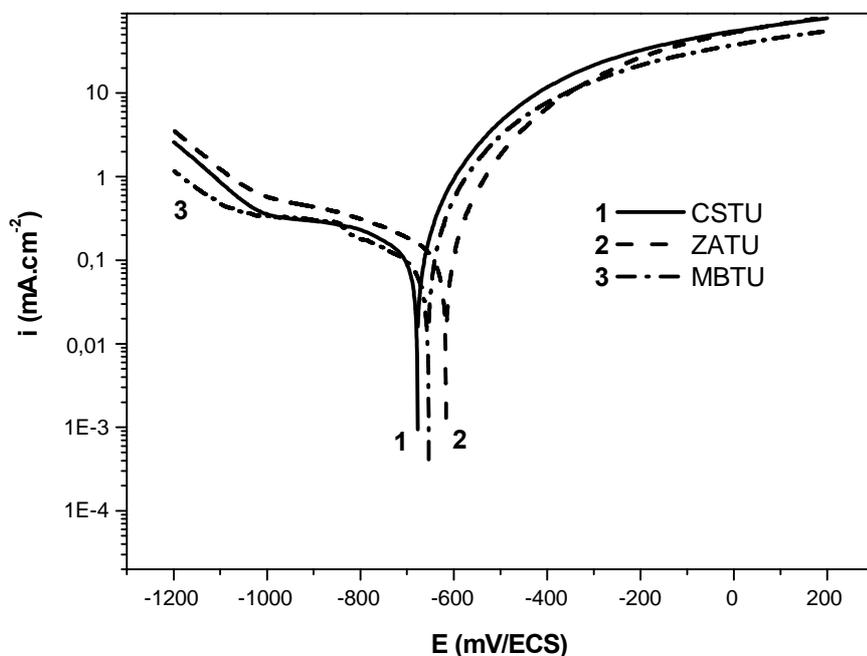
**Figure 3.17 :** Courbes anodiques des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3% .

Les courbes anodiques des différentes zones présentent une montée rapide du courant de corrosion avec l'augmentation du potentiel anodique. L'absence du palier de passivation sur les courbes anodiques de ces zones traduit leurs dépassivations faciles par l'action des ions chlorure soit globalement sur toute la surface, soit localisée avec la formation des piqûres. On constate que la réaction anodique de la zone affectée thermiquement (ZATU) est la plus rapide.

## b.3 Courbes de Tafel

Les courbes de Tafel sont nécessaires pour déterminer le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) et la densité du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ) des zones qui constituent la soudure de deux tôles usagées. Ces courbes ont été tracées à partir de l'exploitation des courbes anodiques et cathodiques de ces différentes zones. Les courbes de Tafel sont représentées sur la figure

3.18. Le potentiel de corrosion et la densité du courant de corrosion de chaque zone, sont rassemblés dans le tableau 3.8.



**Figure 3.14 :** Courbes de Tafel des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.8 :** Potentiels de corrosion et densités des courants de corrosion des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées.

Assemblage	Zone	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)
ATUTU	CSTU	178	-677
	ZATU	206	-608
	MBTU	144	-664

Les courbes de Tafel du cordon de soudure et du métal de base sont presque superposables.

L'examen du tableau ci-dessus, montre que la zone affectée thermiquement de la soudure de deux tôles usagées présente une densité de courant de corrosion très élevée par rapport à celles des deux autres zones. Probablement, la couche oxyde compact qui s'est formée sur la zone affectée thermiquement est moins résistante à la dégradation.

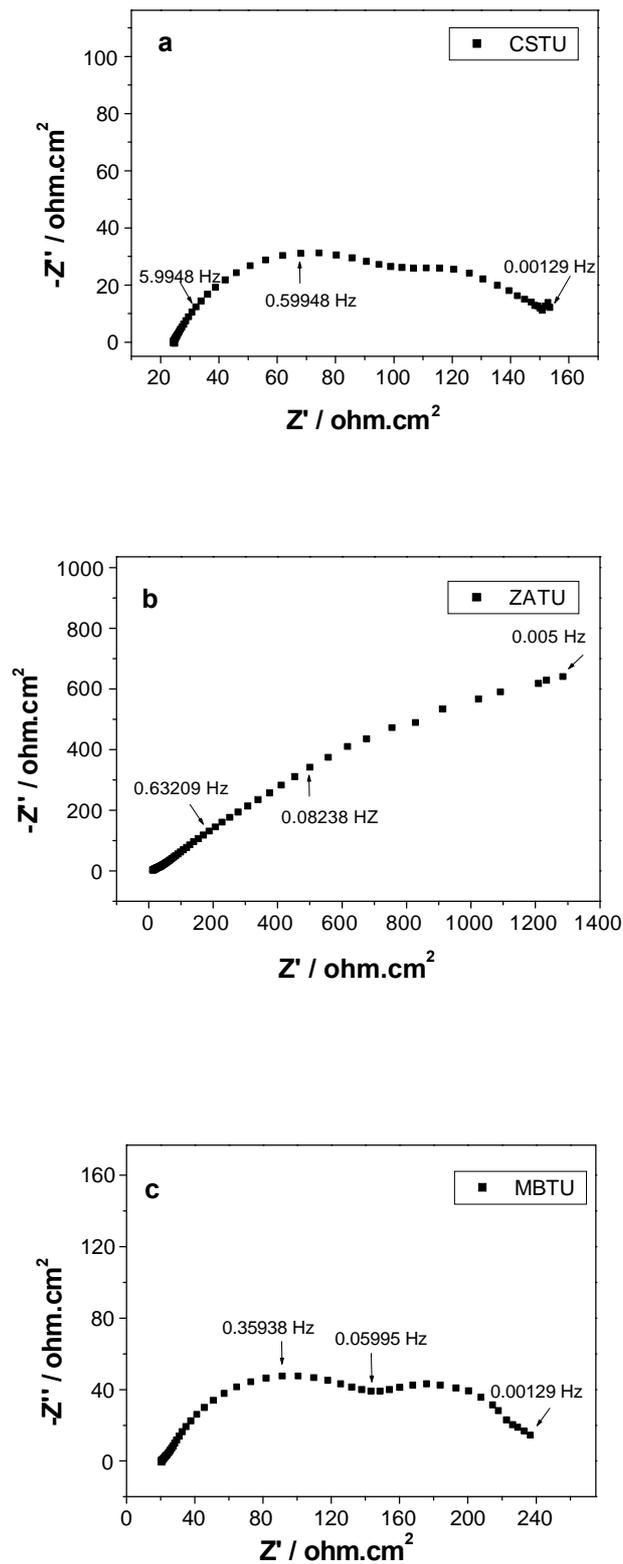
### c. Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les mesures d'impédance ont été réalisées dans un domaine de fréquence variant, de 10 KHz à 1 mHz pour le métal de base et le cordon de soudure, et de 10 KHz à 5 mHz pour la zone affectée thermiquement. Ceci après 5 heures d'immersion des électrodes de travail dans une solution NaCl à 3%. Les différents diagrammes sont présentés par les figures 3.19a, b et c.

Le diagramme d'impédance électrochimique du cordon de soudure de la tôle usagée obtenu au potentiel d'équilibre est composé de deux boucles capacitives aux hautes fréquences **HF** et aux basses fréquences **BF**. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). On constate que le rayon de la deuxième boucle (BF) est plus petit que celui de la première (HF). Ce qui signifie une accélération de la corrosion qui est dûe à la détérioration de la couche d'oxyde.

Le diagramme d'impédance électrochimique de la zone affectée thermiquement de la soudure de deux tôles usagées est une droite qui traduit la formation d'oxyde peu conducteur sur la surface de l'électrode de travail. Dans ce cas la surface active de l'électrode de travail (ZATU) est bloquée par la présence de la couche d'oxyde.

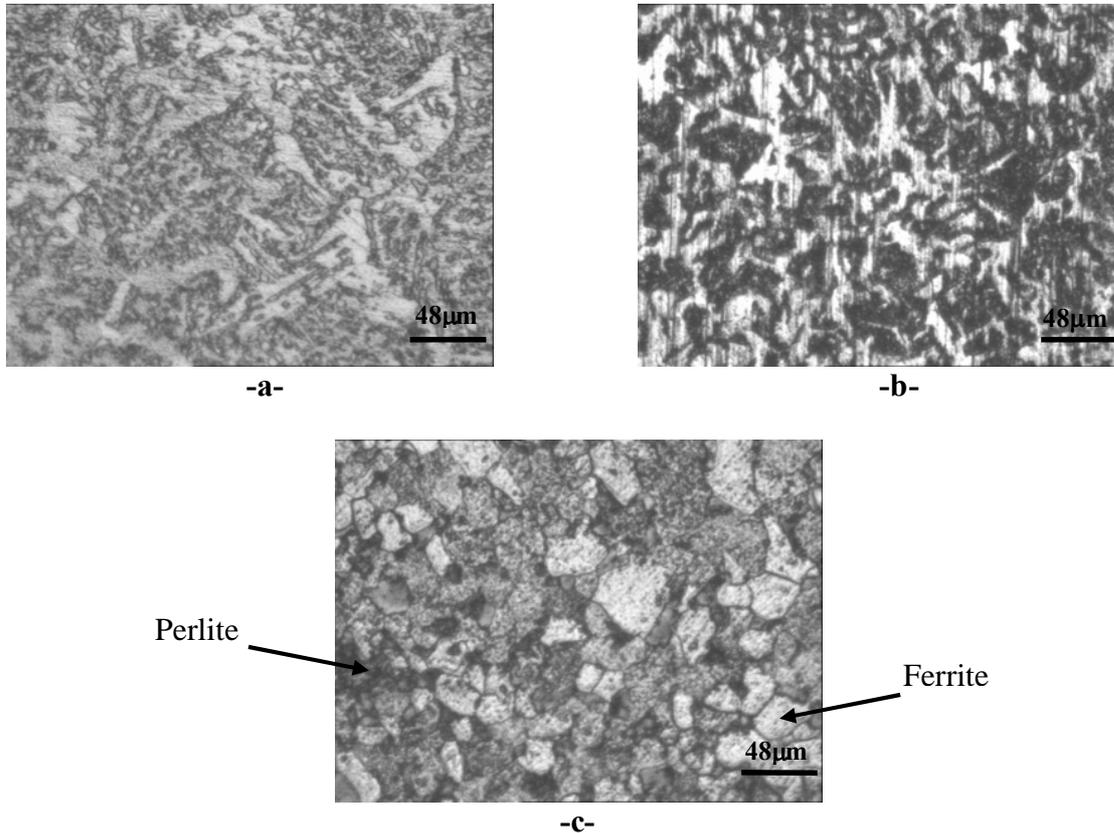
Le diagramme d'impédance électrochimique du métal de base de la tôle usagée, obtenu au potentiel d'équilibre, après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%, est très semblable à celui obtenu pour le cordon de soudure. Il se compose de deux boucles capacitives aux hautes et basses fréquences. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion).



**Figure3.19** : Diagrammes d'impédance des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées, obtenus au potentiel d'équilibre après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%. **a** : cordon de soudure (CSTU) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATU) ; **c** : métal de base (MBTU).

#### d. Observations microscopiques

Les figures 3.20a, b et c, présentent les micrographies des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200 après polissage et attaque chimique des échantillons.



**Figure 3.20 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de deux tôles usagées observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200.

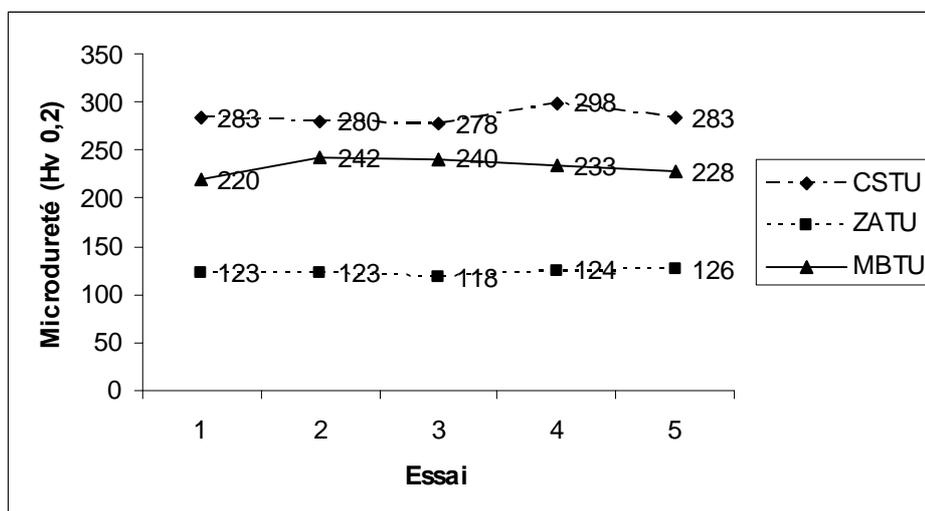
**a :** cordon de soudure (CSTU) ; **b :** zone affectée thermiquement (ZATU) ;  
**c :** métal de base (MBTU) .

