

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ DE Akli Mohand Oulhadj

-Bouira-

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



## PROJET DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique  
Spécialité : énergétique

### Thème

***ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DU L'ELECTROLYTE SUR  
LE COMPORTEMENT ELECTROCHIMIQUE DES CORDONS DE SOUDURES***

### PRÉSENTÉ PAR

MAZARI RABAH

LEBIAD HADDA

Évalu le /09/2022

### PAR LE JURY COMPOSE DE

Président : M<sup>r</sup>. M MOUSSAOUI

MCA

Université Bouira

Encadreur : M<sup>r</sup>. M AZZOUG  
OUBELKACEM

MCB

Université Bouira

Co-encadreur: M<sup>r</sup>. MOHAMED.  
FARID BELMNOUER

Charger de recherche

Centre de Recherche en  
Technologies Industrielles

Examineur : M<sup>r</sup>. K.LATTARI

MCB

Université Bouira

Année universitaire 2021/2022

## Résumé

L'assemblage par soudage est le moyen le plus répandu dans le domaine industriel, il consiste à assembler deux ou plusieurs corps métalliques en créant une liaison permanente entre eux. Cependant, cette liaison peut contenir des défauts nuisibles sur le comportement de ces assemblages.

Le comportement électrochimique des assemblages soudés dépend de plusieurs paramètres à savoir la nature des matériaux, la température de l'électrolyte et types de soudage.

Dans ce mémoire, une étude a été menée afin de prédire l'effet de la température de l'électrolyte NaCl 3.5M sur le comportement électrochimique des cordons de soudure. Parmi les résultats ; les cordons de soudure résistent mieux à la corrosion que le métal de base pour les températures chaudes de l'électrolyte.

Mots clé : le soudage, comportement électrochimique, les défauts de soudage, corrosion.

## المخلص

تعد عملية التجميع بالتحليم الوسيلة الأكثر استخداماً في المجال الصناعي، فهو يقتضي على جمع الأجسام المعدنية عن طريق إنشاء رابطة دائمة بينهم، في حين قد تحتوي هذه الرابطة على عدة عيوب التي تؤثر سلباً على سلوكها السلوك الكهروكيميائي للأجسام الملحومة يعتمد على عدة عوامل أهمها طبيعة المواد المستعملة درجة حرارة الكتروليت ونوع التحليم.

في هذه المذكرة تمت دراسة تأثير درجة حرارة الكتروليت NaCl 3.5M على السلوك الكهروكيميائي للأجسام الملحومة. من خلال النتائج تم استنتاج أن الأجسام الملحومة أكثر مقاومة للصدأ في درجات الحرارة المرتفعة للكتروليت بالمقارنة مع المعادن الأساسية.

الكلمات المفتاحية: التحليم، السلوك الكهروكيميائي، عيوب التحليم، الصدأ.

## Abstract

Assembly by welding is the most common process in the industrial field, it consists of joining two or more metallic structures by creating a permanent connection between them. However, this bond can contain defects harmful to the behavior of these assemblies.

The fatigue behavior of welded joints depends on several parameters, like the material's type, temperature of the electrolyte and types of welding. In this dissertation, a study was carried out to predict the effect of temperature of the electrolyte NaCl 3.5M. On the electrochemical behavior of solder joints. Among the results; the leads resisted corrosion better at hot electrolyte temperatures than the base metal.

Key words: welding, the fatigue behavior, welding defects, corrosion.

## ***DÉDICACE***

*Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand plaisir  
de dédier ce travail :*

➤ *À mes chers parents*

➤ *À mes frères.*

➤ *À tous les membres de ma grande famille.*

➤ *À mes amis Oussama, Younes et karim.*

➤ *Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de  
loin.*

➤ *Aux messieurs Farid, Mohammed, Nabil et*

*Amine.*

*Rabah*

## *Dédicace*

*Arrivé au terme de la fin de mes études, J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail pour ceux qui méritent le plus ma reconnaissance et mon grand amour.*

*Pour vous, mes chers parents, source de vie, d'Amour et d'affection.*

*Mes sœurs d'amour (Bekhti, Souad, Amel, Nadia, ahlam, wiam, et tilleli).*

*Mes chers frères (Fatah, Fouad, Yassin, Ghilas et Mahmoud).*

*À toute ma grande famille.*

*À tous mes amis (Lydia et Angham).*

*À tous ceux et celles que j'aime et qui m'aiment.*

*Sara Hadda*

## REMERCIEMENT

---

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, il apparaît opportun de commencer ce rapport de stage par des remerciements, à ceux qui nous ont beaucoup appris au cours de ce stage, et même à ceux qui eut la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable nous remercions DIEU de nous avoir donné le courage et la patience pour finir notre présent projet. Nous remercions notre cher promoteur **M<sup>r</sup> AZZOUG MOHAMMED OUBELKACEM** pour sa patience, sa disponibilité, son sérieux, ses remarques, son respect et sa bienveillance. À nos chers professeurs de génie mécanique qui nous ont permis d'accéder à une formation universitaire de qualité. Nous remercions tous l'équipe du **CRTI** pour l'expérience enrichissante, qu'ils nous ont permet fait vivre durant cette période de stage ainsi que leur coopération professionnelle **M<sup>r</sup> MOHAMED FARID BELMNOUER, MOHAMMED IDIR, M<sup>r</sup>. NABIL BENSAD** et **M<sup>r</sup>. AZZEDINE BARIKI** sur chaque petit et grand et sur toutes informations fournies, pour ces conseils précieux.

Enfin, à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué moralement où matériellement à l'aboutissement de ce travail, nous disons merci.

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE .....	5
I.INTRODUCTION.....	5
I.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE.....	5
I.1.1 DEFINITION .....	5
I.1.2 Les formes de soudage .....	5
I.1.2.1 Soudage Homogène .....	5
I.1.2.2 Soudage Hétérogène .....	6
I.1.3 Technique de soudage .....	6
I.1.3.1 Soudage à la flamme.....	7
I.1.3.2 Soudage à l'arc.....	8
I.1.3.3 Le soudage avec électrode enrobées .....	9
I.1.3.4 Le Soudage Mig où Mag .....	10
I.1.3.5 Le soudage plasma.....	10
I.1.3.6 Soudage vertical sous laitier .....	11
I.1.3.7 Le soudage avec électrode réfractaire TIG .....	12
I.1.4 Caractéristiques De la Soudure .....	17
I.1.4.1 Métal de base (MB) : .....	18
I.1.4.2 Zone fondue (ZF).....	18
I.1.4.3 Zone de fusion partielle (ZFP) :.....	18
I.1.4.4 Zone affectée thermiquement (ZAT).....	18
I.2 L'état de l'art.....	19
CHAPITRE II : CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES .....	23

I. GÉNÉRALITÉS SUR LA CORROSION .....	23
I.1. Condition nécessaire pour qu'un métal se corrode .....	24
I.2. Phénomène de passivité .....	24
I.2.1 Formation du film passif.....	24
I.2.2. Rupture de la passivité.....	26
II. CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES .....	27
II.1. Rupture de la passivité .....	28
II.2. Types de corrosions qui affectent les aciers inoxydables .....	28
II.2.1. Corrosion sous contraintes .....	29
II.2.2. Corrosion par crevasses ou corrosion caverneuse .....	29
II.2. 3. Corrosion inter granulaire.....	29
II.2. 4. Corrosion par piqûres .....	29
II.3. Corrosion des aciers .....	30
III. EFFET DE LA CORROSION SUR LES CORDONS DE SOUDURE .....	30
III.1. Effet chimique .....	31
III.2. Effet thermique .....	31
III.3. Effet mécanique.....	31
IV. TRADUCTION ELECTROCHIMIQUE DE PHENOMENE DE LA CORROSION .....	32
IV.1. Méthodes stationnaires .....	32
IV.1.1. Évolution du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion .....	32
IV.1.2. Courbes de polarisation .....	33
IV.1.3. Évolution de la résistance de polarisation (Rp) .....	34
IV.2. Méthodes transitoires : spectroscopie d'impédance électrochimique .....	34
VI. CORROSION DES ALLIAGES DE FER .....	36

VI.1. Mécanisme de la corrosion.....	37
VI.3. Caractéristiques des produits de corrosion.....	41
CHAPITRE III RÉALISATION ET TECHNIQUES EXPÉRENTALES.....	45
III.1 INTRODUCTION.....	45
III.2. MATERIAUX UTILISES.....	45
III.2.1 Matériaux De Base :.....	45
III.2.2 Composition chimique AISI 430.....	45
III.4 PROCEDURE DE SOUDAGE.....	45
III.4.1 Paramètre De Soudage.....	45
III.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LES TESTS ÉLECTROCHIMIQUES .....	46
III.4.2 Préparation Des Électrodes De Travail À Des Tests De Corrosion.....	47
III.4.2.1 Découpage.....	47
III.4.2.2 Soudage de fille électrique à l'étain.....	47
III.4.2.3 Enrobage.....	48
III.4.2.4 Polissage.....	49
III.5 Étude de comportement électrochimique.....	49
III.5.1 Dispositif électrochimique.....	49
III.5.2 Cellule électrochimique.....	50
III.5.3 Électrode de travail.....	51
III.5.4. Méthodes d'études.....	52
III.5.4.1. Potentiel à circuit ouvert: courbe $e=f(t)$ .....	52
III.5.4.2. Courbe de polarisation : $\log(i)= f(E)$ .....	52
III.5.4.3. Résistance de polarisation linéaire : $E=F(I)$ .....	52
III.5.5. Conditions opératoires.....	53



III.5.5.1. Électrolyte .....	53
III.5.5.2. Agitation.....	53
III.5.5.3. Temps d'immersion .....	53
III.5.5.4. Vitesse de balayage .....	53
III.5.6 Spectroscopie d'impédance électrochimique .....	53
III.5.6.1 Mesure d'impédance .....	54
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	56
IV.1 INTRODUCTION.....	56
IV.2 L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'ÉLECTROLYTE SUR LE COMPORTEMENT À LA CORROSION DU MÉTAL DE BASE ET LES CORDONS DE SOUDURES.....	56
IV.2.1 Métal de base.....	56
IV.2.1.1 Courbe de polarisation .....	56
IV.2.1.2 Courbe D'impédance .....	58
IV.2.2 L'échantillon soudé par un courant continue .....	59
IV.2.3 L'échantillon Soudée Par Courant Pulsé.....	62
IV.3 L'EFFET DU COURANT DE SOUDAGE SUR LE COMPORTEMENT À LA CORROSION DES CORDONS DE SOUDURES.....	65
IV.3.1 Comportement vie à vie la corrosion à la température de l'électrolyte 25°C .....	65
IV.3.2 Comportement vie à vie la corrosion à la température de l'électrolyte 55°C .....	67
IV.3.3 Comportement vie à vie la corrosion à la température de l'électrolyte 85°C .....	69
IV.4 Les Micrographie optiques des échantillons après les tests électrochimiques.....	71
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	74

## **LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX**

### **CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGES.**

<i>Figure I.1</i> Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise.....	7
<i>Figure I.2</i> Soudage oxyacétylénique.....	8
<i>Figure I.3:</i> Soudage à l'arc avec électrode enrobée. ....	9
<i>Figure I.4:</i> Electrode enrobée durant le soudage.....	10
<i>Figure I.5:</i> Soudage Mig ou Mag. ....	10
<i>Figure I.6:</i> soudage plasma. ....	11
<i>Figure I.7 :</i> soudage vertical sous laitier.....	11
<i>Figure I.8 :</i> Soudage TIG (tungstène inerte gaz). ....	13
<i>Figure I.9 :</i> Soudage TIG.....	13
<i>Figure I.10</i> Configuration de la station de soudage au gaz inerte de tungstène.....	14
<i>Figure I.11 :</i> Forme d'onde et chemin des électrons en courant alternatif.....	15
<i>Figure I.12 :</i> Forme d'onde du courant pulsé. ....	15
<i>Figure I.13</i> Le soudage des inox.....	17
<i>Figure I.14 :</i> Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion. ....	18

### **CHAPITRE II CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES**

<i>Figure II 1:</i> Évolution des courants anodiques $i_A$ et cathodique $i_K$ en fonction de la différence de potentiel métal -solution ( $E$ ). ....	25
<i>Figure II 2 :</i> Évolution du courant anodique et traduction électrochimique des phénomènes de passivité sur le courbe $i = f(E)$ . ....	26
<i>Figure II 3:</i> Influence des divers éléments d'addition sur la position des diverses zones caractéristiques de la courbe potentiocinétique. ....	28

<i>Figure II 4: Évolution du courant anodique et traduction électrochimique des phénomènes de passivité sur le courbe <math>i = f(E)</math>.</i> .....	33
<i>Figure II 5: Différentes représentations d'une interface électrochimique en spectroscopie d'impédance électrochimique (a) ; diagramme de Nyquist (b) ou de Bode (c).</i> .....	36
<i>Figure II 6: Mécanisme de graphitisation dans la fonte en présence de H<sub>2</sub>S.</i> .....	38
<i>Figure II 7: Mécanisme réactionnel de la corrosion atmosphérique de la fonte</i> .....	39
<i>Figure II 8: Diagramme E-pH-T du système Fe - H<sub>2</sub>O (activité des ions = 10<sup>-6</sup>M) [52].</i> 42	
<i>Figure II 9: Diagramme d'équilibre dynamique de Pourbaix, système Fer-Eau, avec les limites de la corrosion, de la passivation et de l'immunité.</i> .....	43

### **CHAPITRE III RÉALISATION ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

<i>Figure III.1: Les tôles soudées.</i> .....	46
<i>Figure III.2: Échantillons après découpages.</i> .....	47
<i>Figure III.3: Tronçonneuse de marque MICRO-CUT 125.</i> .....	47
<i>Figure III.4: Soudage d'électrode par l'étain.</i> .....	48
<i>Figure III.5: électrode de travail enrobée.</i> .....	48
<i>Figure III.6 : Polisseuse de marque DISQUES Tech Z64</i> .....	49
<i>Figure III.7: La chaîne des tests électrochimiques.</i> .....	50
<i>Figure III.8: Schéma de la cellule électrochimique</i> .....	51
<i>Figure III.9: Représentation schématique de l'électrode de travail.</i> .....	51

### **CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

<i>Figure IV.1 Les Courbes de polarisation du Métal de base (l'acier 430) à différentes températures de l'électrolyte NaCl 3,5M.</i> .....	57
<i>Figure IV. 2 : Les courbes des impédances de métal de base d'inox AISI430 à des différentes températures d'électrolyte NaCl 3.5M.</i> .....	59
<i>Figure IV.3: Les courbes de polarisation d'échantillon soudé par CC à différentes températures d'électrolyte.</i> .....	61

<b>Figure IV.4 :</b> Les courbes des impédances de cordon soudure soudé par CC à des différentes températures d'électrolyte NaCl 3.5M .....	62
<b>Figure IV.5 :</b> Les courbes de polarisations d'un échantillon soudé par courant pulsé des différents températures de l'électrolyte (NaCl 3.5 M). .....	63
<b>Figure IV.6:</b> Les courbes d'impédances d'échantillon soudée par une courant pulsé avec différents températures.....	64
<b>Figure IV.7:</b> Les courbes de polarisations du cordons de soudure à la température 25°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M). .....	65
<b>Figure IV.8:</b> Les courbes des impédances du cordons de soudures et le métal de base à la température de 25°C de l'électrolyte NaCl 3.5M. ....	67
<b>Figure IV.9:</b> Les courbes de polarisations différentes cordons de soudures soudés et le métal de base à la température 55°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M). ....	68
<b>Figure IV.10:</b> Les courbes des impédances des cordons de soudures à la température 55°C de différents joints de soudures courant continue et pulsé et métal de base. ....	69
<b>Figure IV.11:</b> Les courbes de polarisations des cordons de soudures soudé par un courant continue et courant pulsé à la température 85°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M). ....	70
<b>Figure IV.12 :</b> Les courbes des impédances des joints de soudures de l'acier AISI 430 à la température 85°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M). ....	71
<b>Figure IV.13:</b> Les micro optique du cordons de soudure soudé par un courant continue(CC) à la température 55°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M) après les tests d'électrochimies. ....	72
<b>Figure IV.14:</b> micro optique du soudure PC à 85°C après les tests d'électrochimiques.....	72
<b>Figure IV.15:</b> micro optique du soudure PC à 25°C après les tests d'électrochimiques.....	72
<b>Tableau IV.1:</b> Les paramètres électrochimiques de métal de base (l'acier 430) à différentes températures de l'électrolyte NaCl 3,5M.....	58
<b>Tableau IV 2 :</b> Les paramètres électrochimiques à différentes températures des cordons de soudures soudés par un courant continue.....	60

**Tableau IV.3** Les paramètres électrochimiques à différentes températures des cordons de soudures soudés par un courant pulsé (PC). .....63

**Tableau IV.6 :** Les paramètres électrochimiques à la température 55°C de l'électrolyte : des cordons de soudures soudés par le courant continue, des cordons de soudures soudés par le courant pulsé et le métal de base. ....68

**Tableau IV.7:** Les paramètres électrochimiques à la température 85°C de l'électrolyte : des cordons de soudures soudés par le courant continue, des cordons de soudures soudés par le courant pulsé et le métal de base. ....70

## LES ABRÉVIATIONS

---

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
CRTI	Centre de Recherche en Technologies
MB	Industrielles
MEB	Métal de base
	Microscope Électronique à Balayage
CC	Courant continu
PC	Courant pulsé
ZF	Zone fondue
ZFP	Zone de fusion partielle
ZAT	Zone affectée thermiquement
FZ	Zone de fusion
HAZ	Zone affectée par la chaleur
FSS	Les aciers inoxydables ferritique
CIG	La corrosion intergranulaire
ASS	Les aciers inoxydables austénitique
SIE	La spectroscopie d'impédance électrochimique
Feo	La stabilité du film d'oxyde de fer
TIG	Le soudage tungstène inerte Gaz
SMAW	Shielded metal arc welding
A	tension
C	Carbone
Mr	Magnésium
Si	Silicium
Cr	Chrome

## LES ABRÉVIATIONS

---

Mo	molybdène
Ni	Nickel
Na	Sodium
Cl	Chlore
Cu	Cuivre
V	Vanadium
Al	Aluminium
N	Azote
Fe	Fer
SIE	La spectroscopie d'impédance électrochimique
ECS	L'électrode de référence au colonel saturée
T	Température de l'électrolyte (°C)
Ec	Potentiel de corrosion (V)
Ic	Le courant de corrosion (A)
Bc	Portion cathodique (V/dec)
Ba	Portion anodique (V/dec)
Rp	Résistance de polarisation ( $\Omega$ )
Uc	La vitesse de corrosion (mm/an)
M	Masse molaire( g /L)
$\gamma$	Austenite
MIG	Metal inert Gas
MAG	Metal active Gas
SMAW	Shield metal arc welding
GMAW	Gas metal arc welding
FCAW	Flux-cored arc welding

## LES ABRÉVIATIONS

---

MCAW      Metal-Cored Arc Welding



# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRAL

---

L'assemblage par soudage est connu depuis le XIX<sup>e</sup> siècle dans l'esprit scientifique il se développe rapidement dans la main des techniciens passant par le soudage oxyacétylénique puis le soudage à l'arc et le soudage par résistance et enfin le soudage laser. Il présente actuellement le principal moyen d'assemblage des structures métalliques.