L'observation microscopique du cordon de soudure de deux tôles usagées est ferrito-perlitique régulière. Dans cette zone, la concentration des îlots de perlites est plus importante que la concentration de la ferrite. La microstructure résultante de l'observation microscopique de la zone affectée thermiquement, par contre, est une structure qui est composée de perlite, de ferrite et d'austénite résiduelle. Dans cette zone, la concentration de la ferrite est plus importante que la concentration de la perlite.

Quand à la structure du métal de base, elle est ferrito-perlitique équiaxiale.

### e. Essais de microdureté

Les essais de microdureté réalisés sur les différentes zones de la soudure de deux tôles usagées sont réalisés sous une charge de 200g. Les différents résultats obtenus sont illustrés par la figure 3.21. Les valeurs moyennes de microdureté des différentes zones sont rassemblées dans le tableau 3.9.



**Figure 3.21 :** Microduretés des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées.

**Tableau 3.9 :** Microduretés moyennes des différentes zones de l'assemblage de deux tôles usagées.

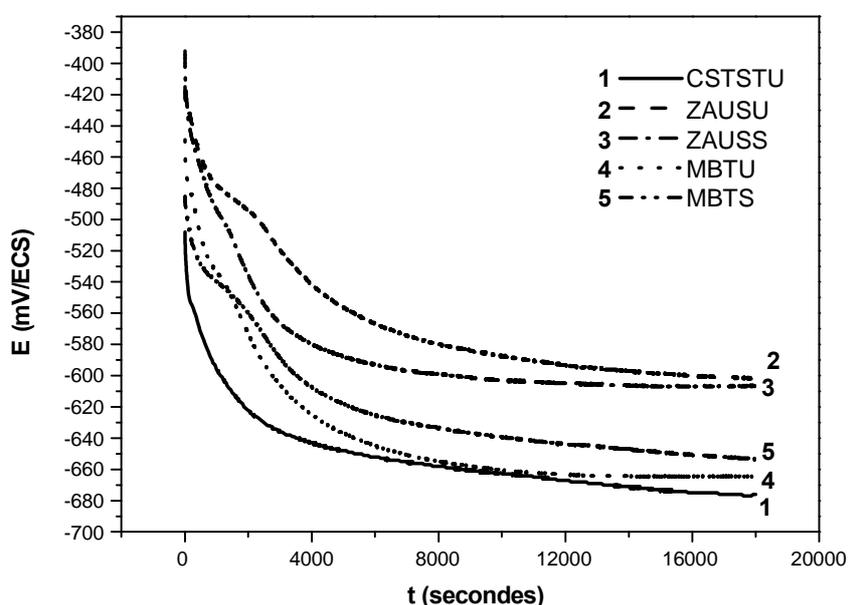
Assemblage	Zone	Microdureté moyenne (Hv <sub>0,2</sub> )
ATUTU	CSTU	284.4
	ZATU	122.8
	MBTU	232.6

L'analyse des résultats rassemblés dans le tableau 3.9 montre que la microdureté moyenne du cordon de soudure est supérieure à celles des deux autres zones. Cela est probablement dû à sa concentration élevée en perlite comparativement à celles des deux autres zones. On constate que la microdureté moyenne de la zone affectée thermiquement est la plus faible. Ceci est probablement dû à sa faible concentration en perlite et sa forte concentration en ferrite.

### III.1.4 Assemblage mixte

#### a. Courbes chronopotentiométriques

L'évolution des potentiels d'abandon  $E (i=0)$  relatifs aux électrodes de travail, réalisées à partir des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte (tôle saine + tôle usagée), est enregistrée en fonction du temps. Les courbes obtenues sont illustrées par la figure 3.22. Les potentiels d'abandon quasi-stationnaires enregistrés après 5 heures d'immersion des électrodes de travail dans un milieu NaCl à 3% sont représentés sur le tableau 3.10.



**Figure 3.22** : Courbes chronopotentiométriques des différentes zones de l'assemblage mixte réalisé de d'une tôle saine et d'une tôle usagée, tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.10** : Potentiels d'abandon des différentes zones de l'assemblage mixte.

Assemblage	Zone	Potentiel d'abandon (mV / ECS)
ATSTU	CSTSTU	-676
	ZAUSS	-603
	ZAUSU	-606
	MBTS	-664
	MBTU	-657

L'examen de la figure 3.22, montre que toutes les courbes chronopotentiométriques se composent de deux zones. Dans la première zone, la chute du potentiel est plus au moins rapide. Dans la deuxième zone, le potentiel tend vers une valeur limite quasi stationnaire. Les allures des courbes chronopotentiométriques des métaux de base et du cordon soudure sont très proches.

L'analyse du tableau 3.10, montre que les potentiels d'abandon quasi-stationnaires des zones affectées thermiquement sont plus positifs que ceux des autres zones.

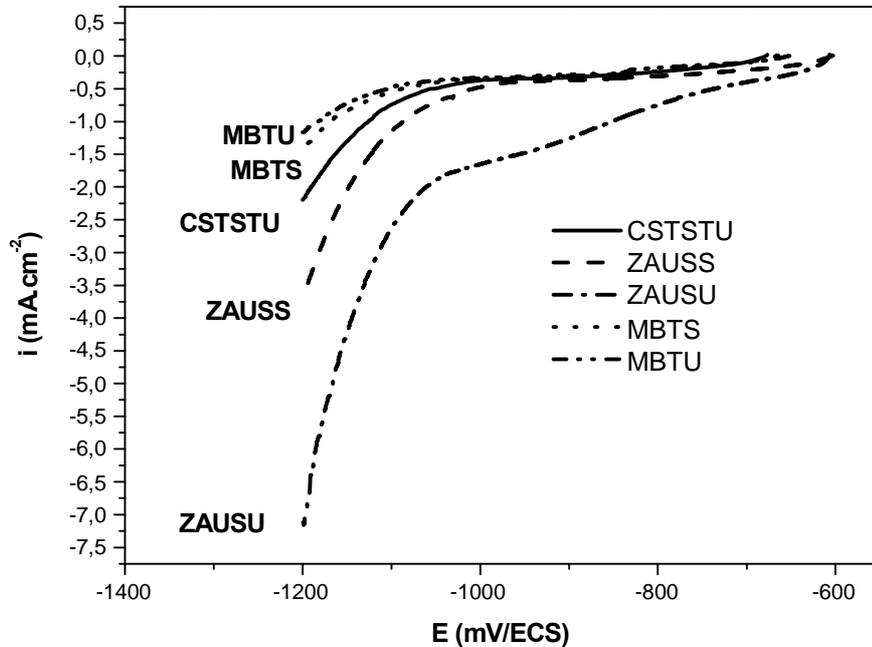
### **b. Voltamétrie**

Les essais de polarisations anodiques et cathodiques effectués pour les différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte ont été réalisés avec une vitesse de balayage de 0.5 mV/s après une immersion de 5 heures. Les tracés des courbes cathodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, -1200 \text{ mV/ECS}]$ . Et les tracés des courbes anodiques sont réalisés dans des domaines de balayage de potentiel :  $[E_{\text{équilibre}}, 200 \text{ mV/ECS}]$ .

Les différentes courbes anodiques et les différentes courbes cathodiques sont rassemblées dans les figures 3.23 et 3.24 respectivement.

### b. 1 Les courbes cathodiques

La figure 3.23, regroupe les courbes cathodiques des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte.



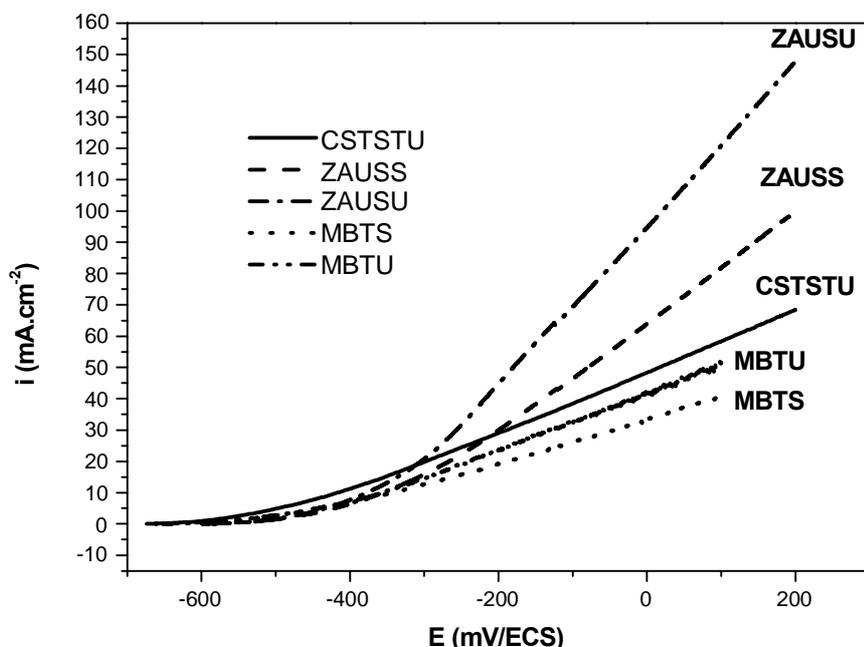
**Figure 3.23 :** Courbes cathodiques des différentes zones de l'assemblage mixte réalisé de d'une tôle saine et d'une tôle usagée, tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

L'analyse de la figure 3.23 montre que la hauteur du palier de diffusion de la zone affectée thermiquement (ZAUSU) est la plus importante. Donc, la réaction cathodique de la zone affectée thermiquement (ZAUAU) est la plus rapide.

On remarque sur les courbes cathodiques des différentes zones, une croissance rapide et continue de la densité de courant aux fortes surtensions cathodiques (de -1200 mV / ECS jusqu'à -1050 mV / ECS). Cette dernière est due à la réduction de l'eau et celle de l'oxygène dissous dans le milieu.

## b.2 Les courbes anodiques

La figure 3.24, rassemble les courbes anodiques des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte.



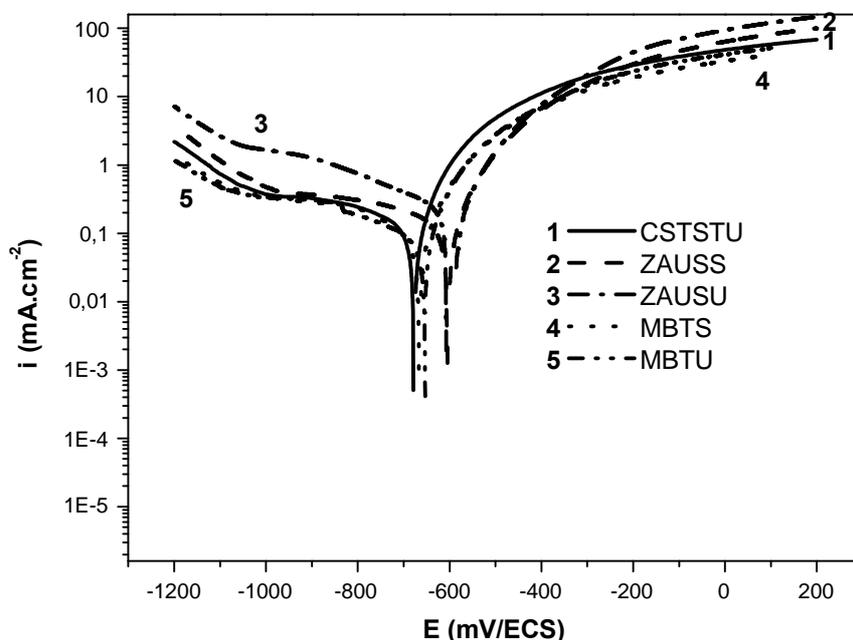
**Figure 3.24 :** Courbes anodiques des différentes zones de l'assemblage mixte réalisé de d'une tôle saine et d'une tôle usagée, tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

La figure 3.24, montre que les différentes zones subissent une corrosion qui est caractérisée par l'augmentation de la densité de courant de corrosion avec l'augmentation du potentiel anodique, d'où la dissolution continue du matériau. L'allure de la courbe anodique du cordon de soudure est proche de celles des métaux de base. Aux fortes surtensions (au-delà de -200 mV/ ECS), les zones affectées thermiquement présentent des densités de courant de corrosion très importantes comparativement aux autres zones. De ce fait, les réactions anodiques les plus rapides sont celles des zones affectées thermiquement.

## b.3 Courbes de Tafel

Les courbes de Tafel des différentes zones de l'assemblage mixte ont été réalisées à partir de l'exploitation des courbes anodiques et cathodiques de ces différentes zones. Ces tracés sont illustrés par la figure 3.25. L'exploitation des courbes de Tafel est nécessaire pour

déterminer le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) et la densité du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ). Ces derniers sont rassemblés dans le tableau 3.11.



**Figure 3.25 :** Courbes de Tafel des différentes zones de l'assemblage mixte réalisé par soudage d'une tôle saine à une tôle usagée, tracées à 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.11 :** Potentiels de corrosion et densités des courants de corrosion des différentes zones de la soudure d'un assemblage mixte.

Assemblage	Zone	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)
ATSTU	CSTSTU	180	-678
	ZAUSS	230	-604
	ZAUSU	241	-613
	MBTS	135	-668
	MBTU	144	-664

La courbe de Tafel du cordon de soudure et celles des métaux de base sont presque superposables.

L'examen du tableau 3.11 montre que les densités de courant de corrosion des zones affectées thermiquement sont très élevées par rapport à celles des autres zones. Probablement,

les couches d'oxyde qui se sont formées sur les zones affectées thermiquement sont moins résistantes à la détérioration.

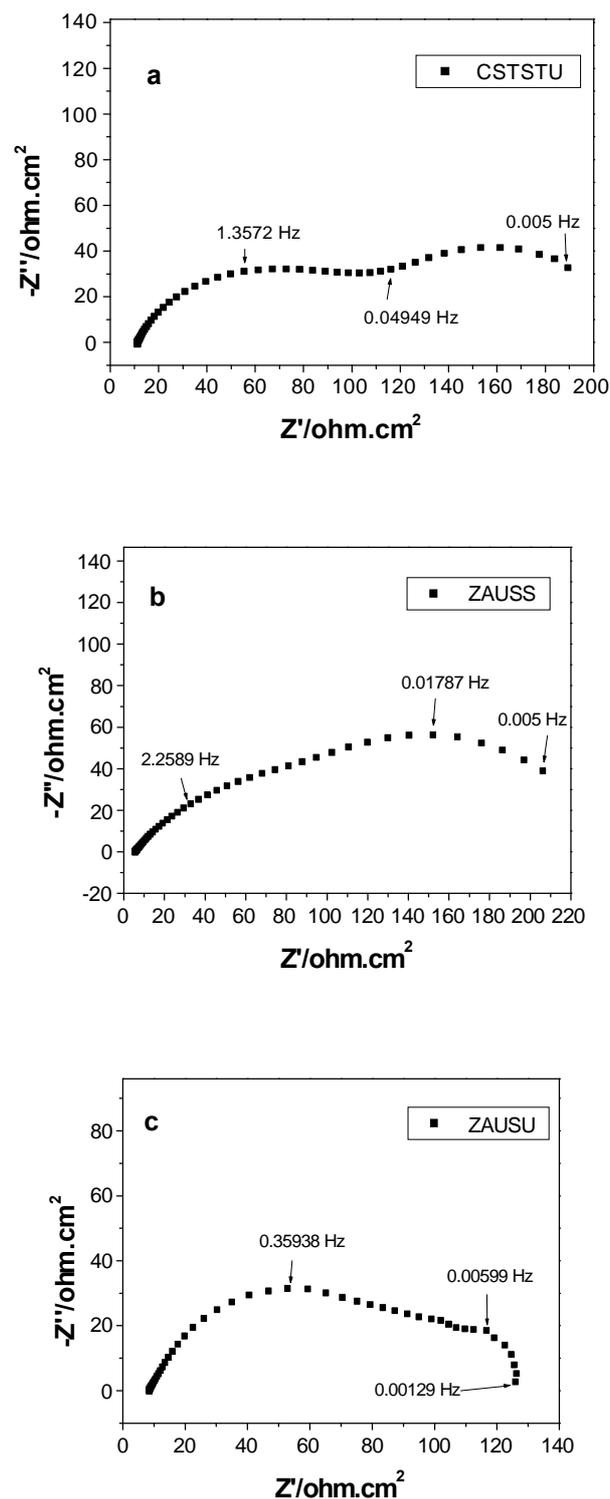
### c. Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les mesures d'impédance ont été réalisées dans un domaine de fréquence variant, de 10 KHz à 5 mHz pour le cordon de soudure et la zone affectée thermiquement (ZAUSS), et de 10 KHz à 1 mHz pour la zone affectée thermiquement (ZAUSU) après 5 heures d'immersion dans la solution. Les différents diagrammes sont illustrés par les figures 3.26a, b et c.

Le diagramme d'impédance électrochimique du cordon de soudure de l'assemblage mixte obtenu au potentiel d'équilibre, après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%, est composé de deux boucles capacitives aux hautes fréquences **HF** et aux basses fréquences **BF**. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). On constate que les deux boucles ne se distinguent pas clairement, et le rayon de la deuxième boucle est plus grand que celui de la première. Ce qui signifie une augmentation de la résistance à la corrosion du cordon de soudure.

Le diagramme d'impédance électrochimique de la zone affectée thermiquement (ZAUSS) obtenu au potentiel d'équilibre est composé de deux boucles capacitives, aux hautes et basses fréquences, lesquelles ne se distinguent pas clairement. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). On constate que le rayon de la deuxième boucle est plus grand que celui de la première, ce qui signifie une augmentation de la résistance à la corrosion de la zone affectée thermiquement (ZAUSS).

Le diagramme d'impédance électrochimique de la zone affectée thermiquement (ZAUSU) ,obtenu au potentiel d'équilibre, est composé de deux boucles capacitives aux hautes fréquences **HF** et aux basses fréquences **BF**. Dans ce cas la cinétique est régie par un régime mixte (transfert et diffusion). Comme le rayon de la deuxième boucle est plus faible que celui de la première, donc la vitesse de corrosion augmente.



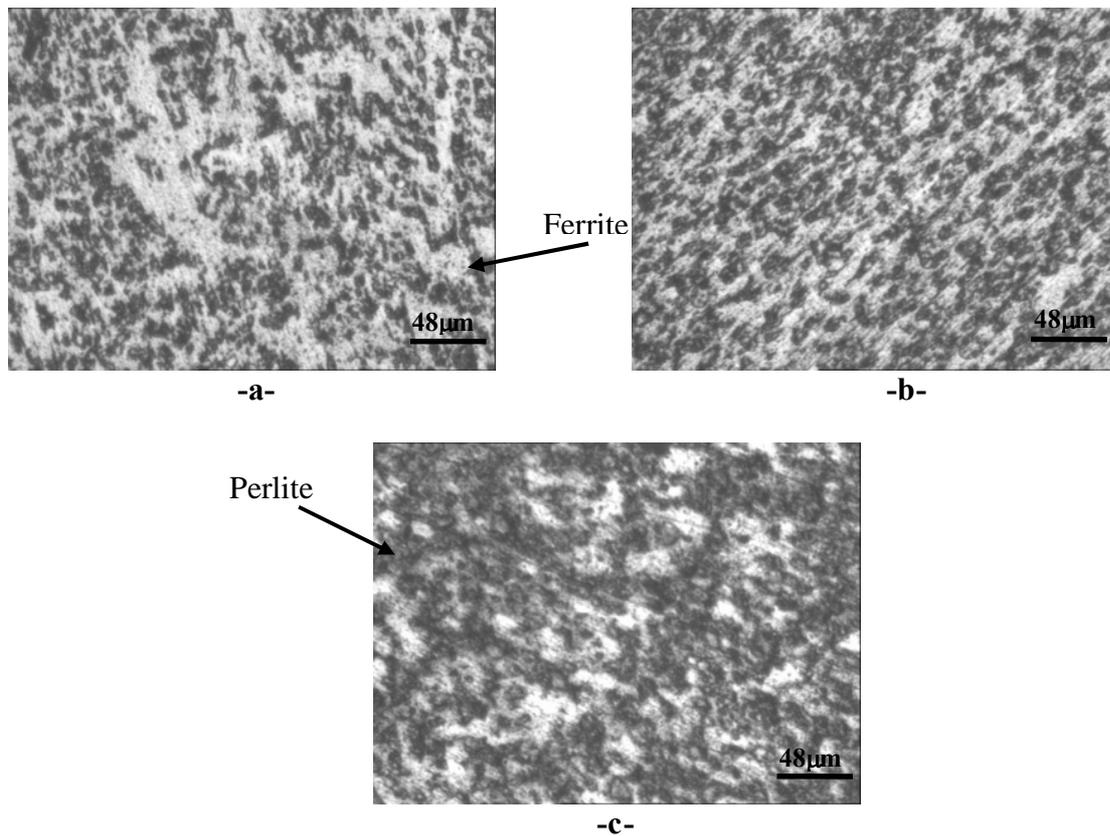
**Figure 3.26 :** Diagrammes d'impédance des différentes zones de l'assemblage mixte, obtenus au potentiel d'équilibre après un maintien de 5 heures à 1000 tr/mn dans une solution NaCl à 3%.

**a :** cordon de soudure (CSTSTU) ; **b :** zone affectée thermiquement (ZAUSS) ;

**c :** zone affectée thermiquement (ZAUSU).

#### d. Observations microscopiques

Les figures 3.27a, b et c, illustrent les micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200 après polissage et attaque chimique des échantillons.



**Figure 3.27** : Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte observées à l'aide d'un microscope optique avec un grossissement 200.

**a** : cordon de soudure (CSTSTU) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZAUSS) ;

**c** : zone affectée thermiquement (ZAUSU).

L'examen des figures 3.27a, b et c, montre que les structures résultantes de l'observation microscopique des différentes zones sont composées essentiellement de deux constituants ; de la ferrite et de la perlite. La structure du cordon de soudure est composée de matrice ferritique sur laquelle on observe de petits îlots de perlite. Par ailleurs, les microstructures des zones affectées thermiquement, ZAUSS et ZAUSU, sont composées de ferrite, de perlite et probablement d'austénite résiduelle. La quantité de perlite observée sur la zone (ZAUSU) est plus importante que celle observée sur la zone (ZAUSS).

**e. Essais de microdureté**

Les essais de microdureté réalisés sur les différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte sont réalisés sous une charge de 200g. Les différents résultats sont illustrés par la figure 3.28. Les valeurs moyennes de microdureté des différentes zones sont rassemblées dans le tableau 3.12.

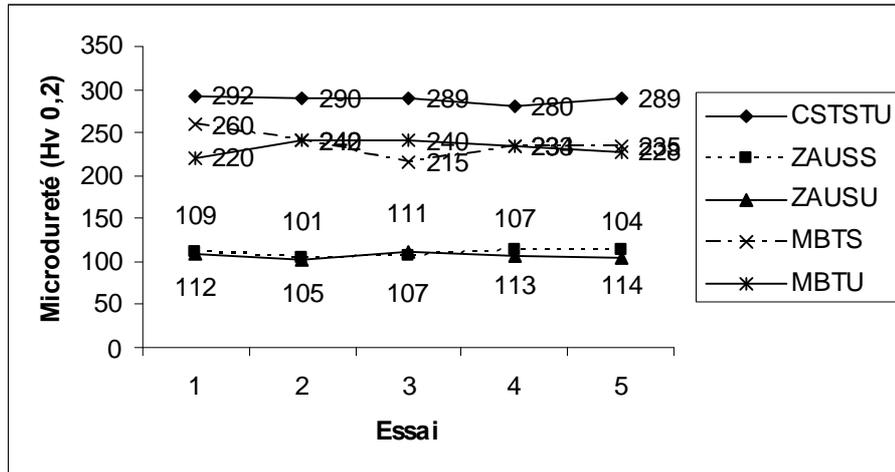


Figure 3.28 : Microduretés des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte.

Tableau 3.12 : Microduretés moyennes des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte.

Assemblage	Zone	Microdureté moyenne (Hv <sub>0,2</sub> )
ATSTU	CSTSTU	288
	ZAUSS	110.2
	ZAUSU	106.4
	MBTS	236.8
	MBTU	232.6

Les microduretés des zones affectées thermiquement sont très proches. Ces dernières sont plus faibles que celles des autres zones. Ceci est probablement dû aux faibles concentrations des zones affectées thermiquement en perlite et leurs fortes concentrations en ferrite.