L'assemblage par soudage occupe une place primordiale dans l'univers industriel. Il est utilisé dans l'élaboration des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

Plus la gap d'énergie entre l'état métallique et l'état oxydé stable naturellement est important, plus la tendance à la corrosion est potentiellement importante. Pour quantifier thermodynamiquement cette tendance on utilise la notion de potentiel. La tendance à la corrosion des métaux est donc liée à leur potentiel : un métal est d'autant plus facilement corrodable que son potentiel est négatif. Ainsi, la série des potentiels redox normaux permet d'évaluer la tendance à l'oxydation. Dans le cas de différents couples oxydants /réducteurs.

L'information dont a besoin la corrosion concerne des nuances alliages multiples, soumis à des conditions d'environnement très variables. Pour répondre à ce besoin, la seule approche possible est expérimentale par la mesure du potentiel pris par un métal au alliage particulière lorsqu'il est mis en présence d'un électrolyte donner. Ce potentiel est donc mesuré dans un milieu donner et ; de ce fait, si on réalise identiquement cette mesure pour différents alliages dans ce milieu, la classification (par rapport au potentiel mesurer pour chaque alliage) qui en découle n'est valable que dans ce milieu. On définit ainsi une série galvanique.

L'utilisation de ces aciers touche beaucoup de réalisations de l'ingénieur, du fait de leurs très grandes résistances à la corrosion uniforme. Celle-ci est due à la formation d'une couche protectrice, appelée film passif, de quelques nanomètres d'épaisseur à la surface de l'alliage. Ces aciers, en contrepartie, peuvent être sensibles à la corrosion localisée en particulier par piqûres, avec pour conséquence un endommagement et des dégradations parfois importants sur site industriel. La détection de ce type de corrosion joue donc un rôle important dans la prévention des risques industriels, tant sur les plans économique, qu'environnemental et sécuritaire.

Le travail consiste à étudier les propriétés des soudures homogènes entre deux tôles en acier fortement allié AISI 430 et soudées au niveau du Centre de recherche des technologies industriels

## INTRODUCTION GÉNÉRAL

---

CRTI. Cette étude est consacrée à l'étude de l'effet des courants de soudure sur le comportement électrochimique à différentes températures (25°C, 55°C et 85°C) dans la solution NaCl 3.5M.

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

- **Le chapitre I** : généralités sur les soudages.
- **Le chapitre II** : corrosion des aciers inoxydables.
- **Le troisième chapitre** : réalisation et techniques expérimentales.
- **Le dernier chapitre** : les résultats et les discussions.

Le travail se termine avec conclusion générale.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS**  
**SUR LE SOUDAGE**

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

### I. INTRODUCTION

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents traitements mécaniques, thermiques et chimiques.

### I.1 GÉNÉRALITÉS SUR LE SOUDAGE

#### I.1.1 DEFINITION

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler [1], sous l'action d'une énergie calorifique ou mécanique générée par divers procédés mis en œuvre (combustion de gaz, arc électriques, pression...). On soude presque la totalité des métaux existants en utilisant plusieurs procédés.

L'assemblage par soudage occupe une place primordiale dans l'univers industriel. Il est utilisé dans l'élaboration des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage [2].

Le soudage tout simplement c'est l'opération qui permet de lier quasiment tous les matériaux, des matériaux métalliques jusqu'aux matières plastiques ; en assurant la continuité de la matière à assembler, et en préservant les propriétés mécaniques, ainsi que métallurgiques et physiques [3].

#### I.1.2 Les formes de soudage

On désigne deux formes de soudage

##### I.1.2.1 Soudage Homogène

Les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique et lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique semblable à celle du matériau de base [4].

### I.1.2.2 Soudage Hétérogène

Le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente [4].

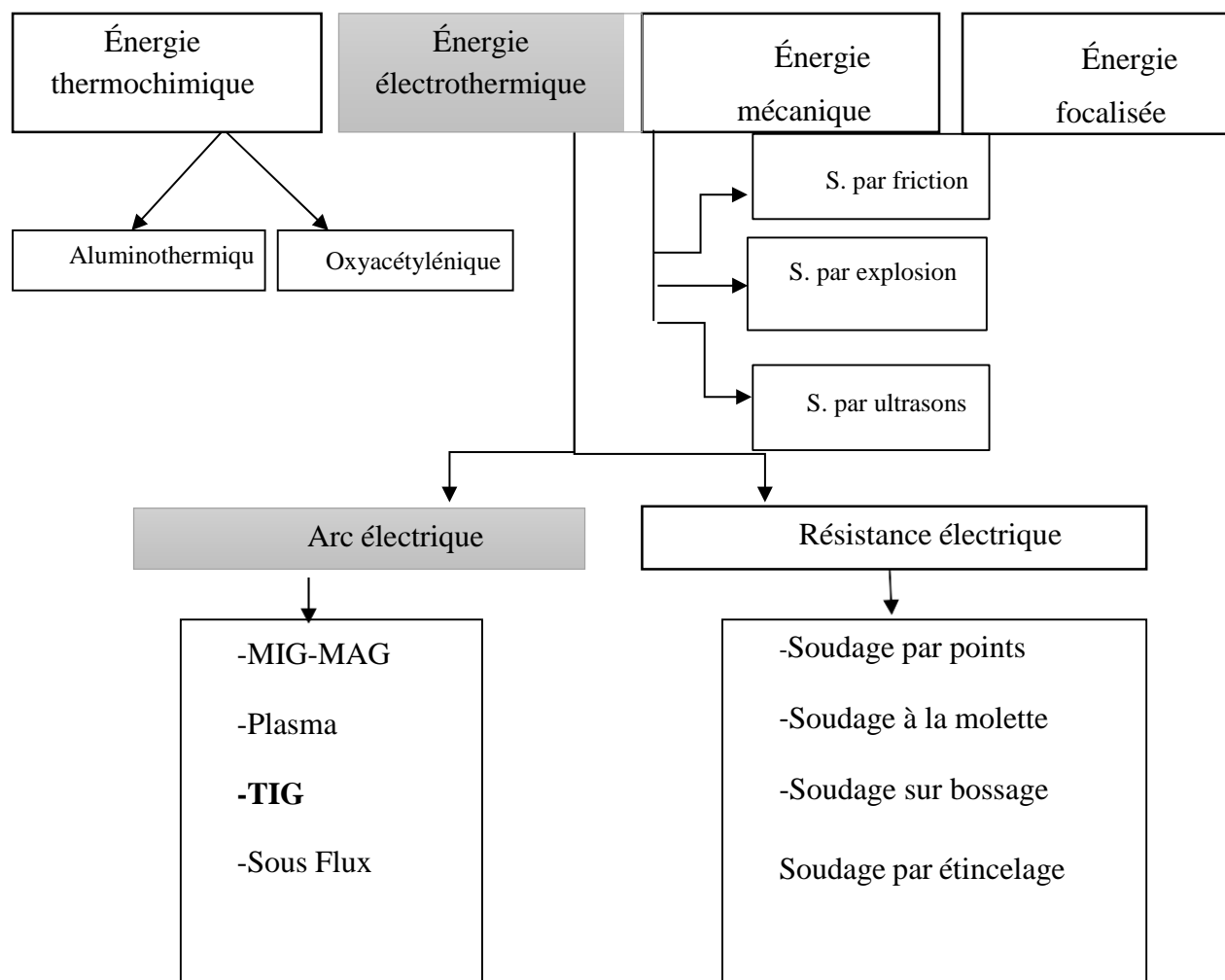
### I.1.3 Technique de soudage

La fusion locale des pièces à assembler peut-être décrite en distinguant le mode de chauffage utilisé et le moyen de protection du métal fondu contre l'action chimique de l'atmosphère ambiante. C'est ainsi on peut répertorier :

- Le soudage à la flamme
- Le soudage à l'arc
- Le soudage aluminothermique
- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion .L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et le cordon de soudure après le refroidissement. Le soudage oxyacétylénique est limité pour les pièces de faible épaisseur environ de 5mm.

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergie utilisées dans le domaine du soudage sont des types chimiques, électriques, ou mécaniques (figure I.1) [5].



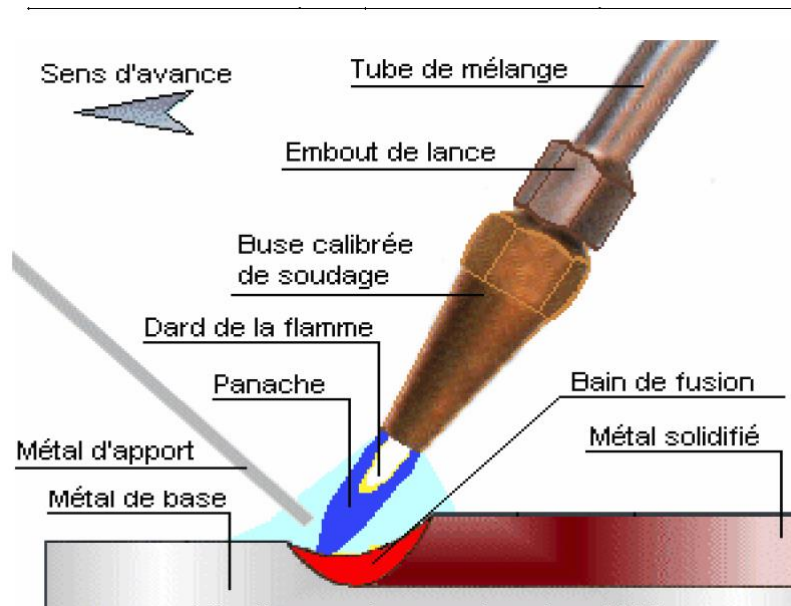
*Figure I.1 : Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise [6].*

### I.1.3.1 Soudage à la flamme

Le soudage à la flamme (procédé 311 selon l'ISO 4063) est connu par le soudage oxyacétylénique (OA), ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène  $O_2$ ) et un gaz combustible (généralement l'acétylène  $C_2H_2$ ), en créant une flamme qui peut atteindre une température située entre  $2850^\circ C$  et  $3200^\circ C$  à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré [7].

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de ~~long~~) est amené manuellement dans le bord de fusion (figure I.2).

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et le cordon de soudure après le refroidissement. Le soudage O.A est limité pour les pièces de faible épaisseur environ de 5mm.



*Figure I.2 Soudage oxyacétylénique [8].*

### I.1.3 2 Soudage à l'arc

La soudure à l'arc est utilisée pour l'assemblage des pièces en acier, en fer, en inox ou même en fonte ayant une épaisseur supérieure à 1,5 mm

La formation du bain de métal fondu est assurée par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternatif qui provoque la fusion d'une électrode de métal d'apport dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont proches du métal de base des deux pièces à souder, cette fusion assure la liaison après le refroidissement des éléments entre eux.

L'arc doit s'amorcer facilement et reste stable par le réglage de la tension d'amorçage suffisante et emploi de corps émissifs dans l'enrobage ainsi que la protection avec un milieu gazeux adapté qui favorisant le soudage [8].

Ce procédé regroupe les types de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

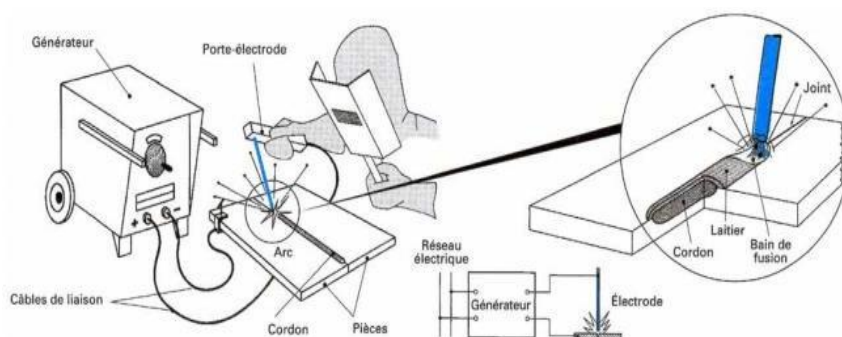
- Le soudage avec électrode enrobée ;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG ;



- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.
- Le soudage plasma.
- Le soudage vertical sous laitier.

### I.1.3 3 Le soudage avec électrode enrobée

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (procède 111 selon l'ISO 4063) est réalisé à partir d'une source de chaleur engendrée par un arc électrique entre l'âme métallique de l'électrode. [9] (ou son diamètre est compris entre 1mm et 10mm et de longueur d'environ 400mm) et les pièces à souder (figure I.3).



**Figure I.3:** Soudage à l'arc avec électrode enrobée [10].

L'électrode est composée de deux parties distinctes :

**L'âme :** partie métallique située au centre de l'électrode pour conduire le courant électrique.

**L'enrobage :** Partie extérieure adhérent à l'âme qui dépose lors de sa fusion laitier protecteur contre l'action de l'air ambiant, son rôle est d'assurer la stabilité et la continuité de l'arc et d'apporter les éléments chimique d'addition nécessaires pour la formation de base de métal fondu (figure I.4).

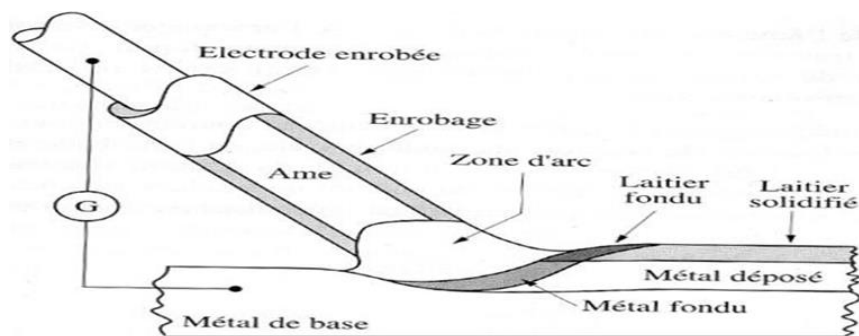


Figure I.4: Électrode enrobée durant le soudage [11].

#### I.1.3.4 Le Soudage Mig où Mag

Le procédé de soudage **MIG** où **MAG** (procède 131/135selon ISO 4063) consiste à créer un arc électrique en courant continu entre un fil fusible (environ 0.5mm à 2.4mm de diamètre [11]) provenant d'une bobine et les pièces à souder, tout en protégeant l'arc et le bain de fusion par une atmosphère protectrice gazeuse (figure I.5). Cette atmosphère peut être inerte (Argon) ou active ( $\text{CO}_2$  ou un mélange Argon/ $\text{CO}_2$ ) [18].