L'analyse des résultats rassemblés dans le tableau 3.12 montre que la microdureté moyenne du cordon de soudure est supérieure à celles des métaux de base. Ce qui est probablement dû à sa structure fine comparativement à celles des métaux de base.

## Conclusion

Cette partie est consacrée à la détermination de la zone la plus sensible à la corrosion et à la compréhension des mécanismes ayant lieu à l'interface métal/ solution.

Les essais électrochimiques ont montré que la zone affectée thermiquement est la plus sensible à la corrosion. Et pour mieux interpréter ce résultat, des observations microscopiques et des essais de microdureté ont été utilisés.

Les grains qui constituent les cordons de soudure sont plus fins que ceux qui constituent les métaux de base. Ceci explique pourquoi les métaux de base résistent mieux à la corrosion comparativement aux cordons de soudure. Car la résistance à la corrosion du matériau devient moins importante lorsque les grains sont fins. Puisque dans les joints de grains, les atomes n'occupent pas des positions qui correspondent aux nœuds des réseaux cristallographiques des grains adjacents, leur énergie est légèrement plus élevée que celle des atomes situés aux nœuds du réseaux cristallin ; le potentiel de dissolution des joints de grains est donc inférieur (anode) à celui des grains (cathode) [51]. Plus la taille des grains est affinée, plus la surface de joints de grains par unité de volume est élevée. Donc la corrosion est plus importante dans les structures fines.

Le taux de ferrite dans les zones affectées thermiquement est plus important que celui existant dans les autres zones. Ceci explique pourquoi les zones affectées thermiquement sont les plus sensibles à la corrosion. Dans le milieu HCl et d'autre milieux chlorurés, la corrosion occupe préférentiellement la phase ferritique [52]. Dans l'étude « Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat- affected zones of duplex stainless steels », Horng- Yih Liou *et al* [31] ont déduis que la corrosion préférentielle de la phase ferritique, en absence de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, est probablement dûe à la forte concentration des chlorures dans l'électrolyte (40wt% CaCl). Donc, dans ce cas, la faible résistance à la corrosion des zones affectées thermiquement est probablement dûe aux fortes concentrations de ces dernières en ferrite comparativement aux autres zones.

Pour bien montrer que les structures les plus fines sont les structures des cordons de soudure et les taux de ferrite les plus élevés sont ceux des zones affectées thermiquement, des essais de microdureté ont été réalisés. Les microduretés moyennes les plus élevées étaient celles des cordons de soudure. Les matériaux, en particulier ceux de structure c.c. (cubique

centré) comme le fer et les aciers, ont une limite d'élasticité dont la valeur dépend de la taille des grains, et qui est déterminée par la relation de Hall- Petch :

$$\mathbf{Re}_{0,2} = \sigma_0 + k\mathbf{d}^{-1/2} \quad \mathbf{(3. 2)}$$

Où  $Re_{0,2}$  = limite d'élasticité conventionnelle,

$\sigma_0$  = constante dont les dimensions sont celles d'une contrainte,

$k$  = paramètre, appelé coefficient de Petch, dont la valeur dépend du matériau,

$d$  = taille moyenne des grains.

L'augmentation de la limite d'élasticité quand la taille des grains diminue est due au fait que les joints de grains sont des obstacles au mouvement des dislocations. Quand, dans les grains favorablement orientés, les premières dislocations sont mises en mouvement à la limite d'élasticité, elles s'empilent contre les joints de grains et il faut exercer une contrainte plus élevée pour qu'elles franchissent ces joints et se propagent dans les grains voisins. Plus la taille des grains est fine, plus la surface de joints de grains par unité de volume de matériau est élevée, donc y a plus d'obstacles au déplacement des dislocations [52]. Ceci confirme que plus les grains sont fins, plus la dureté du matériau est plus élevée. Donc les grains les plus fins sont ceux des cordons de soudure.

Les microduretés enregistrées pour les zones affectées thermiquement, sont les plus basses comparativement à celles enregistrées pour les autres zones. Ceci est probablement dû à la faible concentration de cette dernière en perlite et sa forte concentration en ferrite.

## III.2 Évolution de la corrosion dans un milieu NaCl à 3%

Le suivi de l'évolution de la corrosion des différentes zones a été réalisé par des observations microscopiques. Ceci après polissage mécanique puis immersion des échantillons, pendant trois jours et dix jours, dans une solution de NaCl à 3%. Le but de ce suivi est de déterminer les différentes formes de corrosion qui puissent existées sur les différentes zones qui constituent les assemblages soudés.

Dans cette partie, les quatre types d'assemblages ont été étudiés indépendamment.

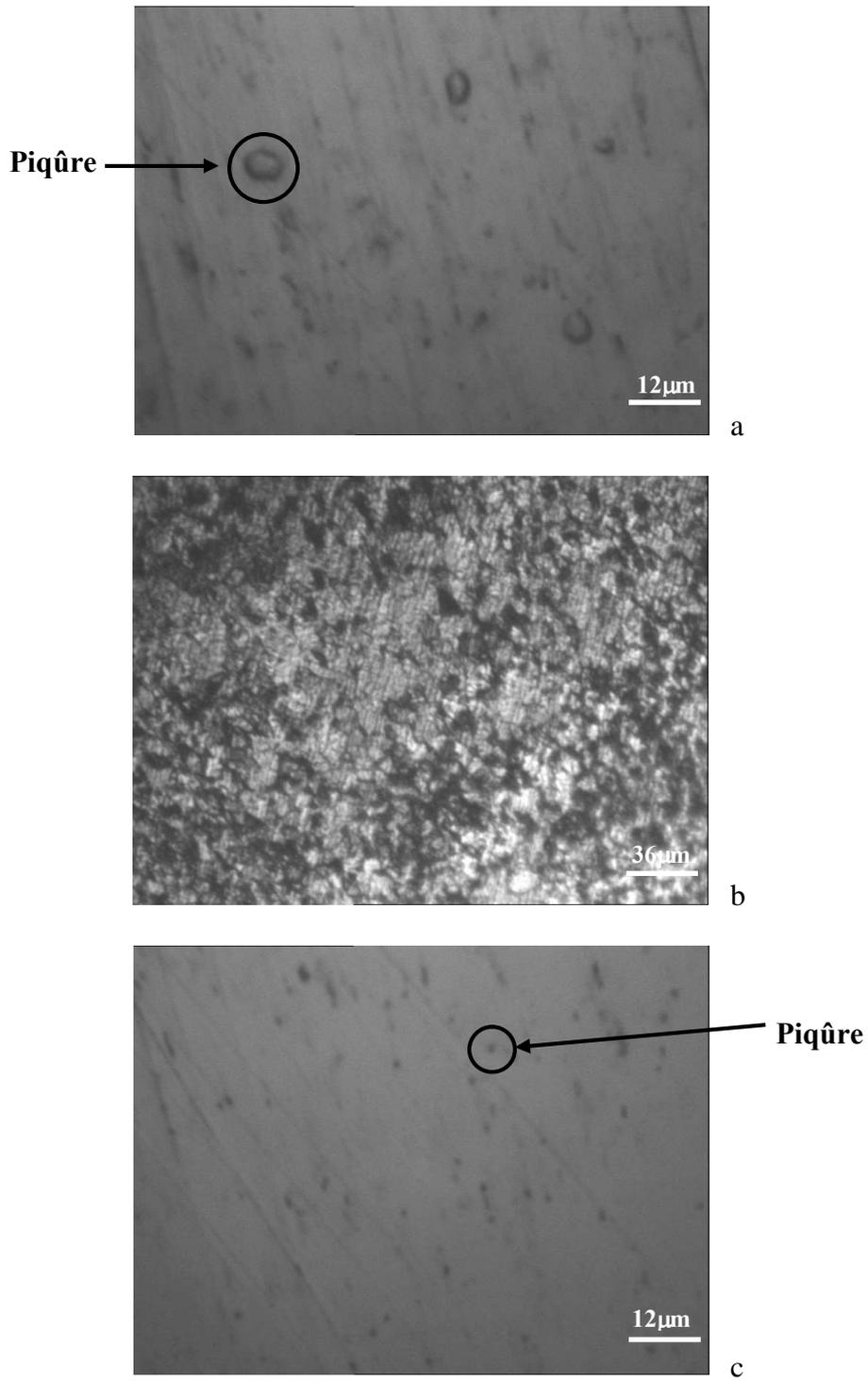
### III.2.1 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure de la tôle de livraison

Les figures 3.29 et 3.30 rassemblent les micrographies des trois zones qui constituent la soudure de la tôle de livraison, respectivement, après trois jours et dix jours d'immersion dans une solution NaCl à 3%.

Les observations microscopiques des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison mettent en évidence l'existence des piqûres sur le cordon de soudure et l'initiation de ces dernières sur le métal de base. La corrosion de la zone affectée thermiquement est plus intense que celles des deux autres zones.

Après dix jours d'immersion, la corrosion dans les différents échantillons est plus intense que celle observée après trois jours. Des piqûres se sont développées sur le cordon de soudure et le métal de base de la tôle de livraison, et la corrosion intergranulaire s'est développée sur la zone affectée thermiquement.

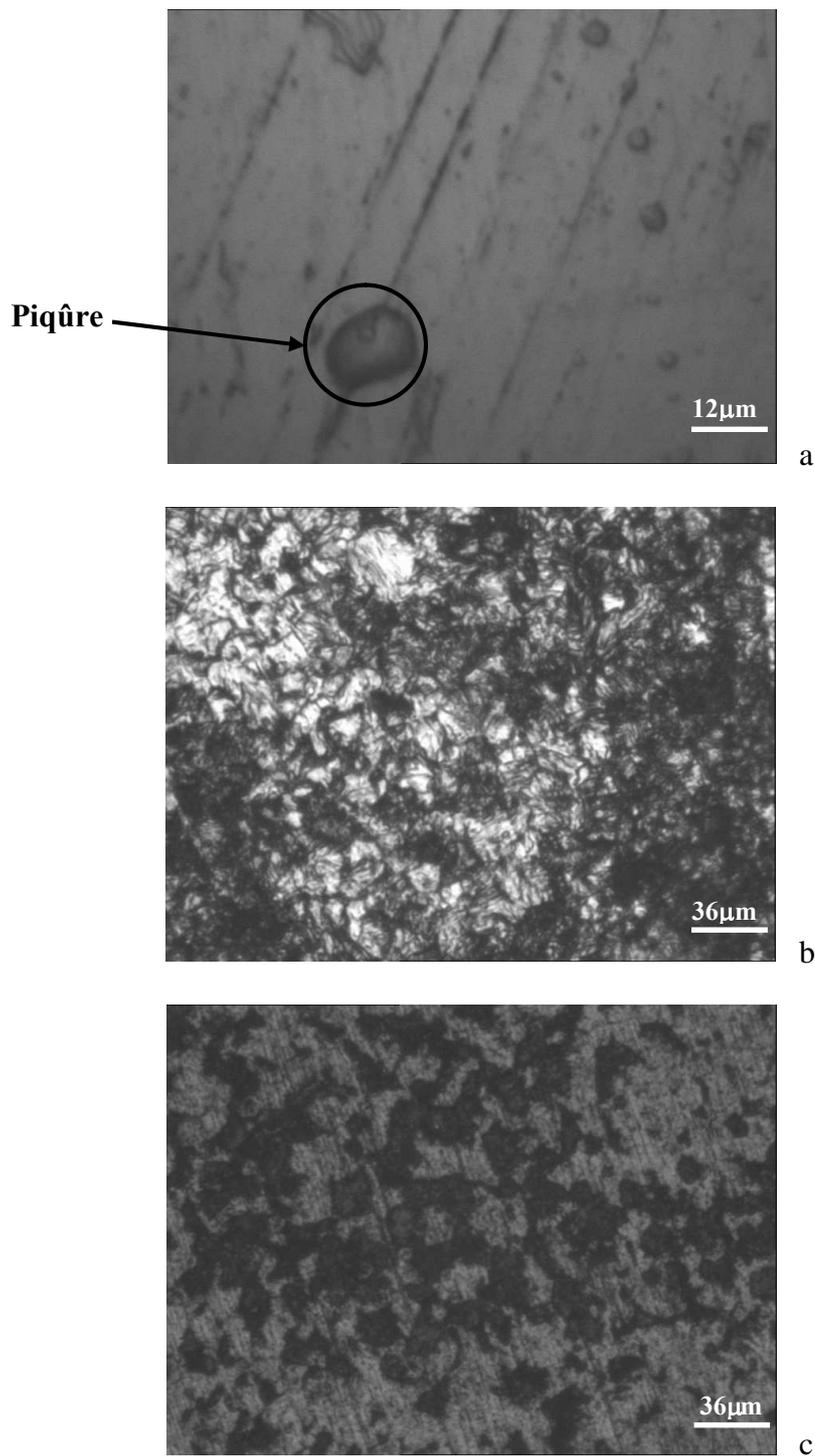
D'après les figures 3.29 et 3.30, on déduit que la zone affectée thermiquement est plus sensible à la corrosion. Ceci est probablement dû à sa structure qui se compose d'un taux de ferrite plus élevé que ceux des deux autres zones.