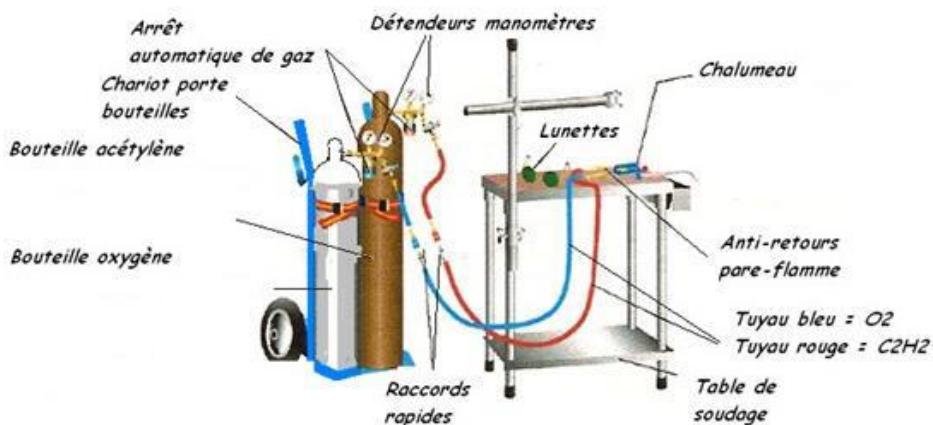


Figure I.5: Soudage Mig ou Mag [12].

#### I.1.3 5 Le soudage plasma

Un arc est créé entre une électrode tungstène et la pièce à soudée, à la manière de procédé TIG, un gaz plasmagène est injecté dans une chambre refroidie et permis de forcer l'arc à passer au travers d'une tuyère, et augmente ainsi la puissance de l'arc qui devient très localisé.

Un gaz additionnel protège le bain de fusion des influences atmosphériques. Le procédé plasma requiert un gaz plasmagène et un gaz de protection. Le plasma permet d'atteindre une température 15000 °C et il très fortement accéléré par le passage dans la tuyère. Le terme plasma est utilisé lorsque l'arc n'est plus composé d'atome et de molécule, mais d'ions et d'électrons [13].

Considéré comme une évolution de soudages TIG (Figure I.6) destiné pour le soudage bord à bord des tôles et des tubes dont l'épaisseur est inférieure ou égale à 8mm (procédé 15 selon l'ISO 4063).

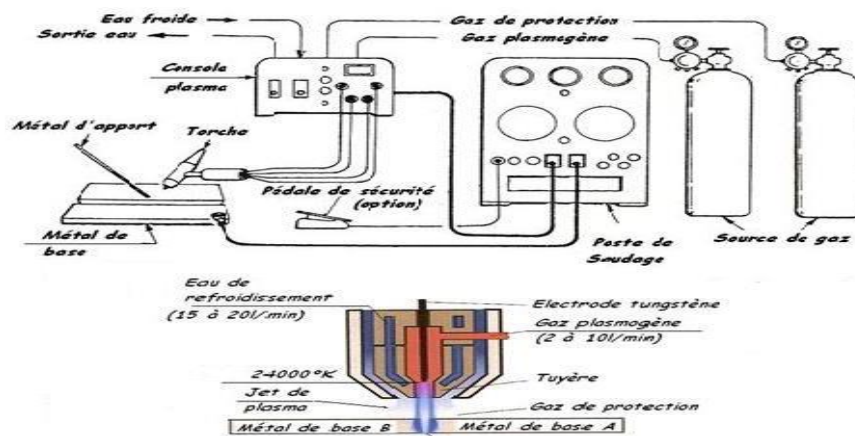


Figure I.6: soudage plasma [14].

### I.1.3 6 Soudage vertical sous laitier

Dans ce procédé le bain de métal fondu est formé dans un moule parallélépipède vertical créé entre les deux pièces à souder dont leur épaisseur est supérieure à 25 mm et recouvert par deux patins en cuivre (refroidis par la circulation d'eau) [15].

Le soudage progresse verticalement de bas en haut par la fusion de métal d'apport (fil d'électrode fusible guidé) à partir de l'amorçage d'un arc électrique entre ce fil d'électrode et une latte qui ferme le bas du moule (figure I.7).

Au-dessus du bain de métal fondu, un bain de laitier constitué par le flux de soudage assure la protection (procédé 72 selon l'ISO 4063).

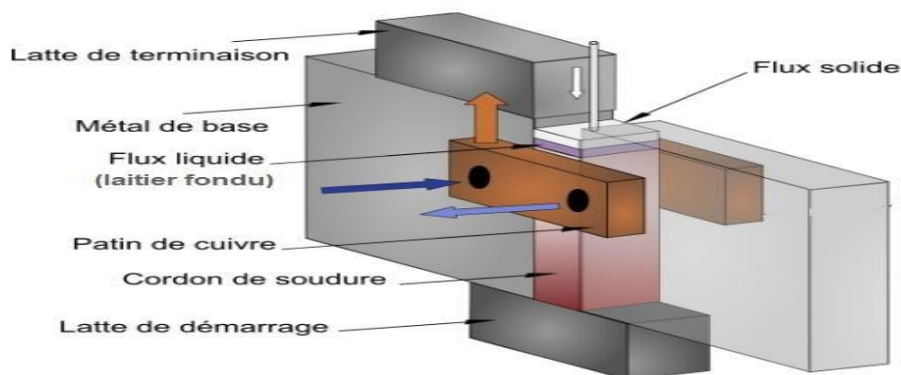


Figure I.7: Soudage vertical sous laitier [16].

La numération des procédés de soudage pour la représentation symbolique des dessins est conforme à la norme ISO 4063 (Tableau I.1) [17].

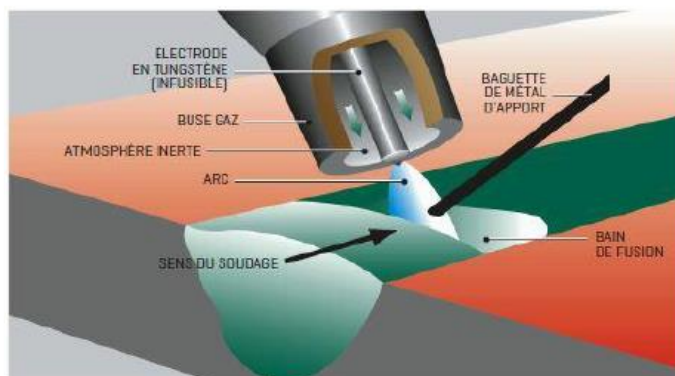
**Tableau I.1:** La numération des procédés de soudage selon ISO 4063[17].

1	Soudage à l'arc	3	Soudage aux gaz
11	Électrode fusible sans protection gazeuse	311	oxyacétylénique
111	électrode enrobée	4	Soudage par pression(à l'état solide)
13	Sous protection gazeuse avec fil-électrode fusible	41	par ultrasons
131	MIG	42	par friction
135	MAG	45	par diffusion
14	Sous protection gazeuse avec électrode réfractaire	441	Par explosion
141	TIG	5	Soudage par faisceau
15	Au plasma	51	par faisceau d'électrons
2	Soudage par résistance	52	par faisceau Laser
21	par points	7	Autres procédés de soudage
22	à la molette	71	Par aluminothermie
23	Par bossage	72	vertical sous laitier
24	en bout par étincelage		

### I.1.3 7 Le soudage avec électrode réfractaire TIG

Le soudage TIG est un procédé de soudage sous flux gazeux avec électrode réfractaire sous une alimentation en courant continu pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivre ...) et un courant alternatif pour les alliages légers d'aluminium ou du magnésium (procédé 141 selon l'ISO 4063).

La fusion du métal d'apport à souder est obtenue par la formation d'un arc électrique entre une électrode inconsommable (diamètre ente 1mm et 4mm [11]) fabriquée à l'aide d'un métal à très haut point de fusion (le tungstène) et les pièces à souder avec la mise en place une protection gazeuse (soit l'argon ou l'hélium soit des mélanges entre eux) (figure I.9).



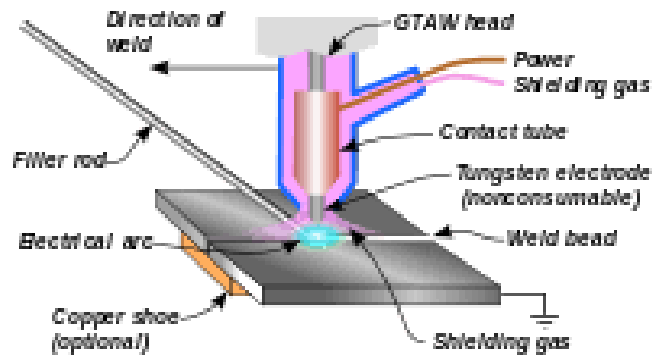
*Figure I.8 : Soudage TIG (tungstène inerte gaz) [18].*



*Figure I.9 : Soudage TIG [18].*

#### I.1.3.7.1 Équipement de soudage TIG

Trois composants principaux composent une station de soudage GTA. Ils constituent l'alimentation électrique de soudage, souvent appelée machine à souder ; la torche de soudage, souvent appelée torche TIG ; la pince de travail, parfois appelée pince de masse ; et la bouteille de gaz de protection (Figure I.10). Il existe une variété de tuyaux et de câbles qui relient ces trois composants ensemble [20].



*Figure I.10 Configuration de la station de soudage au gaz inerte de tungstène[20].*

### I.1.3.7.2 Paramètres de soudage Tungstène Inerte Gaz (TIG)

**La source de courant** fournit du courant de soudage qui peut être AC, DC ou pulsé, et une tension de soudage qui permet l'amorçage et le maintien de l'arc.

**Le gaz de protection** est dirigé vers l'extrémité de l'électrode au tungstène afin de maintenir l'arc, de protéger le bain de soudage ainsi que l'électrode.

**La torche** munie d'un faisceau de câbles et tuyaux distribuant le gaz, parfois l'eau. La tête de torche maintenant l'électrode réfractaire qui assure le transfert de courant. Ceci permet à l'arc de s'établir et de se maintenir allumé.

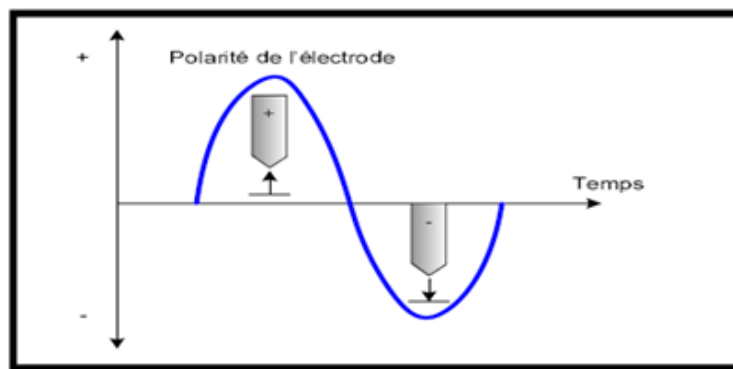
**L'électrode non fusible au Tungstène** est montée sur la torche TIG et joue un rôle important dans le procédé TIG. Pour obtenir de bons résultats il faut choisir parmi les différents types et les différents diamètres.

**La masse** doit être parfaite afin d'assurer la fermeture du circuit électrique et garantir ainsi les amorçages et la stabilité de l'arc [19].

### I.1.3.7.3 Types de courants dans la technique de soudages

#### A) Courant Alternatif (AC)

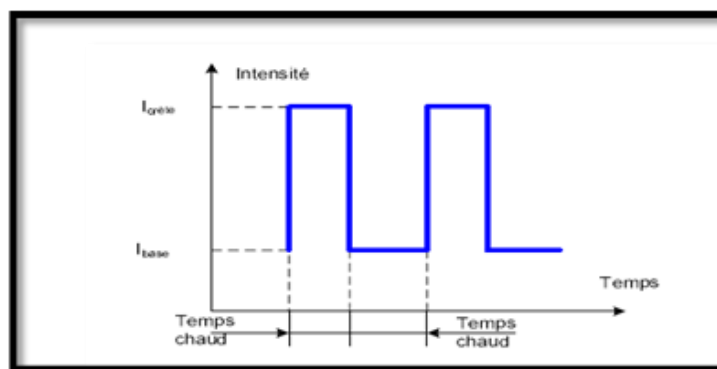
En courant alternatif, le courant de soudage alterne entre les polarités positive et négative. C'est le mode idéal pour le soudage de l'aluminium et autres matériaux revêtus d'oxydes réfractaires (figure I.11). La polarité négative est utilisée pour créer le bain de fusion tandis que la polarité positive a un rôle de décapage et de perforation de la couche d'oxyde qui se forme en surface. [21].



*Figure I.11 :Forme d'onde et chemin des électrons en courant alternatif [22].*

### B) Courant Pulsé (PC)

Tout comme pour le soudage avec fil électrode fusible, les technologies nouvelles des sources de courant ont permis une meilleure maîtrise du procédé par l'utilisation du soudage par impulsion parfois appelé également « pulsée thermique » (figure I.12). Mais le phénomène physique qui intervient dans ce cas est très différent de celui qui est mis en œuvre dans le cas du soudage avec fil électrode fusible. [21].



*Figure I.12 :Forme d'onde du courant pulsé [22].*

### C) Courant Continu (CC)

En courant continu, polarité négative (CC), la torche (l'électrode) est reliée à la borne négative et la pièce à souder sur la borne positive. Le courant CC permet de travailler plus rapidement sur pratiquement toutes les nuances métalliques.

Cette polarité permet aussi de souder avec précision sur des épaisseurs très fines et est souvent employé pour les passes de racine [21].

#### I.1.3.7.4 Application du soudage tungstène inerte gaz (TIG) :

Le soudage TIG s'applique à tous les métaux soudables. De plus, c'est un procédé facilement mécanisable, il est très utilisé, dans la construction aéronautique, les industries chimiques et alimentaires, la fabrication des réservoirs, des citernes, des carrosseries, ...etc.

La soudure TIG est une soudure de qualité, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur. Les domaines d'application les plus courants sont : L'aéronautique, l'automobile et la tuyauterie industrielle [21].

#### I.1.3.7.5 Défauts du soudage tungstène inerte gaz (TIG)

- ❖ Ondes en forme de V : Courant trop intense, vitesse trop grande.
- ❖ Pénétration irrégulière : Vitesse de soudage irrégulière, mauvaise position de la torche.
- ❖ Manques de pénétration localisée : Point d'accostage mal fondus, bain de fusion insuffisant au départ.
- ❖ Inclusions de tungstène : Mauvaise qualité d'électrode, excès d'intensité pour le diamètre d'électrode, électrode en contact avec le bain de fusion.
- ❖ Fissures isolées en étoile : Rupture d'arc trop rapide, manque de métal en fin de dépôt.
- ❖ Grande consommation d'électrodes : Débit insuffisant de gaz de protection, électrode positive ou contaminée ou encore oxydée lors du refroidissement, diamètre électrode non approprié au courant de soudage, échauffement excessif dans la torche, le gaz de protection contient de l'O<sub>2</sub> ou du CO<sub>2</sub> [23].

#### I.1.3.7.6 Avantages du soudage tungstène inerte gaz (TIG)

Le procédé s'applique facilement à tous les aciers dont l'acier inoxydable, ainsi qu'aux alliages de nickel résistants à la corrosion ou réfractaires, le titane, l'aluminium ; le magnésium, le cuivre, le laiton, le bronze ou l'or. Les pièces à souder composées de différents alliages ou de différents métaux (soudures hétérogènes) peuvent également être assemblées moyennant l'utilisation d'un métal d'apport approprié [24].

- Le procédé est très stable et fiable permettant d'abaisser les taux de défaut ou de reprise, à des niveaux inférieurs à 1 %.



- Les paramètres de soudage sont adaptables et, pour la plupart, indépendants les uns des autres.
- Le procédé de soudage TIG peut être mis en œuvre avec ou sans fil d'apport suivant l'application [24].

#### I.1.3.7 Inconvénients du soudage tungstène inerte gaz (TIG)

- Comparé à d'autres procédés de soudage à l'arc, le taux de dépôt du procédé TIG est relativement faible.
- L'établissement des procédures et des paramètres de soudage nécessaires au bon fonctionnement du procédé nécessite du temps ainsi qu'un certain coût de développement.
- La sophistication de l'équipement de soudage implique des coûts d'investissement supérieurs à ceux d'un équipement de soudage manuel [24].

#### I.1.4 Caractéristiques de la Soudure

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 4 zones principales [25] :

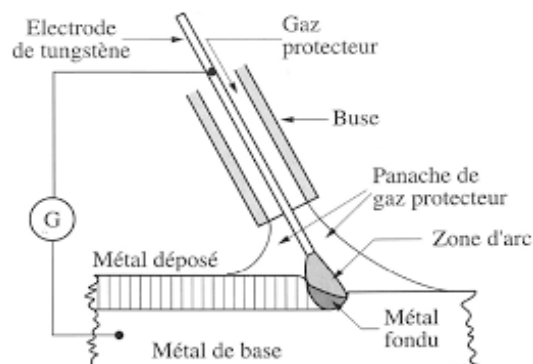
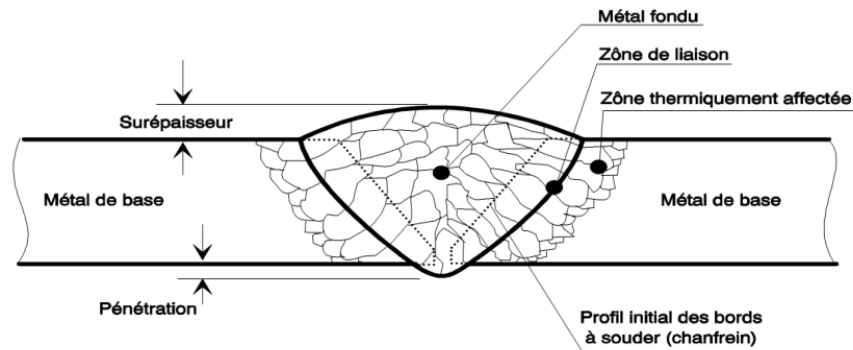


Figure I.13 : Le soudage des inox [25].