**Figure 3.29** : Micrographies des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison, observées à l'aide d'un microscope optique, après trois jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%.

**a** : cordon de soudure (CSTL) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATL) ;

**c** : métal de base (MBTL) ;



**Figure 3.30** : Micrographies des différentes zones de la soudure de la tôle de livraison, observées à l'aide d'un microscope optique, après dix jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%.

**a** : cordon de soudure (CSTL) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATL) ;

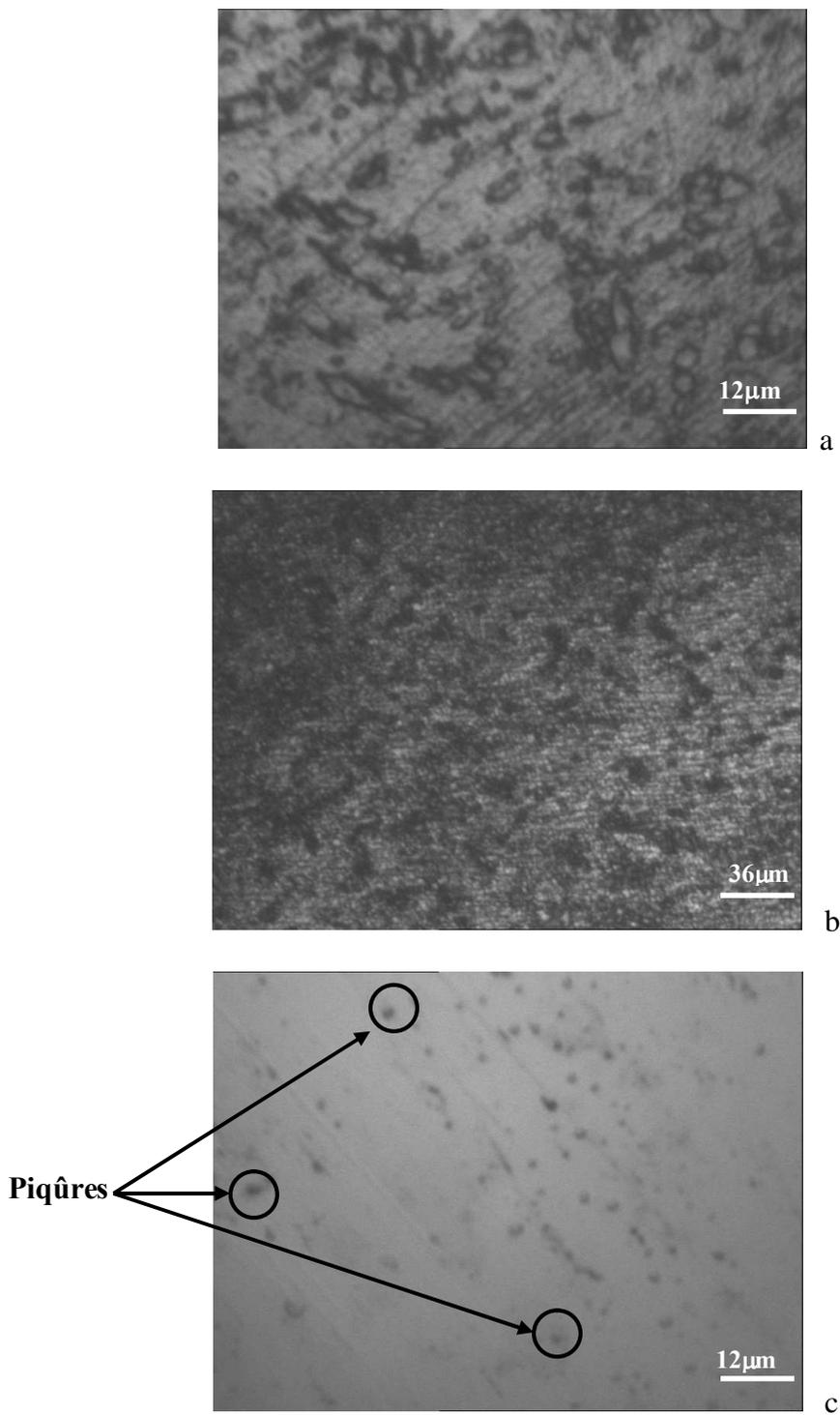
**c** : métal de base (MBTL) ;

### III.2.2 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure de deux tôles saines

Les figures 3.31 et 3.32 rassemblent les micrographies des trois zones qui constituent la soudure de deux tôles saines, respectivement, après trois jours et dix jours d'immersion dans une solution NaCl à 3%.

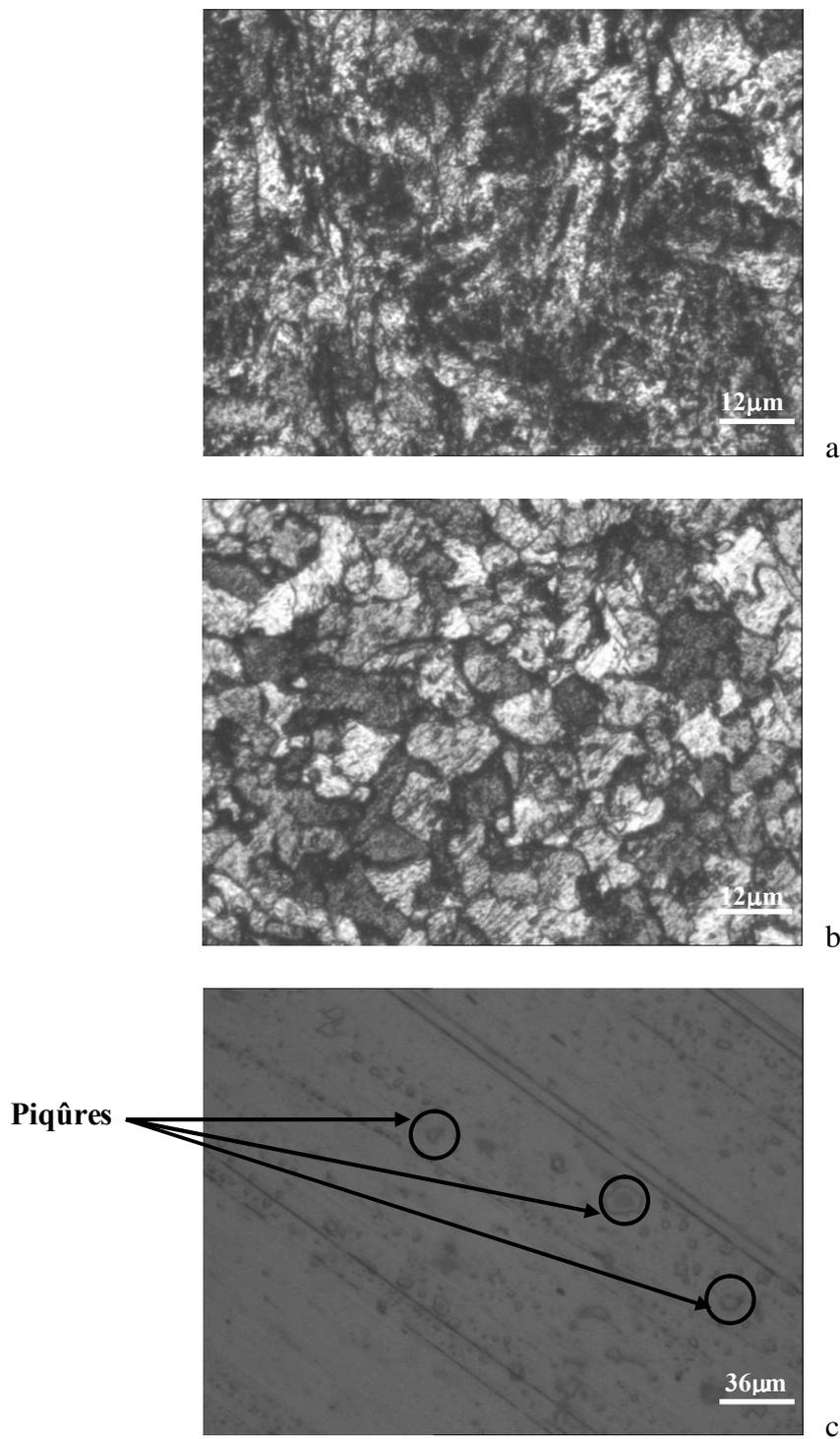
Après trois jours d'immersion du cordon de soudure dans une solution NaCl à 3%, la micrographie de ce dernier présente une attaque intergranulaire, c'est-à-dire que la dissolution dans cette zone est préférentielle aux joints de grains. D'après l'observation microscopique de la zone affectée thermiquement, on constate que la corrosion dans cette zone est plus intense que celle observée pour le cordon de soudure. Contrairement à la micrographie du cordon de soudure, l'observation microscopique du métal de base met en évidence l'initiation des piqûres sur cette zone après trois jours de sont immersion.

Après dix jours d'immersion, la corrosion dans les différents échantillons est plus intense que celle observée après trois jours d'immersion. On constate une forte corrosion intergranulaire dans le cordon de soudure et dans la zone affectée thermiquement et l'augmentation de la taille des piqûres sur le métal de base.



**Figure 3.31 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage de deux tôles saines, observées à l'aide d'un microscope optique, après trois jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%. **a** : cordon de soudure (CSTS) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATS) ;

**c** : métal de base (MBTS) ;



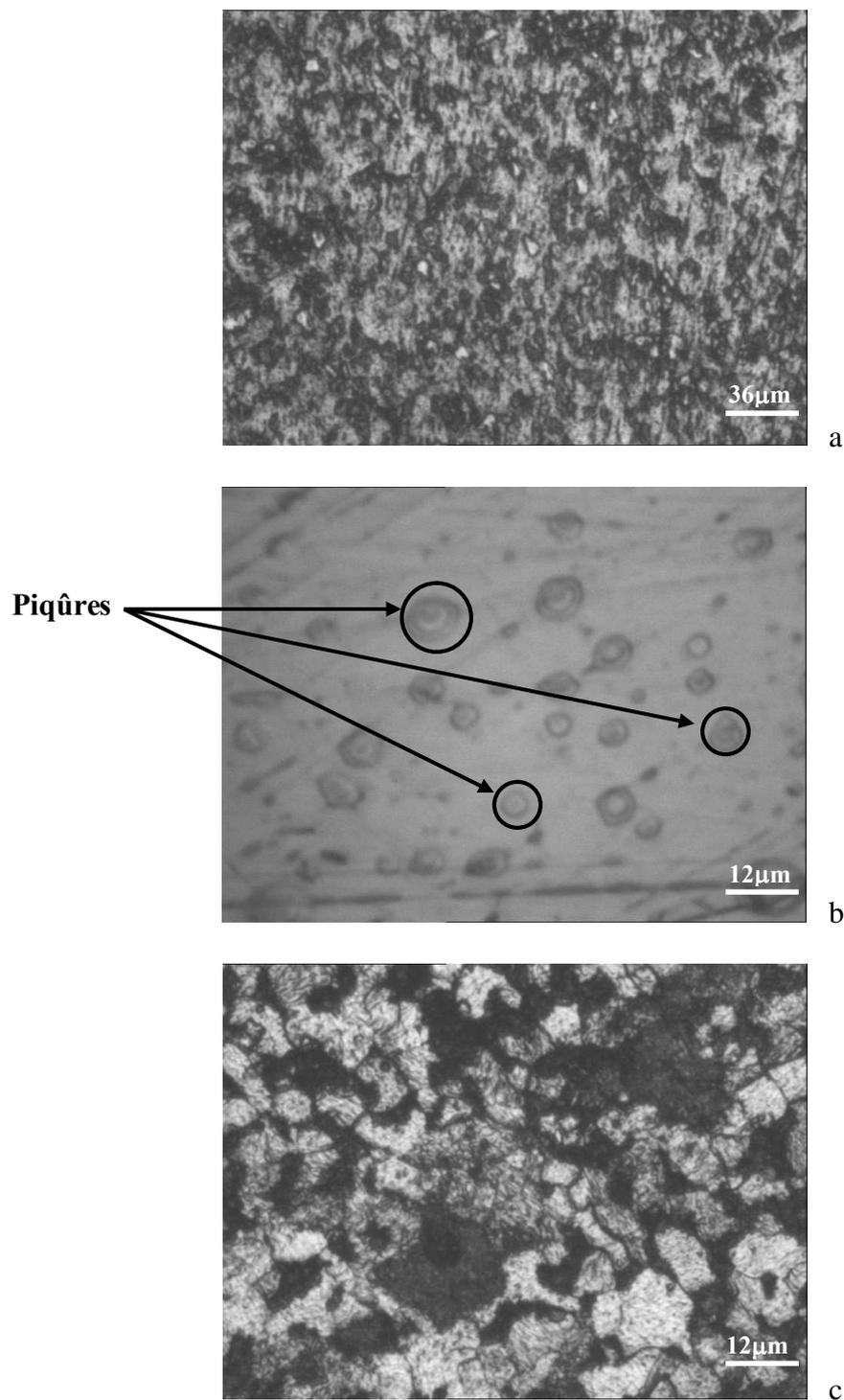
**Figure 3.32 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage de deux tôles saines, observées à l'aide d'un microscope optique, après dix jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%. **a** : cordon de soudure (CSTS) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATS) ;  
**c** : métal de base (MBTS) ;