*Figure I.14 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion [25].*

#### **I.1.4.1 Métal de base (MB) :**

Il constitue le métal des pièces à assembler, Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature légèrement différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques.

L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensibles aux changements de phases par précipitations [25].

#### **I.1.4.2 Zone fondue (ZF)**

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport, le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé [25].

#### **I.1.4.3 Zone de fusion partielle (ZFP) :**

Le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquide et le solide de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle [25].

#### **I.1.4.4 Zone affectée thermiquement (ZAT)**

C'est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiés à un degré quelconque par la chaleur du soudage.

Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique [25].

## **I.2 L'état de l'art**

L'acier inoxydable ferritique (FSS) est le type le plus important de la famille des aciers inoxydables en raison de sa meilleure ductilité, de sa bonne résistance et de sa résistance à la corrosion dans les industries chlorées, acides et pétrochimiques [26,27]. Ces alliages offrent une bonne résistance à la corrosion et à la fissuration par corrosion sous contrainte dans des environnements agressifs. Ils sont utilisés dans diverses applications où la résistance à la corrosion plutôt que les propriétés mécaniques est la principale exigence de fonctionnement [28]. C'est un alliage peu coûteux par rapport à l'acier inoxydable austénitique en raison de l'absence de nickel et considéré comme la meilleure alternative dans un environnement à haute température en raison de sa faible dilatation thermique [29, 30]. L'acier inoxydable ferritique est considéré comme le bon substitut de l'acier inoxydable austénitique dans diverses applications, en particulier celles qui nécessitent de l'acier inoxydable sans nickel.

Bien que cet alliage possède une bonne ductilité et formabilité sous forme corroyée, il est cependant moins utilisé dans les applications d'ingénierie. En effet, le soudage par fusion de l'acier inoxydable ferritique, en particulier le groupe de première génération (AISI 430), a subi de nombreux problèmes de soudage. L'un de ces problèmes est la croissance excessive des grains dans la zone de fusion (FZ) et la zone affectée par la chaleur (HAZ) pendant le soudage du FSS.

Le soudage TIG est un processus où les pièces sont assemblées par application de chaleur générée par un arc amorcé entre une électrode de tungstène non consommable et la tâche en présence d'un gaz de protection. Le soudage TIG est appliqué à feuille de soudure, tube, tuyau, plaque et pièces moulées. Ces produits fabriqués sont utilisés dans la construction navale, la production d'électricité, l'aérospatiale et d'autres industries [31,32].

La microstructure et le comportement à la corrosion de soudures dissemblables entre l'acier inoxydable austénitique AISI304 et l'acier inoxydable ferritique AISI 430 ont été étudiés.

L'évolution de la phase au sein de chaque soudure a été analysée à l'aide du calcul thermodynamique et de la diffraction rétrodiffusée des électrons (EBSD).

Les résultats ont indiqué que les joints soudés étaient principalement composés de phases de martensite et de ferrite. Les calculs thermodynamiques montrent que, lors du processus de transformation de phase à haute température, la ferrite à haute température se transforme en austénite pour former un état mixte. Cette austénite se transforme ensuite en martensite au cours du processus de refroidissement à vitesse élevée suivante. Il a également été constaté que l'augmentation de la portion fondue d'AISI304 dans des soudures dissemblables entraînait une augmentation de la portion d'austénite à haute température.

Il en a résulté plus de portions de martensite présentes dans la soudure à la température ambiante. Les courbes de polarisation potentiodynamique ont montré que la résistance à la corrosion du joint soudé diminuait avec l'augmentation du rapport de fusion de l'AISI304, puis augmentait avec une augmentation supplémentaire du rapport de fusion. La diminution initiale de la résistance à la corrosion pourrait être attribuée à l'augmentation des teneurs en martensite et des fractions des joints de phase, et l'augmentation subséquente pourrait contribuer à l'augmentation des teneurs en Cr et à la diminution des fractions des joints de phase.

Les aciers inoxydables ferritiques (FSS) ont été largement utilisés dans les industries énergétiques et mécaniques comme : les chaudières et les collecteurs des échappements des automobiles, en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques, leur résistance à la corrosion et de leur prix modéré par rapport les autres nuances des aciers inoxydables [33,34]. Cependant, le souci majeur de l'utilisation des FSS est leur susceptibilité à la corrosion intergranulaire (CIG) après une opération de soudage ou traitement thermique inapproprié [35,36]. Un grand nombre d'environnements conduisent à l'endommagement par l'CIG des FSS sensibilisés. Selon des travaux de recherches précédentes [37,38], le mécanisme CIG des FSS est similaire à celui des aciers inoxydables austénitiques (ASS). Le mécanisme CIG se fait principalement par les précipitations des composés riches en Cr tels que les carbures ( $M_{23}C_6$ ) et les nitrures ( $M_2N$ ) dans les joints de grains pendant un traitement thermique. La formation de composés riches en Cr conduit à la consommation d'atomes de chrome et à la formation de zones appauvries en Cr. Les zones appauvries en Cr adjacentes aux précipités intergranulaire contiennent un niveau de chrome inférieur à celui de la matrice et sont donc sujettes à la corrosion. Cependant, en raison de la

solubilité plus faible et de la vitesse de diffusion plus rapide du carbone et de l'azote dans la ferrite que dans l'austénite [39], les composés riches en Cr précipitent plus facilement dans le FSS que dans l'ASS [39], et donc le FSS est plus sensible à l'CIG que l'ASS.

### **I.3 Conclusion**

Dans ce chapitre généralité sur le soudage, nous avons défini le soudage et mentionne les informations les plus importantes qui s'y rapportent, qui sont représentées dans :

Les formes de soudage, les techniques de soudage, caractéristiques de la soudure et l'état de l'Art.

**CHAPITRE II**  
**CORROSION**  
**DES ACIERS**  
**INOXYDABLES**

## CHAPITRE II : CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES

### II.1. INTRODUCTION

Les matériaux sont fortement exposés à la corrosion qu'ils soient au contact d'atmosphères humides, immergés en eau douce ou saline, implantés dans les sols ou en présence de solutions plus ou moins agressives. Les principaux facteurs de la corrosion sont couramment classés selon leur nature :

- Chimique : oxygène, salinité, PH, gaz carbonique,
- Physique : vitesse des courants, température, pression.

De ce fait, la corrosion a donné et donne toujours lieu à de nombreuses études car les phénomènes de corrosion rencontrés sont complexes et souvent spécifiques.

### II.2 GÉNÉRALITÉS SUR LA CORROSION

On définit la corrosion comme étant une destruction relativement lente et progressive des métaux qui résulte d'attaque chimique effectuée par les agents atmosphériques, par l'eau ou la vapeur, ou par les divers produits chimiques. Elle résulte de l'interaction chimique et physique entre le matériau et son environnement, elle ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux et alliages métalliques, ainsi que les polymères et les céramiques.

Le phénomène de corrosion se traduit par une réaction chimique ou électrochimique qui se produit à la surface du matériau. Dans tous les cas, le phénomène de corrosion est un problème de surface, plus précisément d'interface entre un métal et son environnement liquide ou gazeux. Elle se traduit généralement par une diminution du poids, d'altération de la surface et d'affaiblissement des propriétés.

Le comportement à la corrosion d'un matériau en service va dépendre d'une multitude de facteurs:

- Composition chimique et microstructure du matériau.
- Composition chimique de l'environnement (milieu).
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc..).

- Sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottement, etc....).

La résistance à la corrosion n'est donc pas une propriété intrinsèque du métal, mais plutôt une propriété de l'interface métal/ solution.

### II.1. Condition nécessaire pour qu'un métal se corrode

Pour qu'un métal se corrode, l'existence en solution d'un constituant oxydant dont le potentiel d'équilibre de la réaction cathodique est plus élevé que celui de la réaction anodique, est nécessaire. Ce potentiel d'équilibre est celui donné par la relation de Nernst [32]. Dans le cas de la réaction anodique, on a :

$$E_{M/M^{n+}} = E_{M/M^{n+}}^{\circ} + \frac{RT}{nF} \log(a_m^{n+})$$

Avec

$a_m^{n+}$  : Activité des ions  $M^{n+}$  en solution

R : Constante universelle égale à  $8.214 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

F : constante universelle égale  $96500 \text{ C}$

T : Température en kelvin

$E_{M/M^{n+}}^{\circ}$  : Tension standard.

Pour que la corrosion ait lieu, la thermodynamique électrochimique exige que:

$$E_{\text{ox/red}} > E_{M/M^{n+}}$$

Avec

$E_{\text{ox/red}}$  : Tension de NERST correspondant à la réaction cathodique.

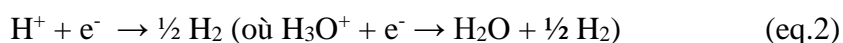
### II.2. Phénomène de passivité

#### II.2.1 Formation du film passif

Lorsqu'un métal se dissout dans un milieu, sa surface est le siège d'une réaction anodique qui correspond à l'oxydation des atomes métalliques :



En milieu acide, la réaction cathodique correspond à :

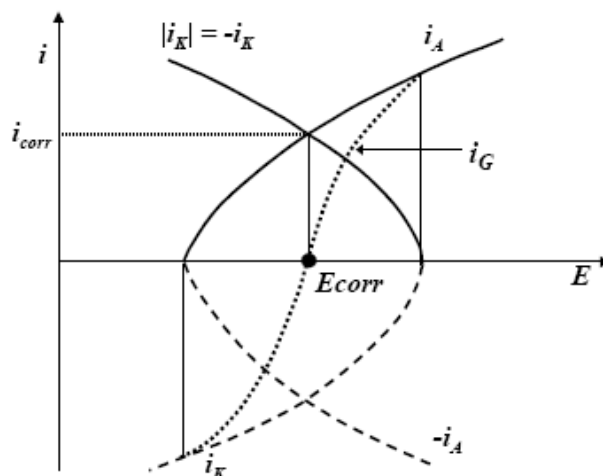




Et en milieu aéré :



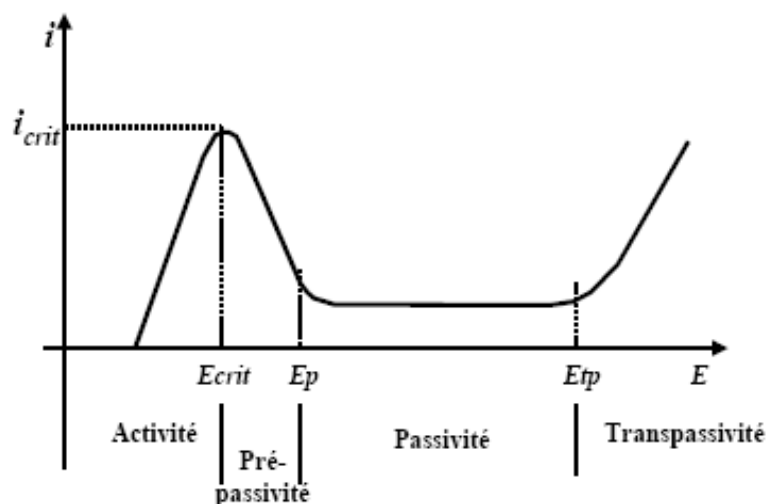
Lorsque le métal est au potentiel d'abandon dans la solution, l'intensité de la réaction anodique ( $i_A$ ) est égale à celle de la réaction cathodique ( $i_K$ ) en valeur absolue (figure II.1). Le potentiel pris par le métal est appelé le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) ou encore potentiel libre ou potentiel d'abandon. Le courant globale,  $i_G = i_K + i_A$ , s'annule au potentiel de corrosion. Si le métal est polarisé positivement ( $E - E_{\text{corr}} > 0$ ), la réaction de dissolution anodique sera prépondérante. L'intensité de cette réaction dépend aussi bien du potentiel appliqué entre le métal et le milieu que du pH de la solution.



**Figure II.1:** Évolution des courants anodiques  $i_A$  et cathodique  $i_K$  en fonction de la différence de potentiel métal -solution ( $E$ ).

Lorsqu'on impose progressivement une surtension positive au système, le courant anodique augmente jusqu'à ce que le potentiel imposé soit égal au potentiel critique ( $E_{\text{crit}}$  ou le potentiel de Flade) qui est caractérisé par le courant critique ( $i_{\text{crit}}$ ). Au potentiel critique, le courant n'augmente plus et commence à diminuer notablement (figure II.2) suite à la formation d'une couche constituée par des espèces oxydées.

Les espèces intermédiaires adsorbées sur la surface conduisent à la formation d'une couche stable qui est suffisamment compacte pour que la dissolution du métal soit bloquée.



**Figure II.2 :** Évolution du courant anodique et traduction électrochimique des phénomènes de passivité sur le courbe  $i = f(E)$ .

### II.2.2. Rupture de la passivité

La rupture du film passif dans une situation de corrosion localisée telle que la corrosion par piqûres ou par effet de crevasse est généralement considérée comme se développant en deux étapes :

- 1) Germination, au cours de laquelle des sites stables de corrosion se forment sur la surface ;
- 2) Propagation, au cours de laquelle ces sites se développent en profondeur.

Une passivation de ces sites peut se produire dans des conditions favorables. C'est pourquoi, certains auteurs distinguent une étape intermédiaire qu'ils appellent étape piqûres métastables ou étape de pré-piqûration [33]. Bien qu'il y ait un accord général au sujet des mécanismes de l'étape de propagation, des doutes demeurent encore sur les processus menant à la germination des sites de corrosion sur la surface du film passif. Les modèles les plus appropriés au sujet de cette étape de germination sont : modèle de pénétration ou migration d'anions [34], modèle chimie-mécanique [35,36], modèle des défauts ponctuels [35,37], théorie chimique de la dissolution [37] et théorie de la dépassivation et de la repassivation [38].

### III. CORROSION DES ACIERS INOXYDABLES

La bonne tenue à la corrosion des aciers inoxydables austénitiques est due à la présence de chrome dans sa composition, avec une teneur au moins égale à 12% [39-40].

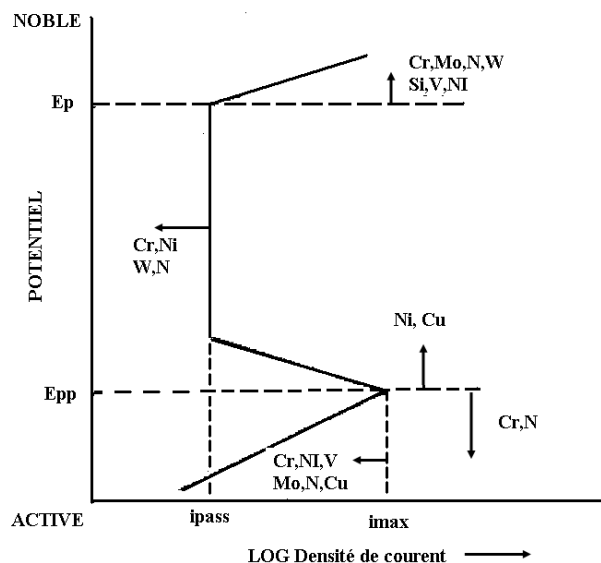
Cette teneur est suffisante pour protéger le métal de l'environnement agressif, en formant à sa surface une couche d'oxyde de chrome  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  qui tend à se former spontanément à l'air. Les espèces ioniques étant freinées, ce film passif peut être considéré comme très ralenti, et dans certains cas pratiquement négligeables [41].

Les caractéristiques physico-chimiques des couches passives des aciers inoxydables conditionnent leurs propriétés protectrices et donc là plus ou moins grande résistance à la corrosion. Ces caractéristiques sont étroitement liées à la composition chimique du film et du milieu agressif dans lequel il travaille. De nombreux travaux ont été réalisés en mettant en œuvre les méthodes physiques d'analyse de surface à savoir : ESCA, SIMS, RBS, AES.

Il en ressort de ces analyses que la composition de la couche passive dépend à la fois de la composition de l'acier et du milieu dans lequel l'acier est immergé. Ceci confirme qu'elle n'a pas un caractère définitif mais qu'elle est susceptible d'évoluer lors de toute modification du milieu [42].

La structure et la composition de la couche passive dont la propriété essentielle est la limitation de la dissolution du métal ont fait l'objet de plusieurs travaux. Sa composition est en général fortement enrichie en chrome, en molybdène, en silicium et parfois en nickel [43]. Néanmoins, ces films passifs peuvent être rompus pour plusieurs raisons dont les principales sont un excès de l'acidité ou de la teneur en chlorure dans la solution. Dans les milieux acides, la rupture est plus insidieuse, elle prend la forme d'une corrosion localisée [42].