### **III.2.3 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure de deux tôles usagées**

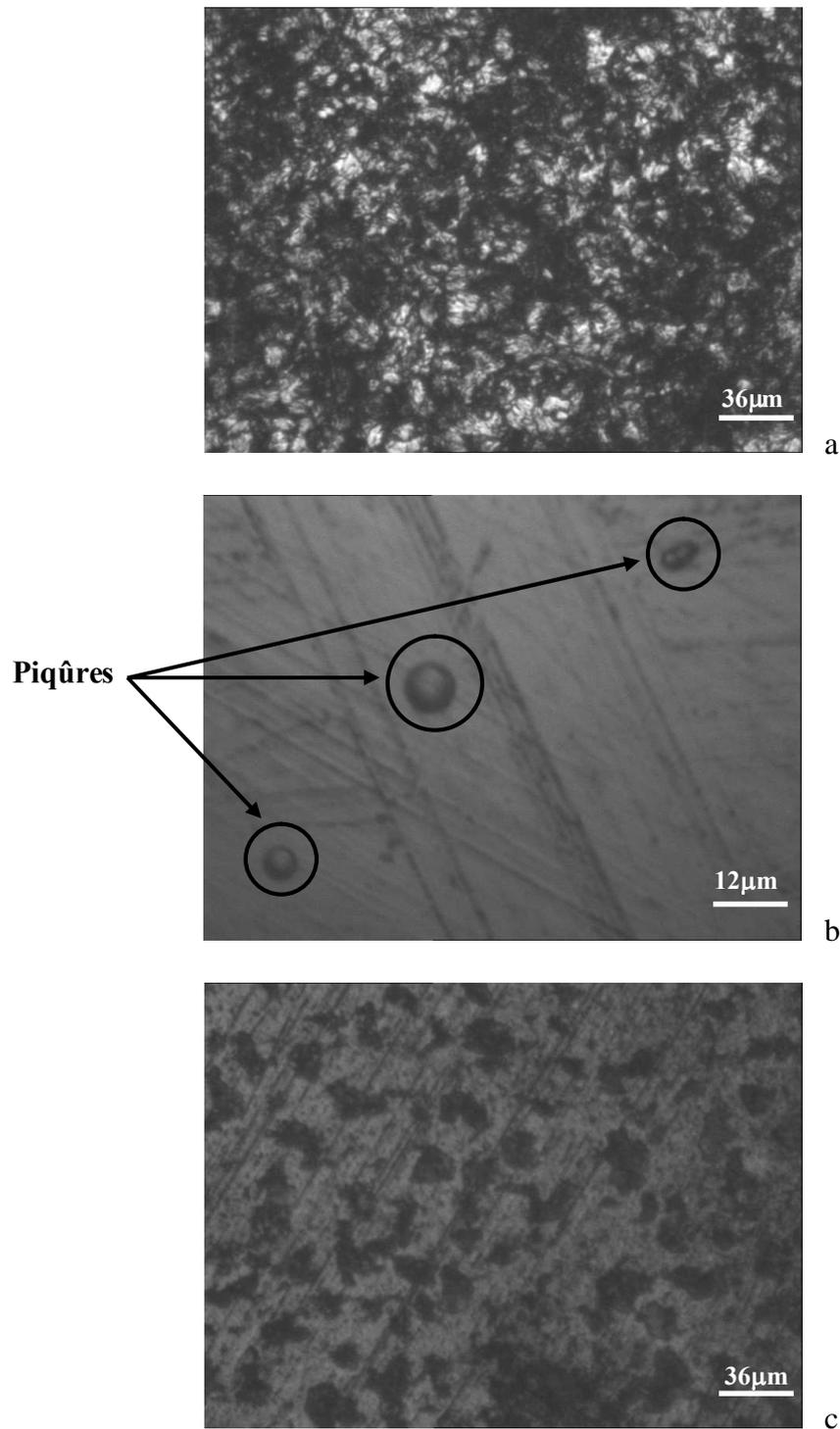
Les figures 3.33 et 3.34 rassemblent les micrographies des trois zones qui constituent la soudure de deux tôles usagées après trois jours et dix jours d'immersion dans une solution NaCl à 3% respectivement.

Après trois jours d'immersion du cordon de soudure et du métal de base dans la solution, les micrographies de ces derniers révèlent une attaque intergranulaire sur ces zones. D'après l'observation microscopique de la zone affectée thermiquement, on constate que la corrosion dans cette zone s'initie sous forme de piqûres.

Après dix jours d'immersion, la corrosion dans les différents échantillons est plus intense que celle observée après trois jours d'immersion. On constate une forte corrosion intergranulaire du cordon de soudure et du métal de base et l'augmentation de la taille des piqûres sur la zone affectée thermiquement.



**Figure 3.33 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage de deux tôles usagées, observées à l'aide d'un microscope optique, après trois jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%. **a** : cordon de soudure (CSTU) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATU) ; **c** : métal de base (MBTU) ;



**Figure 3.34 :** Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage de deux tôles usagées, observées à l'aide d'un microscope optique, après dix jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%. **a** : cordon de soudure (CSTU) ; **b** : zone affectée thermiquement (ZATU) ; **c** : métal de base (MBTU) ;

### III.2.4 Évolution de la corrosion des différentes zones qui constituent la soudure d'un assemblage mixte

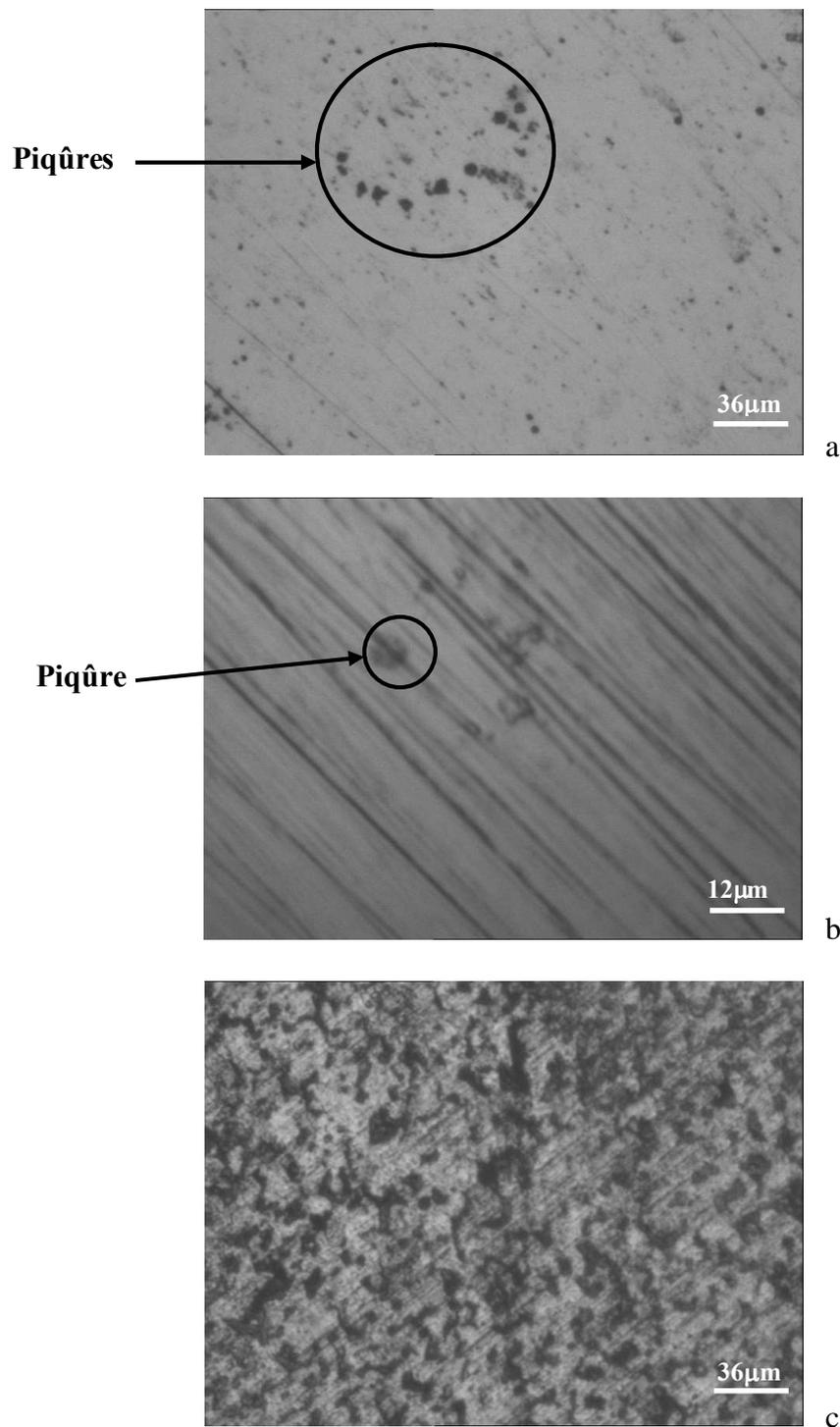
Les figures 3.35 et 3.36 rassemblent les micrographies des trois zones qui constituent la soudure de l'assemblage mixte après trois jours et dix jours d'immersion dans une solution NaCl à 3% respectivement.

Après trois jours d'immersion du cordon de soudure et de la zone affectée thermiquement (ZAUSS) dans la solution, les observations microscopiques mettent en évidence la présence des piqûres sur ces dernières. Contrairement à ces deux zones, la micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAUSU) présente une attaque intergranulaire.

Après dix jours d'immersion, on constate que la corrosion dans les différentes zones est plus intense que celle observée pour ces dernières après trois jours d'immersion. On constate le développement de la corrosion intergranulaire sur le cordon de soudure et la zone affectée thermiquement (ZAUSU), et le développement de la corrosion par piqûres sur la zone affectée thermiquement (ZAUSS).

## Conclusion

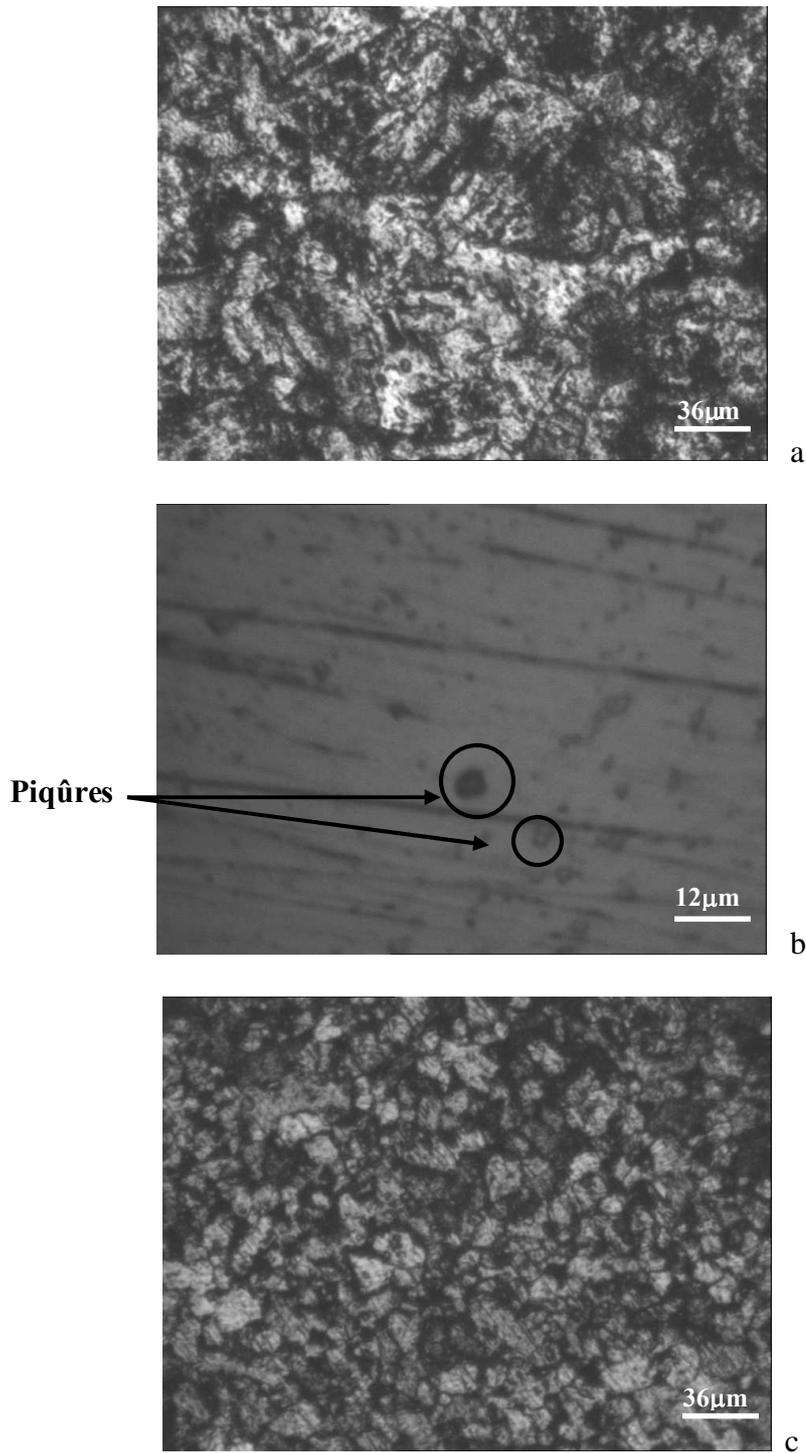
Dans le milieu NaCl à 3%, la corrosion des différentes zones des tôles soudées peut exister sous deux formes ; par piqûres ou intergranulaire. La corrosion par piqûres est due à la présence d'anions agressifs  $\text{Cl}^-$  dans la solution, et la corrosion intergranulaire est probablement provoquée par la ségrégation des impuretés telles que le soufre et le phosphore aux frontières de grains [9-11] et la précipitation des carbures. L'absence du palier de passivation et l'augmentation rapide du courant de corrosion, lors de la polarisation anodique, sont peut être dues à la dépassivation des échantillons par l'action des ions chlorure soit globalement sur toute la surface, soit localisée avec la formation des piqûres.



**Figure 3.35** : Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte, observées à l'aide d'un microscope optique, après trois jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%.

**a** : cordon de soudure (CSTSTU) ; **b** : zone affectée thermiquement du côté sain (ZAUSS) ;

**c** : zone affectée thermiquement du côté usagé (ZAUSU) ;



**Figure 3.36** : Micrographies des différentes zones de la soudure de l'assemblage mixte, observées à l'aide d'un microscope optique, après dix jours d'immersion dans une solution de NaCl à 3%.

**a** : cordon de soudure (CSTSTU) ; **b** : zone affectée thermiquement du coté sain (ZAUSS) ;

**c** : zone affectée thermiquement du coté usagé (ZAUSU) ;

### III.3 Comparaison électrochimique entre les différents assemblages

Le soudage est une opération qui consiste à poser un cordon fondu liant les bords de deux pièces. Il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Son champ d'application est très large, il est utilisé en constructions navale, automobile, aéronautique et autres.

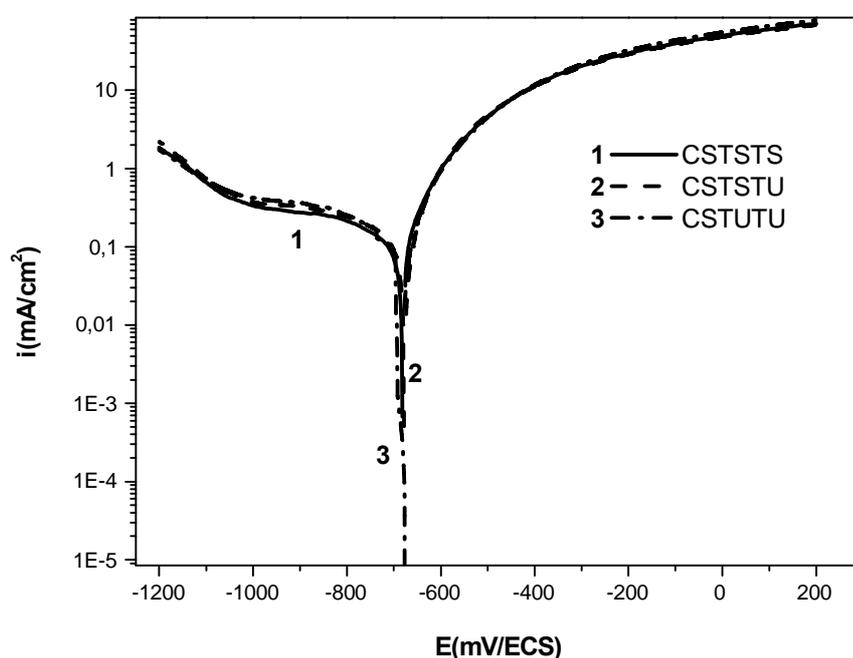
Cette présente partie a été consacrée à l'étude de la corrosion des soudures des tôles qui constituent les coques des navires. Ceci dans le but de répondre à la question suivante :

- du point de vue électrochimique, en cas de déficit de matière, est-il possible de remplacer une partie détériorée d'une coque d'un navire par une tôle usagée (moins usée)?

Pour répondre à cette question, une comparaison d'une part entre les cordons de soudure des différents assemblages et d'une autre part entre les zones affectées thermiquement qui constituent les soudures de ces derniers a été réalisée.

### III.3.1 Comparaison électrochimique entre les cordons de soudures des différents assemblages

Les courbes de Tafel des différents cordons de soudure ont été tracées à partir des courbes anodiques et des courbes cathodiques obtenues dans cette étude, à partir du potentiel d'équilibre. Le but de l'exploitation des courbes de Tafel est de comparer entre les résistances à la corrosion des différents cordons. Les tracés des courbes de Tafel sont représentés sur la figure 3.37. Le potentiel de corrosion et la densité de courant de corrosion, de chaque cordon, sont rassemblés dans le tableau 3.13.



**Figure 3.37:** Courbes de Tafel des cordons de soudure des différents assemblages, tracées avec une vitesse de rotation de 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.13 :** Potentiels de corrosion et densités des courants de corrosion des différents cordons de soudure.

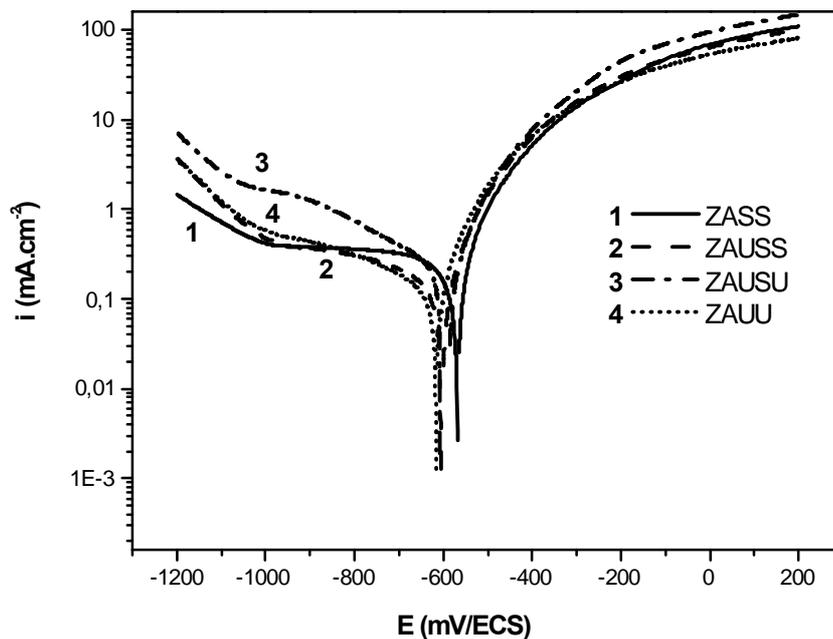
	Zone	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)
Cordon de soudure	CSTS	170	-678
	CSTSTU	180	-678
	CSTU	178	-677

La figure 3.37 montre que les courbes de Tafel des trois cordons de soudure sont superposables.

L'examen du tableau 3.13, montre que les densités de courant de corrosion et les potentiels de corrosion des cordons de soudure sont très proches.

### III.3.2 Comparaison électrochimique entre les zones affectées thermiquement des différents assemblages

La figure 3.38 rassemble les courbes de Tafel réalisées à partir des courbes anodiques et des courbes cathodiques des différentes zones affectées thermiquement. L'exploitation des courbes de Tafel est nécessaire pour déterminer, pour chaque zone, le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) et la densité du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ). Les résultats de l'exploitation des courbes de Tafel, sont rassemblés dans le tableau 3.14.



**Figure 3.38:** Courbes de Tafel des différentes zones affectées thermiquement des différents assemblages, tracées avec une vitesse de rotation de 1000 tr / min dans une solution de NaCl à 3%.

**Tableau 3.14 :** Potentiels de corrosion et densités des courants de corrosion des différentes zones affectées thermiquement.

	Zone	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV/ECS)
Zone affectée	ZASS	199	-597
	ZAUSS	230	-604
	ZAUSU	241	-613
	ZATU	206	-608

L'examen du tableau 3.14, montre que les potentiels de corrosion des différentes zones affectées thermiquement sont très proches. Contrairement à ces derniers, les densités de courant de corrosion des zones affectées thermiquement de l'assemblage mixte sont assez élevées comparativement à celles des deux autres assemblages.

## CONCLUSION

Pour atteindre l'objectif de cette partie, une comparaison des résistances à la corrosion des soudures des différents assemblages a été réalisée. Pour ce faire, trois types d'assemblage ont été utilisés ; l'assemblage de deux tôles saines, l'assemblage de deux tôles usagées et l'assemblage mixte.

La comparaison entre les résistances à la corrosion des différents cordons de soudures montre que ces dernières sont très proches. Contrairement à ce constat, l'étude comparative des différentes zones affectées thermiquement montre que, les densités de courant de corrosion des zones affectées thermiquement de l'assemblage mixte sont plus élevées que celles des autres assemblages. Donc, du point de vue électrochimique, l'assemblage homogène est meilleur que l'assemblage mixte.

## Références bibliographiques

[1] N. LE BOZEC,

Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, « Réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle. Influence du biofilm sur les processus de corrosion », 2000, p. 5.

[2] D. LANDOLT, « CORROSION ET CHIMIE DES SURFACES DES MÉTAUX », Presses polytechniques et universitaires romandes Lausanne, 1993, p. 2.

[3] K.E. HEUSLER, D. LANDOLT, S. TRASATTI, Pure and Appl. Chem. Vol. **61**, 1989, p. 19.

[4] M. ROCHE, « Protection contre la corrosion des ouvrages maritimes pétroliers » Publié par l'Institut Français Du Pétrole, EDITIONS TECHNIP, Paris, 1978, p. 17.

[5] J. PHILIBERT, A. VIGNES, Y. BRÉCHET, P. COMBRADE, «MÉTALLURGIE. Du minerais au matériau », DUNOD, 2<sup>e</sup> édition, Paris, 2002, p. 959.

[6] J.C. SCULLY, « Corrosion. Protection. Principes fondamentaux », MASSON Paris Milan Barcelone, 1995, p. 93.

[7] B.F. BROWN, A. AGRAWAL, « Localised Corrosion », eds. R. W. Staehle, NACE, Houston, Texas, 1974.