L'effet des divers éléments d'addition sur les caractéristiques de cette couche est schématisé sur la figure II.3.



**Figure II.3:** Influence des divers éléments d'addition sur la position des diverses zones caractéristiques de la courbe potentiocinétique [44].

### III.1. Rupture de la passivité

La stabilité du film passif peut être affectée par :

- Le potentiel métal – solution : la différence de potentiel métal - solution est fixée par l'équilibre dynamique des réactions anodique (dissolution ou passivation) et des réactions cathodiques.

- L'augmentation de la qualité de protons dans la solution qui a tendance à déstabiliser le film passif. Pour chaque milieu, il existe un PH critique appelé PH de dépassivation ( $PH_d$ ) au-dessus duquel le courant critique de passivation devient de l'ordre de grandeur du courant de passivité.

- La présence d'ions halogénures et en particulier les ions  $Cl^-$  les plus présents dans l'écosystème ou les aciers inoxydables sont majoritairement employés à tendance à favoriser les réactions de destruction du film passif au détriment des réactions du point de vue fonctionnement du système thermodynamique métal/film/solution avec, comme conséquence, dans certains cas la rupture générale ou localisée du film.

### III.2. Types de corrosions qui affectent les aciers inoxydables

Sans prétendre décrire tous les modes d'attaque des aciers inoxydables, nous avons surtout porté notre attention sur les phénomènes les plus souvent observés:

### III.2.1. Corrosion sous contraintes

C'est le phénomène de fissuration des matériaux sous l'action simultanée d'un environnement et d'un régime de contraintes statique de traction dont au moins une composante est positive.

Elle produit, même sur des alliages ductiles, une fissuration d'aspect fragile et de propagation relativement lente, dans des conditions de sollicitation mécaniques souvent très éloignées des limites de rupture [42].

Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus affectés par ce type de corrosion, particulièrement dans les milieux chlorurés chauds.

### III.2.2. Corrosion par crevasses ou corrosion caverneuse

Tous les types d'aciers inoxydables sont susceptibles de subir une corrosion par crevasses. Elle est spécifique des zones confinées (recoins de structure, sous les joints, etc.), en provoquant une dissolution très rapide de ces zones. Cette corrosion se produit en milieux chlorurés neutres après des temps d'incubation plus au moins longs.

### III.2.3. Corrosion inter granulaire

Elle est localisée aux environs immédiats des joints de grains, qui constituent des sites favorables à la participation de composés métalliques, de carbures, ou des phases inter métalliques (la phases sigma.) et à la ségrégation de nombreux éléments solutés ou d'impuretés. Le cas le plus courant est fourni par les zones au voisinage des cordons de soudure (zones affectées thermiquement). Ce type de corrosion affecte surtout les aciers inoxydables austénitiques.

### III.2.4. Corrosion par piqûres

Parmi les types de corrosion localisée, on trouve la corrosion par piqûres qui tient une place particulière. Elle se distingue par la formation à la surface du matériau de cavités de faibles dimensions mais souvent de profondeur importante. Elle nécessite la présence d'anions agressifs, notamment les ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$  et d'un oxydant. Le nombre et la forme des piqûres de corrosion varient selon les conditions du milieu. La perte de poids est relativement faible, mais les caractéristiques mécaniques sont sensiblement affectées [45]. Ce type de corrosion affecte toutes les familles d'aciers inoxydables.

### III.3. Corrosion des aciers

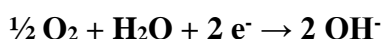
Lorsqu'un métal se dissout dans un milieu, sa surface est le siège d'une réaction anodique qui correspond à l'oxydation du métal, c'est à dire dans le cas du fer :



En milieu acide, la réaction cathodique correspond à :



Et on milieu neutre aéré :



La réaction anodique se décompose en fait en plusieurs réactions intermédiaires. Dans le cas du fer, les espèces intermédiaires de la réaction anodique en milieu aqueux sont des hydroxylées qui sont adsorbées sur la surface. Des mécanismes simples ont été proposés :



## IV. EFFET DE LA CORROSION SUR LES CORDONS DE SOUDURE

Le soudage peut avoir une incidence importante sur la résistance à la corrosion, si celui-ci n'est pas réalisé dans les règles de l'art. Il n'existe pas de mode de corrosion spécifique aux cordons de soudure. Cependant, suivant le type de milieu corrosif en contact avec la soudure, c'est une ou plusieurs transformations induites par le soudage qui auront une influence sur la tenue à la corrosion de l'assemblage.

Le soudage provoque trois effets principaux :

- Un effet chimique : le métal fondu subit l'ensemble des réactions qui peuvent se produire lors de l'élaboration d'un alliage d'aciérie.
- Un effet thermique local et rapide concernant aussi bien le métal de base que le métal fondu et qui peut conduire à des transformations microstructurales.
- Un effet mécanique dû au caractère local de la zone chauffée et qui peut provoquer des déformations et un champ de contraintes résiduelles lors du refroidissement.

#### **IV.1. Effet chimique**

Il se manifeste à deux niveaux pour la corrosion, d'une part au niveau de la composition globale du métal fondu par rapport au métal de base et d'autre part au niveau des ségrégations interdendritiques. Même en utilisant des produits d'apport dit "homogènes" il existe toujours une différence de composition chimique des soudures par rapport au métal de base qui peut conduire à des risques de couplage galvanique (le matériau le moins noble va se corroder). Il est donc important de bien choisir le métal d'apport. La soudure possède une microstructure brute de solidification avec une ségrégation dendritique nécessairement plus importante que dans le métal de base qui a subi une recristallisation. Une des principales conséquences est que la résistance intrinsèque à la corrosion d'un métal déposé, même parfaitement homogène, est inférieure à celle du métal de base. Cependant, la différence est souvent minime et ne pose pas de problèmes dans l'immense majorité des cas.

#### **IV.2. Effet thermique**

Contrairement à l'effet chimique du soudage qui ne concerne que le métal fondu, cet effet s'applique conjointement au métal fondu et au métal de base jusqu'à une certaine distance de la ligne de fusion. Il dépend de la température, de la durée du maintien ainsi que de la vitesse de montée et de descente. Le caractère local du traitement thermique permet de prédire avec une précision relativement bonne la localisation des transformations de phases qui peuvent se produire dans le matériau. La vitesse de refroidissement doit être suffisamment grande pour éviter la précipitation de phases intermétalliques, provoquant des risques de corrosion intergranulaire. Le risque est d'autant plus grand que le matériau est allié. L'existence de ces précipités néfastes ne se voit pas, ni à l'œil nu, ni à l'aide des techniques classiques de contrôle habituellement utilisées sur les soudures. Pour limiter la corrosion liée à l'effet thermique il est important de bien maîtriser les paramètres de soudage : énergie de soudage, voltage, vitesse de soudage, température d'interpasse, rendement thermique des procédés.

#### **IV.3. Effet mécanique**

Tout assemblage soudé comporte des contraintes résiduelles, cet effet engendre la corrosion sous contrainte qui se manifeste par l'apparition de très fines fissures, dont la détection est souvent délicate. Ces fissures se rencontrent principalement au voisinage des cordons de soudure dans le métal de base. Une des possibilités pour limiter ce phénomène est de diminuer les contraintes dans

le matériau. Le niveau de contraintes est relié à la largeur de la zone chauffée. On peut donc diminuer ce dernier en abaissant l'énergie de soudage et en effectuant par exemple un soudage par petites passes plutôt qu'en balayage.

## **V. TRADUCTION ELECTROCHIMIQUE DE PHENOMENE DE LA CORROSION**

Les phénomènes de corrosion sont très complexes, dès lors qu'ils mettent en jeu plusieurs processus à savoir : le transport de matière, le transport de charges, l'adsorption.... L'existence de plusieurs méthodes d'investigation est de ce fait nécessaire pour rendre compte de la tenue à la corrosion d'un matériau donné vis-à-vis d'un environnement agressif.

Les méthodes électrochimiques peuvent être scindées en deux groupes : les méthodes stationnaires et les méthodes non stationnaires dites transitoires.

### **V.1. Méthodes stationnaires**

Elles permettent d'étudier un système se trouvant dans un état quasiment d'équilibre thermodynamique ; elles tiennent compte de tous les couples redox dans la solution.

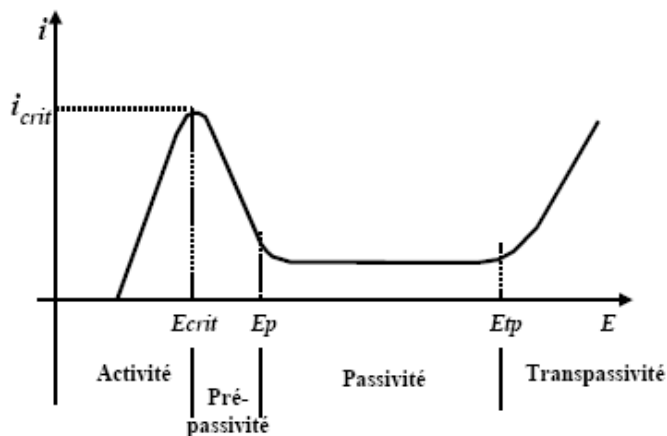
#### **V.1.1. Évolution du potentiel libre en fonction de la durée d'immersion**

Le suivi temporel du potentiel de corrosion a un double objectif : d'une part, il permet d'avoir une première idée du comportement de la surface en milieu corrosif (corrosion, formation d'une couche passive ...), et d'autre part, il permet de déterminer le temps nécessaire à l'obtention d'un régime stationnaire, indispensable pour les tracés potentiodynamiques et les spectres d'impédances. Cette mesure est effectuée entre l'électrode de travail et l'électrode de référence [36]. Également désigné par potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore libre, il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable. En outre c'est la seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié [46].

L'interprétation repose sur le diagramme dit d'Evans qui exprime graphiquement que le courant global correspond à la somme algébrique des composants anodiques et cathodiques. La figure II.7 illustre ce principe [46]. Bien qu'il s'agit d'un potentiel mixte, qui n'est pas une quantité thermodynamique, sa valeur peut être interprétée à l'aide des diagrammes potentiel – pH- température de Pourbaix qui définissent pour chaque couple métal – milieu les domaines de



stabilité de l'état métallique (immunité par protection cathodique), du cation en solution (corrosion active), de composés solides en surface (passivation) [46].



**Figure II.4:** Évolution du courant anodique et traduction électrochimique des phénomènes de passivité sur le courbe  $i = f(E)$ .

Il faut toutefois garder présent à l'esprit qu'il s'agit là d'une information issue de la thermodynamique qui ne donne donc aucune indication sur la vitesse effective de dissolution dans les domaines de corrosion ou de passivation. Les mesures de potentiel de corrosion sont donc systématiquement complétées par des tracés de courbe intensité – potentiel, ou courant tension [46].

### V.1.2. Courbes de polarisation

Une courbe potentiodynamique décrit l'évolution de la densité de courant de l'électrode de travail soumise à une différence de potentiel.

Cette courbe donne des informations sur la vitesse de la réaction électrochimique et sur les éventuelles modifications de la surface de l'électrode étudiée.

Une différence de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence est imposée et la densité de courant résultant traversant l'électrode de travail est ainsi mesurée.

La courbe classiquement étudiée est le logarithme décimal de la densité de courant  $\log(i)$  exprimé en  $A/cm^2$ , en fonction du potentiel appliqué  $E$ , exprimé en  $mV/ECS$ .

Une courbe potentiodynamique est composée de deux branches :

- Une branche anodique correspondant à la superposition des courants résultant des réactions d'oxydation :



- Une branche cathodique correspondant à la superposition des courants résultant des réactions de réduction :



Le tracé de la courbe de polarisation en coordonnée semi-logarithmique  $E = f \log(i)$ , dans le domaine de Tafel donne des droites de pente ba (portion anodique) et de pente bc (portion cathodique).

### V.1.3. Évolution de la résistance de polarisation ( $R_p$ )

La mesure de la résistance de polarisation  $R_p$  est une technique peu, voire non « perturbatrice » de l'interface métal/milieu. Elle permet donc un suivi de l'évolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion de l'échantillon.

La résistance de polarisation est égale à l'inverse de la pente à la courbe de polarisation  $i=f(E)$ , au voisinage de  $E_{cor}$ .

$$R_p = \Delta E / \Delta i$$

Une polarisation de quelques millivolts autour de potentiel de corrosion suffit à déterminer la résistance de polarisation d'une électrode.

Pour une variation de potentiel donné, plus l'intensité varie et plus la  $R_p$  est faible. Ainsi à une faible résistance de polarisation correspond une forte vitesse de corrosion et inversement.

### V.2. Méthodes transitoires : spectroscopie d'impédance électrochimique

Les différentes méthodes transitoires se différencient les unes des autres par la forme du signal respectif : une impulsion ou une modulation

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une méthode transitoire qui permet de séparer les contributions des différents phénomènes chimiques et électrochimiques qui se déroulent à l'interface métal solution.

Le principe de cette méthode consiste à surimposer un signal sinusoïdal de fréquence variable et de faible amplitude, à la valeur de la tension appliquée ou naturelle à l'électrode de travail, puis d'analyser la réponse en courant de système en fonction de la fréquence. Les différents types de réponse en fonction de la fréquence permettent alors de séparer les processus élémentaires.

L'impédance de l'interface électrochimique  $Z(\omega)$  est un nombre complexe qui peut être représenté soit en coordonnée polaire, soit en coordonnées cartésiennes ( $\text{Re } Z$ ,  $\text{Im } Z$ ) :

$$Z(\omega) = |Z| \exp j\varphi = \text{Re } Z + j \text{Im } Z$$

Les relations entre ces quantités sont :

D'une part

$$|Z|^2 = (\text{Re } Z)^2 + (\text{Im } Z)^2 \text{ et } \varphi = \arctan \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z}$$

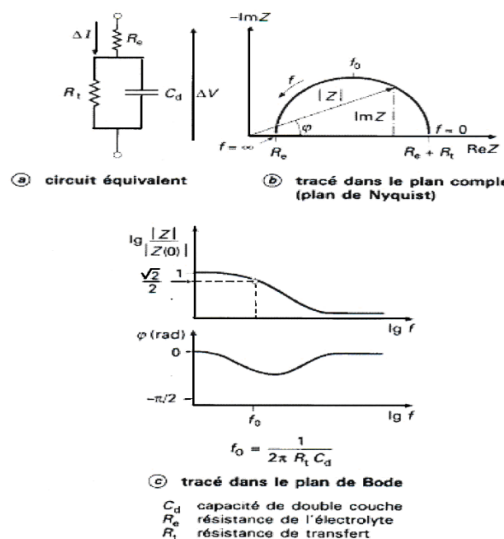
Et d'autre part

$$\text{Re } Z = |Z| \cos \varphi \text{ et } \varphi = \arctan \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z}$$

Deux types de tracé, illustrés sur la figure II. 8, sont utilisés pour décrire ces relations. Dans le cas d'une interface électrochimique constituée d'un métal en cours de corrosion, l'impédance est  $Z(\omega)$  avec:

$$Z(\omega) = \text{Re} + \frac{1}{\frac{1}{Rt} + jC_d \omega}$$

$Z(\omega)$  est tracé sur la figure II.8.b selon le formalisme de Nyquist dans le plan complexe ( $-\text{Im } Z$ ,  $\text{Re } Z$ ) avec la partie imaginaire négative portée au-dessus de l'axe réel comme il est habituel de le faire en électrochimie. Chaque point de diagramme correspond à une fréquence donnée du signal d'entrée. Dans la figure II.8.c un tracé dans le plan de Bode permet d'observer la variation de logarithme décimal du module de  $Z$  en fonction du logarithme de la fréquence d'une part, le déphasage en fonction du logarithme de la fréquence d'autre part. C'est grâce à ces configurations précises que l'on peut compter le nombre d'étapes en jeu dans le mécanisme [46].



**Figure II.5:** Différentes représentations d'une interface électrochimique en spectroscopie d'impédance électrochimique (a) ; diagramme de Nyquist (b) ou de Bode (c).

Il est par conséquent important de bien préciser le rôle des circuits électriques qui interviennent comme intermédiaires de calcul destinés à faciliter l'obtention des constantes cinétiques et qui permettent également de prévoir l'évolution des diagrammes d'impédance.

L'analyse en fréquence de l'impédance électrochimique permettra de différencier les divers phénomènes élémentaires en fonction de leur fréquence caractéristique (ou constante de temps). Les phénomènes électrochimiques rapides (transfert de charge) sont sollicités dans le domaine des hautes fréquences, tandis que les phénomènes lents (diffusion, adsorption) se manifestent aux basses fréquences [46].

## VI. CORROSION DES ALLIAGES DE FER

Le terme corrosion est généralement utilisé pour décrire la détérioration des métaux et ne s'applique pas aux matériaux non métalliques. Cependant, selon la conception la plus moderne, la corrosion est entendue comme la détérioration des matériaux en général, par l'action du milieu. Lorsque la corrosion se produit, le métal perd ses qualités essentielles telles que la résistance mécanique, l'élasticité, la ductilité et le produit de corrosion formé est généralement extrêmement pauvre en termes de ces propriétés.

En ce qui concerne le type de corrosion présenté par les alliages en fonte, ils présentent les mêmes formes générales de corrosion que les autres métaux et alliages. Quelques exemples des formes de corrosion observées dans les fontes incluent la corrosion galvanique, corrosion sélective

ou graphitisation, attaque uniforme ou généralisée, corrosion intergranulaire, corrosion - érosion, corrosion sous contrainte et corrosion associée à la fatigue.

Quand il s'agit du fer de haute pureté, avec une surface extrêmement uniforme, la présence d'oxygène suffisant donne naissance à de l'oxyde de fer hydraté qui est la forme la moins soluble de l'oxyde de fer. Si une forte adhérence de la rouille se produit au point d'attaque, il est possible que l'attaque ne soit pas terminée. Cependant, en général il y a beaucoup de zones dans le matériau corrodé où leur comportement est différent. Cette différence de comportement peut également se produire dans l'environnement. Comme il s'agit en général d'un conducteur d'électricité, une différence de potentiel est créée entre les différentes régions de comportement différent qui aboutissent à des cellules galvaniques, entre anodes locales et cathodes à la surface du métal, provoquant la continuité de la corrosion [47].

### VI.1. Mécanisme de la corrosion

Le processus de corrosion consiste en l'apparition simultanée d'au moins une réaction anodique et d'une réaction cathodique. La charge électrique produite dans la réaction anodique est totalement absorbée par la réaction cathodique. La solution est un bon conducteur, le métal qui subit la corrosion suppose un potentiel d'électrode, appelé potentiel de corrosion [48].

La corrosion sélective dans la fonte grise ou la graphitisation est le type de corrosion le plus commun dans ces matériaux. En graphitisation se produit l'attaque sélective de la matrice d'une fonte et le graphite reste intact. Ce type de corrosion est également connu sous le nom de corrosion graphitique. Cette dernière se produit dans la fonte grise et la fonte nodulaire à température ambiante. En cela, du fait de l'hétérogénéité du matériau, le mécanisme électrochimique de la corrosion sélective provoque l'attaque localisée et destructrice de la matrice de ferrite ( $\alpha$ -Fe), qui fonctionne comme une anode. La réaction d'oxydation qui se produit dans l'anode provoque la dissolution du fer selon la réaction (1).

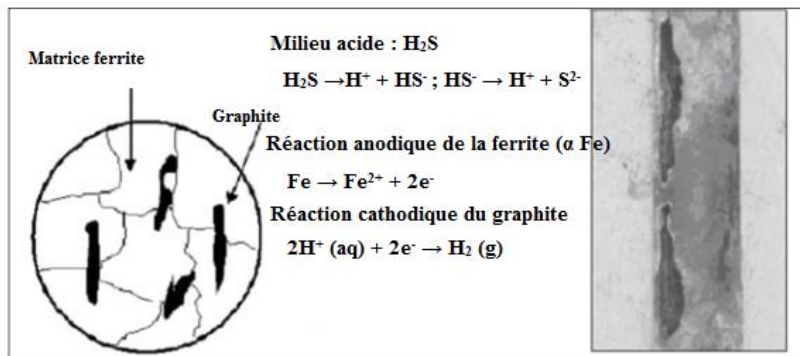


Dans les zones cathodiques, les régions où se trouve le graphite sont la réduction de l'oxygène dissous avec formation d'ions hydroxydes et, éventuellement, la libération d'hydrogène gazeux, selon les réactions indiquées en (2) et (3):





Mainier *et al.* [49] ont constaté que l'attaque localisée provoque un aspect très fragile et poreux dans le matériau, un mécanisme qui est représenté sur la figure II.6.



**Figure II.6:** Mécanisme de graphitisation dans la fonte en présence de  $\text{H}_2\text{S}$  [49].

Un autre mécanisme de corrosion commun dans les alliages de fer est la corrosion galvanique. Ce type de corrosion se produit lorsqu'un métal ou un alliage est électriquement connecté à un autre métal dans le même électrolyte. L'intensité de ce type de corrosion sera proportionnelle à la différence de potentiel électrochimique des matériaux impliqués dans le processus. Dans ce type de corrosion, la proportion entre les zones anodique et cathodique a une influence. Ce rapport doit être le plus bas possible afin d'obtenir la corrosion minimale dans la zone anodique ainsi que son uniformité.

La corrosion atmosphérique de la fonte peut être schématiquement décrite par la réaction suivante :



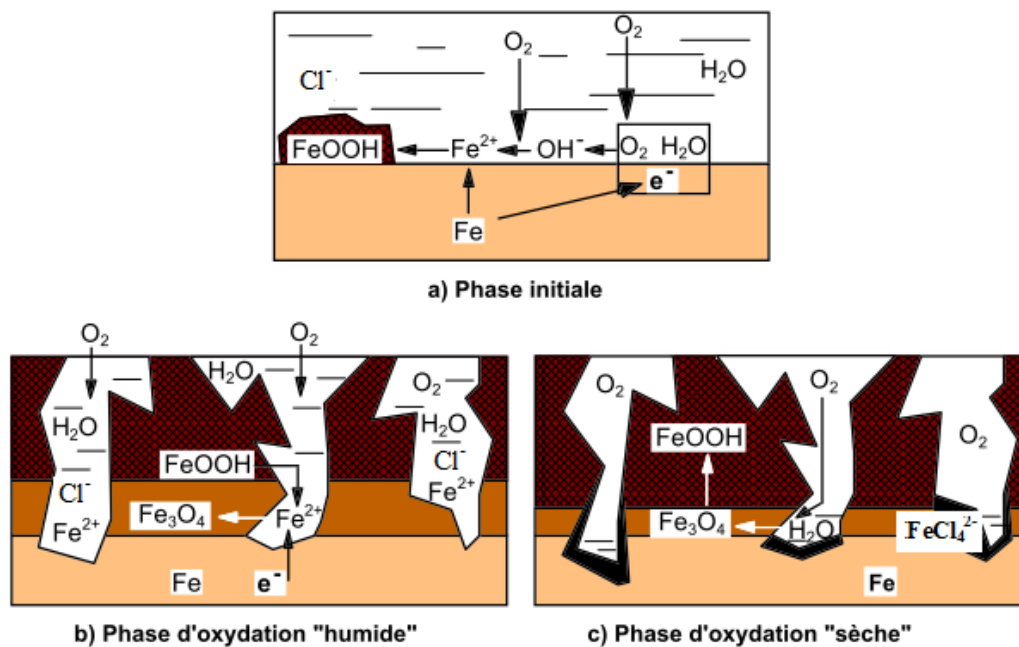
Le composé  $\text{FeOOH}$ , qui peut être considéré comme de l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hydratée ( $2\text{FeOOH} \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ) désigne globalement la rouille, qui est en fait un mélange complexe de différentes phases cristallines et amorphes d'oxydes et d'hydroxydes de fer et dont la stœchiométrie ne correspond qu'approximativement à la formule globale  $\text{FeOOH}$ . Les trois composants principaux de la rouille sont respectivement :

- La lépidocrocite  $\gamma$ - $\text{FeOOH}$  de structure rhomboédrique;
- La goethite  $\alpha$ - $\text{FeOOH}$  de structure rhomboédrique;
- La magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  de structure cubique.

La composition de la rouille varie en fonction des conditions climatiques et de la durée d'exposition. Elle varie de plus entre l'intérieur et l'extérieur de la couche :

- La partie extérieure est le plus souvent poreuse et principalement constituée de goethite et de lépidocrocite.
- La partie intérieure, adjacente au métal, est en général relativement dense et formée de magnétite et de phases amorphes de FeOOH;

Lorsqu'on expose une surface de fonte à l'atmosphère humide, elle se recouvre rapidement d'un film mince de produits de corrosion. Cette réaction de formation de la rouille est d'autant plus rapide que la surface est contaminée par des polluants comme les ions de chlore. Les différentes étapes du mécanisme sont représentées à la figure II.7.



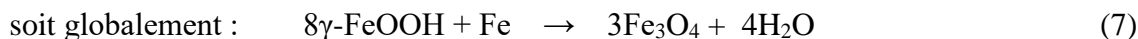
**Figure II.7:** Mécanisme réactionnel de la corrosion atmosphérique de la fonte [49].

Dans un premier temps (figure II.7.a), l'oxygène de l'air diffuse à travers le film liquide et se réduit en ions OH<sup>-</sup> à la surface du métal tandis que le fer s'oxyde en ions ferreux Fe<sup>2+</sup> qui passent en solution dans l'électrolyte.

Les ions ferreux en solution réagissent ensuite avec l'oxygène dissous pour former la lépidocrocite γ-FeOOH selon la réaction :



Plus la couche de  $\gamma$ -FeOOH devient importante et plus la réaction se ralentit car d'une part la surface de fer "active" diminue et d'autre part la diffusion de l'oxygène est limitée par la présence de la couche de  $\gamma$ -FeOOH (figure II.7.b). Lorsque la concentration en oxygène est devenue suffisamment faible, la lépidocrocite réagit à son tour avec les ions  $\text{Fe}^{2+}$  en phase aqueuse pour donner la couche de magnétite selon la réaction :



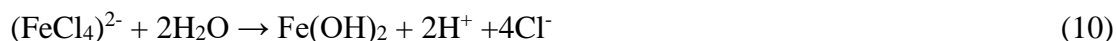
La rouille  $\gamma$ -FeOOH se comporte donc comme un oxydant vis-à-vis du fer de la même manière que l'oxygène. Selon (7), la réaction devrait s'arrêter lorsqu'elle a consommé toute la rouille, mais en fait la réduction du  $\gamma$ -FeOOH ne se produit qu'en phase aqueuse faiblement concentrée en  $\text{O}_2$ .

Lors des phases "sèches" (film d'eau très mince et forte concentration en  $\text{O}_2$ ), la magnétite réagit avec l'oxygène de l'air (figure I.31.c) pour reformer le  $\gamma$ -FeOOH selon la réaction :



On assiste donc à un phénomène cyclique entre les phases "humides" et "sèches" conduisant à une transformation de lépidocrocite  $\gamma$ -FeOOH en magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  et réciproquement, avec consommation de métal durant la phase "humide".

R. Mehra et *al.* [85] ont étudié la variation de la vitesse de corrosion et de la densité de courant de corrosion d'une fonte grise en fonction du temps d'immersion dans diverses solutions salines. D'après ces hauteurs, les solutions de NaCl sont les plus corrosives pour la fonte. Ils mentionnent aussi que les anions jouent un rôle primordial à la détermination de la facilité avec laquelle la fonte a subi une dissolution lors de l'application d'une certaine densité de courant anodique. Ceci peut être lié à l'accélération des anions et au comportement des inhibiteurs causés par la stabilité du film d'oxyde de fer (FeO) formé après une réaction de corrosion. Ainsi, on peut citer les principaux mécanismes de corrosion des fontes par l'action des chlorures. En premier lieu, les chlorures sont adsorbés dans la couche protectrice de l'oxyde de fer, par la suite, le fer oxydé (FeO) réagit en complexe soluble  $(\text{FeCl}_4)^{2-}$  suivant la réaction (2), ce dernier réagit avec l'eau pour former l'hydroxyde de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  suivant la réaction (3).





Le pH est alors abaissé et la concentration du chlorure est augmentée. Le cycle répété impliquant la réaction de  $\text{Fe}^{2+}$  avec les ions  $\text{Cl}^-$ , la formation de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  et la libération des ions de  $\text{H}^+$  et de  $\text{Cl}^-$ , continuent jusqu'à ce que la couche protectrice de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  est complètement détruite. La migration des ions de chlorures vers le fond d'une piqure, sous l'effet du champ électrique augmente la concentration d'anions agressifs dans la cavité. Une fois formée ce phénomène est auto-catalytique. La piqure crée des conditions favorables à sa croissance. Une des formes principales de corrosion provoquées par l'ion de chlorure est la corrosion par piqûres.

### VI.2. Caractéristiques des produits de corrosion

Misawa *et al.* [90] et Sarin *et al.* [91] ont effectué leurs investigations en exposant les échantillons à des milieux neutres tels que de l'eau et des milieux à forte salinité tels que le chlorure de sodium simulant l'environnement marin. Les structures cristallographiques des couches de produits de corrosion formées sur la fonte, l'acier au carbone et le fer pur, exposés aux mêmes conditions sont similaires. Sur les deux métaux, les principaux composés présents sont:  $\alpha$ -FeOOH (goethite),  $\beta$ -FeOOH (akaganeite),  $\gamma$ -FeOOH (lépidocrocite),  $\delta$ -FeOOH (amorphe) et  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . La différence entre les couches est la compaction et le niveau de porosité résultant de la disposition des présents composés.

Sarin *et al.* [50] ont étudié l'influence des produits de corrosion d'une fonte et de fer pur sur la contamination de l'eau potable. Ils ont effectué une évaluation pour identifier les principaux produits de corrosion dans les deux matériaux après séchage du produit. Ils ont observé que les produits avaient : la goethite  $\alpha$ -FeOOH, FeO, la magnétite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et la lépidocrocite  $\gamma$ -FeOOH.

D'après Misawa *et al.* [51], dans le cas de l'acier au carbone et de la fonte, la rouille est constituée d'une couche désordonnée de  $\delta$ -FeOOH amorphe avec des îlots espacés de  $\alpha$ -FeOOH,  $\beta$ -FeOOH et / ou  $\gamma$ -FeOOH et  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . La formation de rouille, qui est l'oxyde de (III) monohydrate ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), un composé qui a une coloration brun rougeâtre. La rouille se forme lorsque le fer s'oxyde en présence d'air et d'eau. Survenant l'oxydation du fer métallique au cation de fer, comme indiqué dans la réaction 11.

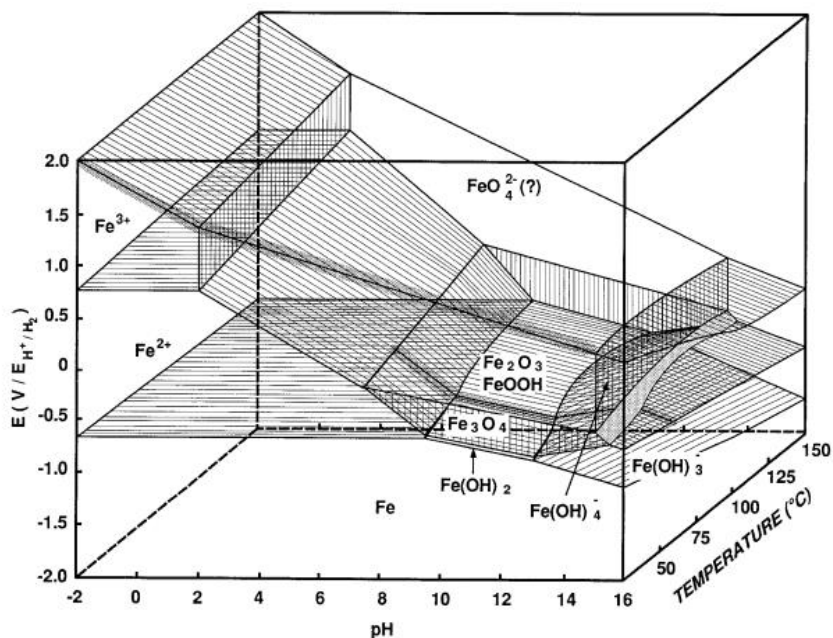


Simultanément, il y a la réaction de réduction d'eau suivante, montrée dans la réaction 12.



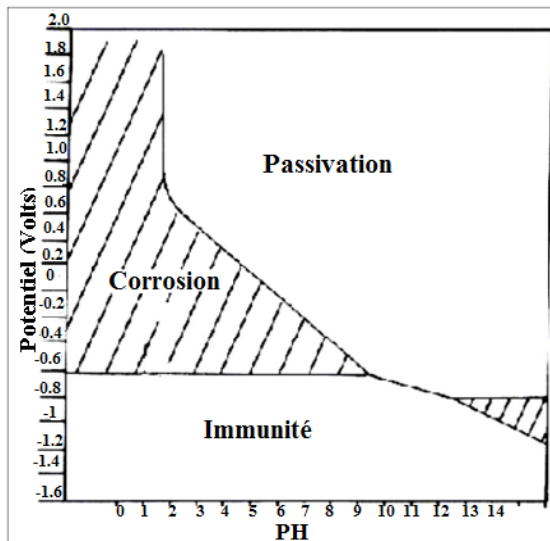
La formation d'hydroxyde ferreux ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) se produit qui, en présence d'oxygène, est oxydée en hydroxyde de fer (III) ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ). Par la suite, il perd de l'eau et devient de l'oxyde de fer (III) monohydraté ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), appelé rouille.

Le Diagramme d'équilibre en fonction du pH pour le système fer-eau (le diagramme de Pourbaix (figure II.8) présente les conditions de stabilité thermodynamique du fer et de ses dérivés qui peuvent exister en présence d'eau ou de solutions aqueuses.