[8] C. NARGEL, «CORROSION DE L'ALUMINIUM », DUNOD, Paris, 1999, p. 92.

[9] S. TRIGWELL, G. SELVADURAY, "Effects of welding on the passive oxide film of electropolished 316L stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, vol **166**, 2005, p. 30.

- [10] A. JOSHI, D.F. STEIN, “Chemistry of grain boundaries and its relation to intergranular corrosion of austenitic stainless steels” Corrosion-NACE 28, vol. **9**, 1972, p. 321.
- [11] V. PILOUS, R. KOVARIK, M. KOUTNIK, “Examination of the heat-affected zone by Auger electron spectroscopy”, Weld. Int. vol. **1**, 1989, p. 76.
- [12] A. JOSHI and D.F. STEIN, Corrosion, vol. **28**, 1972, p. 321.
- [13] A. RAHARINAIVO, G. ARLIGUIE, T. CHAUSSADENT, G. GRIMALDI, V. POLLET, G. TACHÉ, « LA CORROSION ET LA PROTECTIN DES ACIERS DANS LE BÉTON », Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, Paris, 1998, p. 16.
- [14] D.A. SHIFLER, « Understanding material interactions in marine environments to promote extended structural life » Corrosion Science, vol. **47**, 2005, p. 2335.
- [15] W.K. BOYD, F.W. FINK, “Corrosion of metals in marine environments”, Metals and Ceramics Information Center, Columbus, 1978, p. 42.
- [16] J. R. DAVIS « Corrosion of specific alloy systems », Metals Handbook: Corrosion, ninth ed, vol. **13**, ASM International, Metals Park, 1987, p. 556.
- [17] L. DOCROS, « LE SOUDAGE MANUEL À L'ARC ÉLECTRIQUE », Edition J. –B. BAILLIÈRE ET FILS, Paris, 1971, p. 5.
- [18] R. VARISELLAZ « Éléments de conception et de réalisation », DUNOD, BORDAS, Paris, 1982, p. 51.
- [19] C.A. HUANG, T.H. WANG, C. H. LEE, W.C. HAN, “A study of the heat-affected zone (HAZ) of Inconel 718 sheet welded with electron-beam welding (EBW)”, Materials Science Engineering, vol. **398**, 2005, p. 275.
- [20] G. THOMAS, V. RAMACHANDRA, R. GANESHAN, J. Mater. Sci. vol. **28**, 1993, p. 4892.

- [21] J.L. BARREDA, F. SANTAMARIA, X. AZPIROZ, A.M. IRISARRI, J.M. VARONA, Vol. **62**, 2001, p. 143.
- [22] J. NOWACKI, A. LUKOJÉ, “Structure and properties of the heat-affected zone of duplex steels welded joints”, Journal of Materials Processing Technology, 2005, p. 1074.
- [23] J.-NILSON, T. HUHTALA, P. JNSSON, L. KARLSON, A. WILSON, “Structural stability of super duplex stainless steels and its dependence on tungsten and copper”, Metall. Mater. Trans, 1996, p. 2196.
- [24] J. NOWACKI, “Duplex-steel welding problems in the building of chemical cargo ships”, Welding Int, 2004, p. 509-515
- [25] J.O. NILSSON, L. KARLSSON, J.O. ANDERSON, “The formation and effect of secondary austenite in duplex and super duplex stainless steel weld metal”, in: International Conference on “Processes & Materials, Innovation Stainless Steel '93”, Florence, Italy, 11-14 October, 1993, p. 42.
- [26] A. LUKOJÉ, J. NOWACKI, “Secondary austenite in HAZ”, Domestic Conference “Metallurgy on the Turn of the 20<sup>th</sup> Century”, Committee of Metallurgy of the Polish Academy of Science, Poland-Krynica, Conference Proceedings, 2002, p. 443.
- [27] J. NOWACKI, A. LUKOJÉ, “The influence of thermal cycle on the structure and properties of a heat-affected zone of duplex steels welded joints”, in: Conference of AMPT2003 Proceeding, vol. **1**, Dublin, 2003, p. 119.
- [28] A. LUKOJÉ, J. NOWACKI, “The influence of welding thermal cycle on properties of a duplex steel heat-affected zone”, Acta Metall. vol.**10**, 2004, p. 741
- [29] Y. CUI, C.D. LUNDIN, “Evaluation of initial corrosion location in E316L austenitic stainless steel weld metals”, Materials Letter, vol. **59**, 2005, p. 1542

- [30] B.T. LU, Z.K. CHEN, J.L. LUO, B.M. PATCHETT, Z.H. XU, “Pitting and stress corrosion cracking behaviour in welded austenitic stainless steel”, *Electrochimica Acta*, vol. **59**, 2005, p. 1391.
- [31] H.Y. LIOU, R.L. HSIEH, W.T. TSAI, “Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels”, *Corrosion Science*, vol. **44**, 2002, p. 2841.
- [32] T.A. MOZHI, W.A.T. CLARCK, K. NISHIMOTO, W.B. JOHNSON, D.D. MACDONALD, *Corrosion*, 1985, p555.
- [33] S. HERTZMAN, P.J. FERRIRA, B. BROTHAND, *Metallurgical Transactions*, 1997, p279.
- [34] H. HOFFMEISTER, D. PROF, G. LOTHONGHUM, in: T.G. Gooch (Ed), *Duplex Stainless Steels’94*, Glasgow, 1994, p. 55.
- [35] H.Y. LIOU, R.I. HSIEH, W.T. TSAI, *Materials Chemistry and Physics*, vol. **47**, 2002, p. 33
- [36] H.Y. LIOU, R.L. HSIEH, W.T. TSAI “Microstructure and pitting corrosion in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. **47**, 2002, p. 33.
- [37] J.C. LIPPOLD, I. VAROL, V.A. BAESLACK, in: J. CHARLES, S. BERNHARDSSON (Eds), *Duplex Stainless Steels’91*, Les Editions de Physique, France, 1991, p. 383.
- [38] T. G. GOOCH, in : J. CHARLES, S. BERNHARDSSON (Eds), *Duplex Stainless Steels’91*, Les Editions de Physique, France, 1991, p. 325.
- [39] H. HOFFMIESTER, D. PROF, G. LOTHONGUM, in: T.G. Gooch (Eds), *Duplex Stainless Steels’94*, Glasgow, 1994, p. 55.

[40] M. SAEKI, F. KUROSAWA, M. MATSUO, Trans. ISIJ 26, 1986, p.1017.

[41] S. KERKADI, Mémoire de fin d'étude de L'Université ABDE RAHMANE MIRA De Bejaïa, « Optimisation des paramètres physico-chimiques de deux nuances d'aciers A33 et E24 qui influent sur la corrosion », 2006, p. 41.

[42] E.L. LIENING, Electrochemical corrosion testing techniques. The theory and practice, Process Industries Corrosion, NACE, Houston, 1986, p. 85

[43] J.P. DIARD, B. LE GOREEC, C. MONTELLA « Cinétique électrochimique », Éditeurs Des Sciences Et Des Arts, 293 rue Lecourbe, 75015 Paris, 1996.

[44] M.M. SOVAR,

Thèse de Doctorat de L'Institut National Polytechnique De Toulouse et de L'Université Polytechnique De Bucarest, « Du tri-isopropoxyde aux oxydes d'aluminium par dépôt chimique en phase vapeur: Procédé, composition et propriétés des revêtements obtenus », , 2006, p. 66.

[45] F. GUIDI, G. MORETTI, G. CARTA, M. NATALI, G. ROSSETTO, Z. PIERINO, G. SALMASO and V.RIGATO, "Electrochemical anticorrosion performance evaluation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings deposited by MOCVD on an industrial brass substrat", Electrochimica Acta, vol.50, 2005, p. 4609.

[46] B. ASSOULI,

Thèse de Doctorat de L'Université IBN TOAFAIL (KENITRA-MAROC) et L'Institut National Des Sciences Appliquées (LYON-FRANCE), « Étude par émission acoustique associée aux méthodes électrochimiques de la corrosion et de la protection de l'alliage cuivre-zinc (60/40) en milieux neutre et alcalin », 2006, p. 46.

[47] F.J. MARTIN, G.T.CHEEK, O. GRADY and P.M. NATISHAN, "Impedance studies of the passive film on aluminium" Corrosion Science, vol.47, 2005, p. 3187.

- [48] J. OIJERHOLM, J. PAN and C. LEYGRAF, “In-situ measurements by impedance spectroscopy of highly resistive  $\alpha$ -alumina” *Corr Sci.* vol. **48**, 2006, p. 243.
- [59] G. CHAPUIS, QUOIX, « Méthodes expérimentales d'études en métallurgie », Edité par le centre d'édition et de documentation de l'école nationale supérieure de techniques avancées, Paris, 1978.
- [50] G. ZAMBELLIE, L. VINCENT, « Matériaux et contacte : Une approche tribologique », Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [51] J.P. BAÏLO, S. PROULX, « DES MATÉRIAUX », Presses Internationale Polytechniques, École Polytechnique de Montréal, 2000, p. 232
- [52] N. SRIDHAR, J. KOLTS, *Corrosion*, 1978, p. 646.

## Résumé

Dans ce mémoire, la corrosion de la zone de soudure de deux tôles marines a été étudiée dans un milieu NaCl à 3 %. Quatre types d'assemblages ont été utilisés ; assemblage de deux tôles saines, assemblage de deux tôles usagées, assemblage mixte et une soudure extraite de la partie immergée d'un bateau (tôle de livraison).

Les méthodes électrochimiques (chronopotentiométrie à circuit ouvert, voltamétrie linéaire, spectroscopie d'impédance électrochimique), la méthode des observations microscopiques et des essais de microdureté ont été utilisés.

Les résultats d'électrochimie montrent que la zone affectée thermiquement est la plus sensible à la corrosion. Le même résultat a été déduit des observations microscopiques et des essais de microdureté.

Le suivi de la corrosion en fonction du temps a été réalisé pour chaque zone. Ceci par la méthode des observations microscopiques après trois et dix jours d'immersion des échantillons dans la solution. Les résultats ont montré que la corrosion des différentes zones peut se produire sous deux formes ; par piqûres ou intergranulaire.

Aussi une comparaison entre les différents assemblages a été faite. Cette dernière a montré que les assemblages homogènes résistent mieux à la corrosion comparativement à l'assemblage mixte.

## Abstract

In this work, the corrosion of the weld zone of two marine sheets was investigated in 3% NaCl medium. Four types of assembly were used ; assembly of two healthy sheets, assembly of two worn sheets, mixed assembly and a weld extracted from the immersed part of the ship.

The electrochemical methods (open circuit chronopotentiometry, linear voltammetry, electrochemical impedance spectroscopy), the microscopic observations method and microhardness tests were used.

The electrochemical results show that the heat affected zone is the most sensitive to corrosion. The same result was deduced from the microscopic observations and the microhardness test.

For each zone, the evolution of corrosion as time function was studied by microscopic observations method. This is after immersion of specimens in the solution for three and ten days. The results show that the corrosion of different zones can be developed by pits or intergranular.

Also a comparison between the different assemblies was achieved. This has shown that the homogenous assemblies were the ones which resist to corrosion in comparison with the mixed assembly.

## ملخص

في هذه الدراسة، صُدمت منطقة اللحام في الوسط 3% NaCl. أربعة أنواع من التركيبات باللحام قد درست؛ تركيبة بين صفيحتين سالمين، تركيبة بين صفيحتين باليتين، تركيبة مختلطة، وصفيحة ملحمة قد انتزعت من منطقة الغوص للسفينة.

الطرق الكيمياءية (Chronopotentiométrie à circuit ouvert, voltamétrie linéaire, spectroscopie d'impédance électrochimique) ، طريقة الملاحظات المجهرية وتجارب la microdurté قد أستعملت.

النتائج الكيمياءية بينت أن المنطقة المصابة حرارياً هي الأكثر تأثراً بالصدأ. نفس النتيجة استخلصت من الملاحظات المجهرية وتجارب la microdurté.

متابعة الصدأ عبر الزمن قد أجريت لكل منطقة عن طريق الملاحظات المجهرية بعد ثلاثة وعشرة أيام من إغصاة النماذج في المحلول. النتائج المتحصل عليها بينت أن صدأ مختلف المناطق يمكنه أن ينتج على نحوين؛ إما عن طريق les piqûres وإما intergranulaire.

أيضاً مقارنة بين مختلف التركيبات قد أجريت. هذه الأخيرة بينت أن التركيبات المتجانسة أحسن مقاومة للصدأ مقارنة بالتركيبة المختلطة.