**Figure II.8:** Diagramme E-pH-T du système Fe - H<sub>2</sub>O (activité des ions = 10<sup>-6</sup>M) [52].

La figure II.9 montre un schéma d'équilibre thermodynamique des différents états dans lesquels le fer peut être trouvé dans un milieu aqueux. Le diagramme de Pourbaix montre qu'à faible potentiel le fer présente une immunité, ne réagissant pas avec le milieu. Cependant, diverses réactions peuvent se produire sur la surface. Dans cette région, il n'y a pas de possibilité de dégradation du matériau. Dans une autre situation, avec un potentiel plus élevé et dans la plage de pH acide, le fer peut être actif et avec une dissolution constante. Dans ce cas, le fer forme un film d'oxyde qui peut le protéger, le rendant passif, dépendant également du pH. Comme le montre le diagramme, l'état de passivation se produit également à un pH alcalin.



*Figure II.9: Diagramme d'équilibre dynamique de Pourbaix, système Fer-Eau, avec les limites de la corrosion, de la passivation et de l'immunité [52].*

## VII. Conclusion

Dans le deuxième chapitre généralité sur la corrosion, nous avons défini la corrosion en générale et examine les différentes informations qui s'y rapportent, et aborde la corrosion des aciers inoxydables et les alliages de fer, en mentionnant les informations les plus importantes qui prouvent nous être utiles dans nos recherches.

**CHAPITRE III**  
**RÉALISATION ET**  
**TECHNIQUES**  
**EXPÉRENTALES**

## CHAPITRE III RÉALISATION ET TECHNIQUES EXPÉRENTALES

### III.1 INTRODUCTION

Il existe plusieurs techniques pour estimer l'évolution des propriétés physiques, chimiques et mécaniques de différentes soudures dans les travaux scientifiques expérimentaux. Dans ce chapitre nous exposons ces techniques utilisées dans cette étude pour caractériser les joints de soudure hétérogène et homogène obtenu pour différents paramètres de soudage TIG.

### III.2. MATERIAUX UTILISES

#### III.2.1 Matériaux De Base :

L'acier AISI 430 est l'un des aciers inoxydables ferritiques les plus populaires. Bien que des aciers inoxydables ferritiques plus modernes aient été développés, la production d'AISI 430 est encore élevée en raison de son faible coût et de ses bonnes propriétés de corrosion.

Les aciers utilisés pour l'étude, ont été usiné sous forme de tôles.

#### III.2.2 Composition chimique AISI 430

L'acier AISI430 se compose de plusieurs matériaux qui ont déterminés par l'appareil SPECTRO de type FOUNDRY-MASTER XPERT au niveau du CRTI.

	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Al	N	Fe
W <sub>i</sub> (%)	0.05	0.42	0.22	16.85	0.09	0.14	0.11	0.06	0.01	0.01	Bal

### III.4 PROCEDURE DE SOUDAGE

Dans notre travail on a utilisé le soudage Tungstène Inerte Gaz (TIG) manuel, ce choix est justifié par la bonne qualité des cordons qui sont présents le petite nombre de défauts en surface par rapport aux autres procédés existants, Ainsi le TIG présent des bonnes propriétés mécaniques des joints soudés par rapport le Shielded métal arc welding (SMAW).

L'opération de soudage TIG a été faite sur 2 pièces, pour chaque paramètre de soudage qui est basé sur l'utilisation de deux types de courant CC et PC avec une polarité normale

#### III.4.1 Paramètre de soudage

L'opération de soudage est réalisée au niveau de l'atelier de soudage au Centre de Recherche en Technologie Industrielle (CRTI) par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant donne les principaux paramètres de TIG utilisés pour les procédés réalisés.

➤ **Courant Continu**

Tension (A)	Vitesse (mm/s)	Voltage (V)	m Débit de gaz (L/min)	N° Passes
90	8	12	12	1

➤ **Courant Pulsé**

Tension Bas(A)	Tension Haut (A)	Fréquences (Hz)	Vitesse(mm/s)	Voltage(V)	m(L/min)	N° Passes
45	90	6	8	12	12	1

### III.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LES TESTS ÉLECTROCHIMIQUES

Avant de procéder à des tests électrochimiques, il faut passer par l'étape de préparation des échantillons à souder.

L'AISI 430 se présente sous forme d'une tôle de 100 mm de 150 mm longueur de 0.5 mm d'épaisseur (figure III.1).



*Figure III.1: Les tôles soudées.*

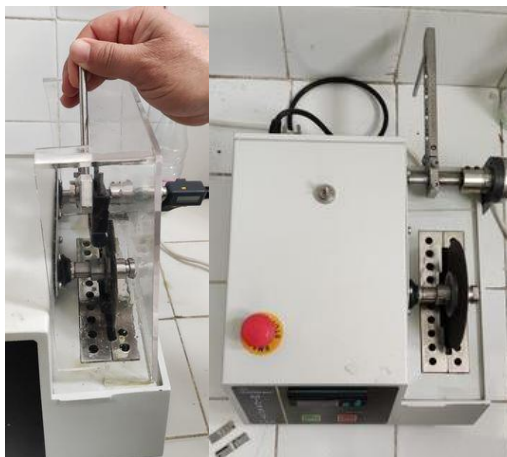
### III.4.2 Préparation des électrodes de travaille à des tests de corrosion

#### III.4.2.1 Découpage

Pour le processus de découpe, il a été utilisé par un micro-tronçonneuse de marque Micra Cut 125 en sien de laboratoire Technologie des Matériaux à l'USTHB. Les échantillons étant refroidis par une huile spécifique, afin de ne pas chauffer les échantillons (Figure III.2). La vitesse de rotation de la machine est de 275 tours/minute (Figure III.3).



*Figure III.2: Échantillons après découpages.*



*Figure III.3: Tronçonneuse de marque MICRO-CUT 125.*

#### III.4.2.2 Soudage de file électrique à l'étain

Pour le processus de soudage à l'étain, il a été utilisé par un fer à souder au chauffage le panne et le morceau de fil pour bien assembler (figureIII.4).



*Figure III.4: Soudage d'électrode par l'étain.*

### III.4.2.3 Enrobage

C'est un procédé de moulage qui consiste à emballer l'échantillon dans une résine polymérisant les échantillons sont enrobés dans des cylindres en plastique, ce processus est très important pour faciliter la manipulation et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage.

Les échantillons sont souvent enrobés dans des cylindres en plastique, cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation surtout dans le cas des échantillons minces et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. C'est un procédé de moulage qui consiste à envelopper l'échantillon dans une résine polymérisant (figure III.5).



*Figure III.5: électrode de travail enrobée.*

Deux types de résines ont été utilisés, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. Les deux types d'enrobage :

- À chaud : se fait dans une résine bakélite dans une presse pour l'observation optique.
- À froid : se fait dans un moule de résine auto-durcissant pour la caractérisation électrochimique.



### III.4.2.4 Polissage

Après l'enrobage, placez l'échantillon sur la polisseuse mécanique de marque Auto Mat A2 DISQUES Tech Z64 (figure III.6), C'est une opération mécanique qui rend possible l'état miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques de papier abrasif de grains différents, du plus gros au plus fin:( 80,180,220.....,1200;2400) tournant à vitesse variable, cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.



*Figure III.6 : Polisseuse de marque DISQUES Tech Z64 .*

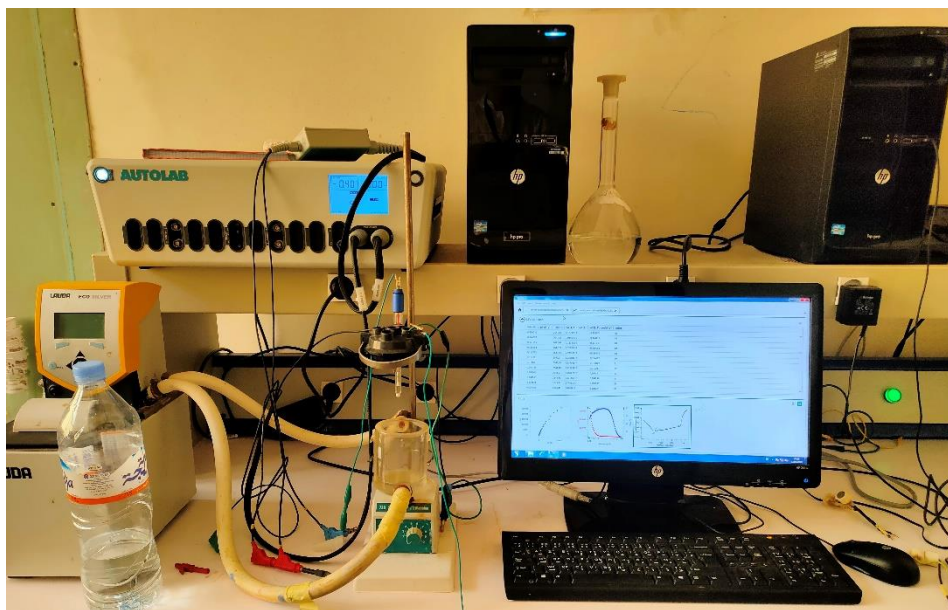
## III.5 Étude de comportement électrochimique

### III.5.1 Dispositif électrochimique

Les tests électrochimiques ont été réalisés au moyen d'une chaîne électrochimique (figure III.7) composée de:

- Un potentiostat-galvanostat type EGG Princeton 263.
- Une unité de traitement informatique composée d'un ordinateur, muni du logiciel AUTOLAB. Ce dernier permet le calcul des paramètres électrochimiques et l'évaluation de la vitesse électrochimique.
- Une cellule électrochimique cylindrique en verre pyrex, permettant l'introduction de l'électrode de travail, l'électrode de référence au calomel saturée (ECS), l'électrode auxiliaire ou contre électrode ainsi que le barboteur et le thermomètre.
- Un ordinateur qui pilote l'ensemble et effectue l'acquisition et le traitement des données grâce au logiciel NOVA, pour les méthodes stationnaires (méthode de Tafel) et

la spectroscopie d'impédance électrochimique qui permet d'identifier les mécanismes se déroulant à l'interface métal/solution et proposer des modèles cinétiques



*Figure III.7: La chaîne des test électrochimiques.*

### III.5.2 Cellule électrochimique

Les mesures électrochimiques ont été effectuées dans une cellule de forme cylindrique en verre pyrex d'une contenance de 250 ml (figure III.8). Le montage de cette cellule est un montage classique à trois électrodes : l'électrode auxiliaire, l'électrode de référence et l'électrode de travail. Le potentiel de l'électrode de travail est défini et mesuré par rapport à l'électrode de référence, connectée à la cellule électrolytique à l'aide d'un pont de Na CL (Chlorure de Sodium) dont l'extrémité du capillaire se trouve à 1mm de l'échantillon.

Une troisième électrode dite auxiliaire ou contre électrode, permet de faire passer dans le circuit le courant électrique nécessaire pour produire la différence de potentiel désirée

Toutes les mesures ont été réalisées à température ambiante, avec agitation continue du bain électrolytique.

Le montage qui a été utilisé ici est une cellule électrochimique constituée de trois électrodes plongées dans une solution conductrice.

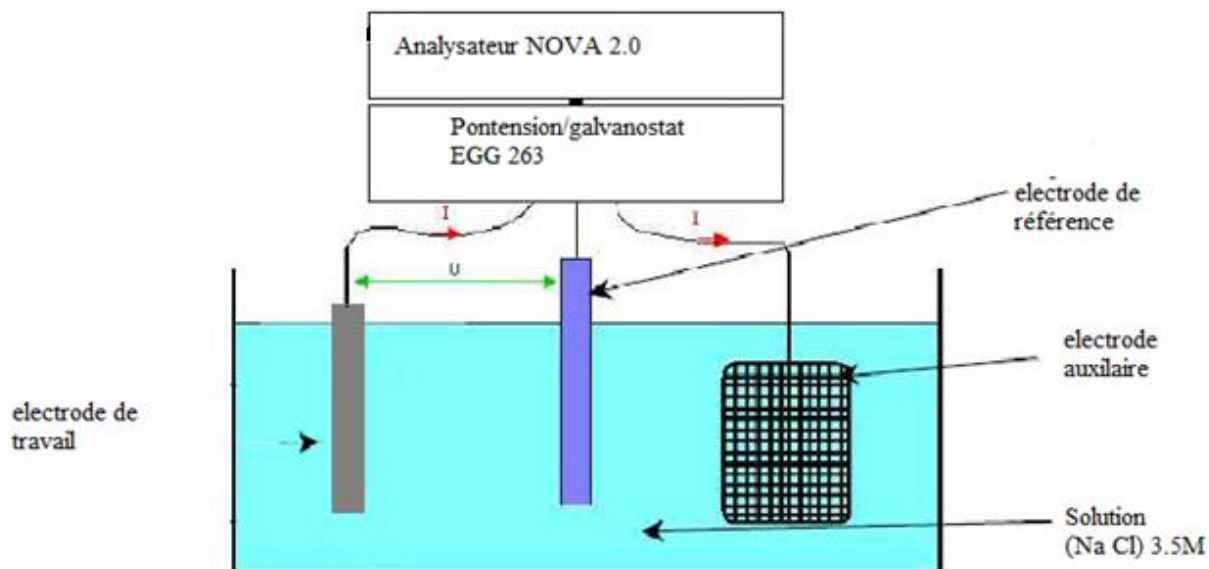


Figure III.8: Schéma de la cellule électrochimique

### III.5.3 Électrode de travail

Les échantillons destinés à la confection des électrodes de travail utilisées lors des essais électrochimiques, sont découpés d'une surface d'environ  $1\text{cm}^2$ .

Afin d'assurer le contact électrique entre le spécimen et le montage électrochimique, chaque échantillon est soudé avec de l'étain à des fils électriques en cuivre, qui à leur tour sont introduits dans un tube en quartz. L'ensemble (échantillon soudé + partie basse de la canne) est ensuite enrobé dans une résine (figure III.9) pour être isolé du milieu corrosif.

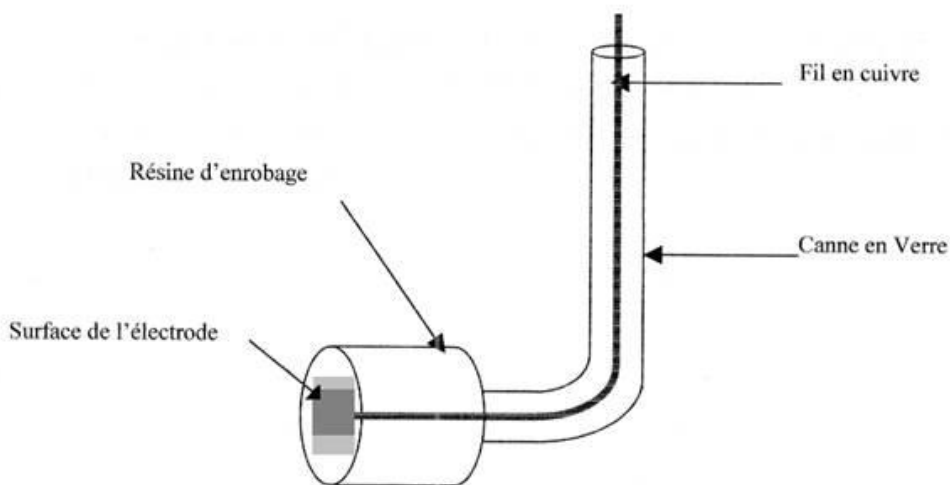


Figure III.9: Représentation schématique de l'électrode de travail.

Afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles, avant chaque essai électrochimique la surface de l'électrode de travail est polie mécaniquement à l'aide de papiers abrasifs de différentes granulométries (de 180 à 1200), nettoyée dans une cuve à ultrasons afin d'éliminer tous les résidus issus du polissage effectué, puis rincée à l'eau distillée suivi d'une immersion immédiate dans l'électrolyte contenue dans la cellule électrochimique.

#### III.5.4. Méthodes d'études

Pour étudier le comportement électrochimique de nos échantillons, nous avons tracé trois types de courbes électrochimiques à savoir :

##### III.5.4.1. Potentiel à circuit ouvert: courbe $e=f(t)$

La mesure du potentiel à circuit ouvert, communément désigné par potentiel d'abandon ou potentiel libre, en fonction du temps permet d'atteindre l'état stationnaire de l'électrode de travail et de délimiter l'intervalle de polarisation cathodique et anodique des courbes de polarisation. Dans notre cas, un temps d'immersion de 16 heures est suffisant pour atteindre cet objectif.

##### III.5.4.2. Courbe de polarisation : $\log(i)= f(E)$ .

Le tracé des courbes de polarisation en coordonnées semi-logarithmiques  $\log(i)= f(E)$ , dans le domaine de Tafel permet d'avoir un aperçu qualitatif des différents phénomènes électrochimiques (réduction de l'électrolyte, activation, passivation de l'électrode de travail).

Ces courbes sont obtenues en imposant à l'électrode de travail une rampe de potentiel à une vitesse de 1mV/s. Les courants faradiques des réactions électrochimiques sont alors enregistrés en fonction des potentiels appliqués. La polarisation est effectuée dans le sens cathodique-anodique après le temps de stabilisation du potentiel d'abandon (1200s).

##### III.5.4.3. Résistance de polarisation linéaire : $E=F(I)$

Cette méthode présente l'avantage de faire intervenir la courbe de polarisation au voisinage immédiat du potentiel de dissolution du métal dans la région où cette courbe est linéaire.

Elle consiste à mesurer la résistance de polarisation linéaire  $R_p$  qui est la pente de la courbe stationnaire intensité-potentiel au voisinage du potentiel d'abandon. Dans le cadre de notre étude une polarisation de  $\pm 20$  mV autour du potentiel libre a été appliquée à l'électrode de travail après un temps d'immersion de 1200s.

### III.5.5. Conditions opératoires

#### III.5.5.1. Électrolyte

Le comportement électrochimique des matériaux considérés a été étudié au contact d'une solution : Eau de mer Na Cl (3,5M) et de concentration 0.125 mol/L.

#### III.5.5.2. Agitation

Tout le long de nos expériences, nous avons maintenu une agitation moyenne. Cette agitation permet de renouveler la solution au voisinage de l'électrode de travail et de fixer un régime hydrodynamique reproductible.

#### III.5.5.3. Temps d'immersion

À l'abandon dans une solution d'électrolyte, une électrode prend une tension  $E$  ( $i=0$ ) appelée potentiel libre  $E_1$ . Ce potentiel est mesuré à circuit ouvert par rapport à une électrode de référence. Nos échantillons sont immergés dans la solution corrosive pendant 16heures avant chaque essai électrochimique, temps au bout duquel la tension d'abandon devient stable.

#### III.5.5.4. Vitesse de balayage

La vitesse de balayage du potentiel doit être suffisamment faible pour permettre à un état stationnaire de s'établir en tout point de la courbe de polarisation.

Les courbes globales de polarisation ont été tracées à une vitesse de  $10^{-6}$  v/s. Le domaine de balayage s'étend de -800 à +1000 mV par rapport à l'ECS. Un temps de 1200 sec a été adopté pour l'étude du potentiel en fonction du temps.

Par ailleurs, une vitesse de  $10^{-6}$  V/s a été utilisée pour l'étude de la résistance de polarisation linéaire, dans un intervalle de balayage de  $\pm 20$  mV par rapport au potentiel de corrosion.

### III.5.6 Spectroscopie d'impédance électrochimique

La principale limitation des méthodes stationnaires réside dans le fait que ces dernières ne donnent pas d'informations sur l'étape la plus lente du processus électrochimique.

L'emploi de techniques électrochimiques non stationnaire fondées sur l'analyse de la réponse d'une grandeur observable du système à la perturbation d'une autre grandeur, en l'occurrence, l'impédance électrochimique a été utilisée pour cette étude.

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est, entre autre, une technique classiquement employée pour détailler les mécanismes intervenant dans les processus de corrosion. Elle a donc souvent été utilisée lors d'études portant sur la corrosion des alliages d'aluminium dans différents milieux.

#### III.5.6.1 Mesure d'impédance

Lorsque l'on utilise un courant alternatif, les phénomènes de polarisation deviennent prépondérants face aux phénomènes de conduction. On ne mesure plus alors une résistance électrique mais une impédance complexe. Placer un élément isolant (diélectrique) entre deux électrodes revient à polariser le matériau. Ce matériau se comporte comme un condensateur de capacité  $C$ . Celle-ci dépend des dimensions géométriques du condensateur et de la permittivité diélectrique (ou constante diélectrique) du matériau [53,54].

### IV. Conclusion

Dans le chapitre expérimental, nous avons présenté les différentes étapes de préparation des échantillons à souder de et les électrodes de travail avant de procéder à des tests électrochimiques, en abordant les différentes machines utilisées et la méthode de travail.

# **CHAPITRE IV**

# **RÉSULTATS ET**

# **DISCUSSION**

## CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

### IV.1 INTRODUCTION

Selon la théorie de Nerst, aucun métal n'est vraiment insoluble, et tous les métaux ont tendance à passer en solution. Si une électrode en alliage ferreux est immergée dans une solution (alcaline, basique, acide ou sel) certains atomes de fer cèdent leurs électrons de valence et l'ion  $\text{Fe}^{2+}$  entre en solution. Ceci engendre un excès de charges négatives sur l'électrode métallique. Une différence de potentiel existe alors entre l'alliage ferreux et la solution. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'équilibre soit établi.

Afin de mettre en évidence l'effet de la température du l'électrolyte et le type du courant utilisé lors du soudage TIG, les échantillons ont été immergés dans une solution NaCl 3.5M comme décrit dans la section : techniques expérimentales.

### IV.2 L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE L'ÉLECTROLYTE SUR LE COMPORTEMENT À LA CORROSION DU MÉTAL DE BASE ET LES CORDONS DE SOUDURES

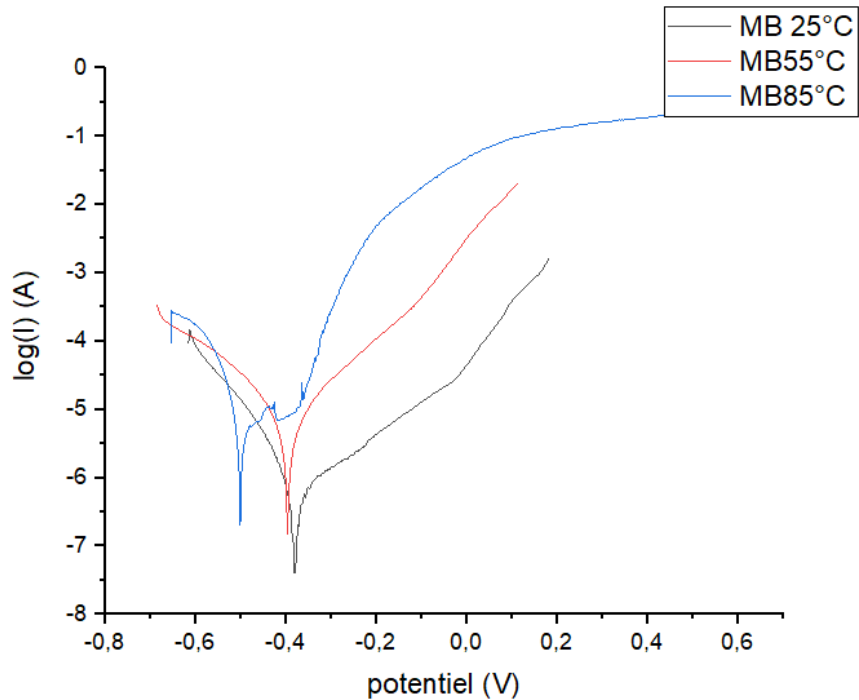
#### IV.2.1 Métal de base

##### IV.2.1.1 Courbe de polarisation

La courbe de polarisation décrit le comportement du métal de base en milieu Na Cl 3,5M (figure IV.1.). Les courbes de polarisation se composent de deux branches : anodique et cathodique. L'allure de ces deux branches, anodique et cathodique, et les deux droites de Tafel déterminent le courant de corrosion et le potentiel de corrosion. En suivant la direction de balayage depuis la zone de polarisation cathodique, la projection de l'intersection des deux droites de Tafel sur l'axe des potentiels coupe ce dernier au potentiel de corrosion  $E_c$ , correspondant au courant de corrosion nul.

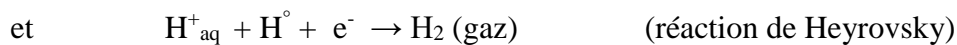
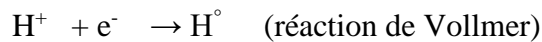
La partie anodique de la courbe de polarisation montre un accroissement continu du courant en fonction du potentiel.





**Figure IV.1** Les Courbes de polarisation du Métal de base (l'acier 430) à différentes températures de l'électrolyte NaCl 3,5M

Dans le milieu NaCl 3,5M à différentes températures, la réaction sur les aires cathodiques correspond à la réduction de l'ion hydronium  $H_3O^+$  ou du proton hydraté  $H^+_{aq}$ . Le déroulement de la réaction selon le mécanisme suivant [55]:



Ce mécanisme dépend de la nature du métal [2] et de la présence de certains anions [56-57]. L'allure de la branche anodique de la courbe potentiel-courant, révèle une dissolution continue de l'élément de base du zircaloy (le zirconium) qui passe en solution en abandonnant sa charge négative suivant la réaction d'oxydation :  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ .

Les paramètres électrochimiques du processus de corrosion de l'alliage de base l'acier 430 dans NaCl 3,5 M, obtenus à partir du logiciel de corrosion NOVA en extrapolant les droites de Tafel au potentiel de corrosion, sont rassemblées dans le tableau IV.1.

*Tableau IV.1: Les paramètres électrochimiques de métal de base (l'acier 430) à différentes températures de l'électrolyte NaCl 3,5M*

<b>T</b>	<b>Ec (V)</b>	<b>Ic (µA)</b>	<b>Bc(mV/dec)</b>	<b>Ba(mV/dec)</b>	<b>Rp (kΩ)</b>	<b>Uc(µm/an).10<sup>-3</sup></b>
<b>25°C</b>	-0.38	0.12	0.02	0.4	30.45	3.70
<b>55°C</b>	-0.41	1.61	0.02	0.07	4.45	17.16
<b>85°C</b>	-0.50	2.50	0.03	0.13	1.99	29.39

L'augmentation de la température de l'électrolytes fait déplacer en général les potentiels de corrosion des échantillons vers des valeurs plus anodiques (moins nobles).

Pour la température de l'électrolyte 55°C la variation du potentiel est de l'ordre de -0.41V, tandis que pour une température de l'électrolyte de 85°C, ce déplacement vers la région là moins noble de l'ordre de -0.50V.

La variation de la résistance de polarisation  $R_p$  est inversement proportionnelle à la variation du courant de corrosion.

Les valeurs de la résistance de polarisation autrement dit la résistance de transfert de charge voit sa valeur chutée dans le cas de l'augmentation de la température de l'électrolyte. Elle passe de 30.45 kΩ à 4.45 kΩ, respectivement pour les températures de l'électrolyte 25°C et 55°C, et de 1.99 kΩ dans le cas de la température de l'électrolyte 85°C.

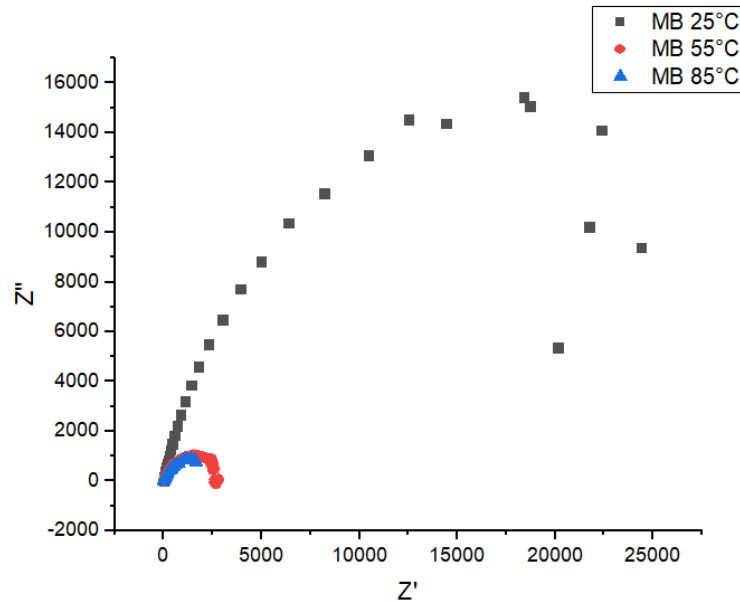
À la température 25°C de l'électrolytes l'acier AISI430, présente la plus faible vitesse de corrosion, soit 3.70 mm/an, et par conséquent une meilleure résistance à la corrosion,  $R_p$  de l'ordre de 30.45 kΩ.

#### IV.2.1.2 Courbe D'impédance

La spectroscopie d'impédance électrochimique a été appliquée avec succès pour l'étude des mécanismes de corrosion des cordons de soudures. Cette méthode permet de séparer les diverses contributions des mécanismes de corrosion par leurs cinétiques. Les phénomènes rapides sont observés en hautes fréquences tandis que les phénomènes les plus lents sont analysés aux plus faibles fréquences.

Les diagrammes de SIE en représentation de Nyquist obtenus pour les différents alliages sont présentés par les figures IV.2.

Les différents diagrammes présentent des boucles capacitives bien définies, avec des diamètres différents. Ces diamètres sont proportionnels aux résistances de transfert des surfaces des échantillons dans le milieu corrosif.



*Figure IV. 2 : Les courbes des impédances de métal de base d'inox AISI430 à des différentes températures d'électrolyte NaCl 3.5M.*

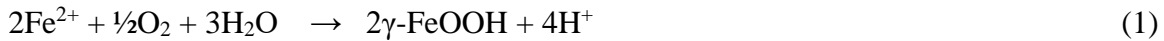
Donc, on peut constater que ce diamètre est influencé par la variation de la température de l'électrolyte. Pour une température de 25°C le diamètre le plus important, tandis que le plus petit diamètre est propre à la boucle de température de l'électrolyte est de 85°C. Ce qui veut dire que l'acier AISI430 résiste mieux à la corrosion au la température de l'électrolyte est de 25°C que les deux autres températures (55°C et 85°C).

#### IV.2.2 L'échantillon soudé par un courant continu

Il est bien connu que lorsqu'on expose une surface de l'acier à une atmosphère humide, elle se recouvre rapidement d'un film mince de produits de corrosion. Cette réaction de formation de la rouille est d'autant plus rapide que la surface est contaminée par des polluants comme les ions de chlore [58].

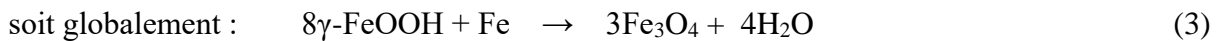
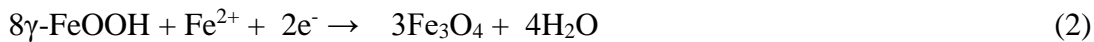
Dans un premier temps, l'oxygène de l'air diffuse à travers le film liquide et se réduit en ions  $\text{OH}^-$  à la surface du métal tandis que le fer s'oxyde en ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  qui passent en solution dans

l'électrolyte. Les ions ferreux en solution réagissent ensuite avec l'oxygène dissous pour former la lépidocrocite  $\gamma$ -FeOOH selon la réaction [58-59] :



La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la température de l'électrolyte. Ce comportement est dû probablement à la formation de la couche  $\gamma$ -FeOOH.

Plus la couche de  $\gamma$ -FeOOH devient importante et plus la réaction se ralentit car d'une part la surface active (surface de l'acier 430 en contact avec la solution d'immersion (NaCl 3.5 M) diminue et d'autre part la diffusion de l'oxygène est limitée par la présence de la couche de  $\gamma$ -FeOOH. Lorsque la concentration en oxygène est devenue suffisamment faible, le produit de corrosion ( $\gamma$ -FeOOH) réagit à son tour avec les ions  $\text{Fe}^{2+}$  en phase aqueuse pour donner la couche de magnétite selon la réaction [58-59] :



La rouille  $\gamma$ -FeOOH se comporte donc comme un oxydant vis-à-vis du fer de la même manière que l'oxygène. Selon (3), la réaction devrait s'arrêter lorsqu'elle a consommé toute la rouille, mais en fait la réduction du  $\gamma$ -FeOOH ne se produit qu'en phase aqueuse faiblement concentrée en  $\text{O}_2$  [59].

Les paramètres électrochimiques d'un métal AISI 430 soudée par courant continue à déférente température obtenues sont regroupé dans le tableau IV.2 listé les résultats.

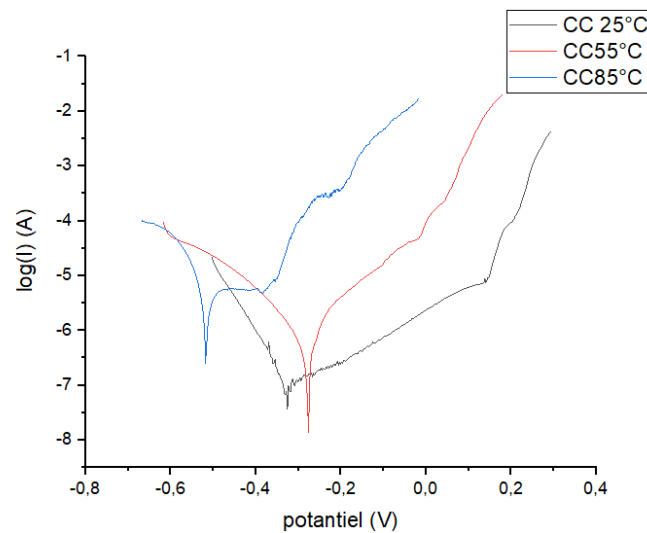
*Tableau IV 2 : Les paramètres électrochimiques à déférente températures des cordons de soudures soudés par un courant continu.*

T	Ec (V)	Ic ( $\mu\text{A}$ )	Bc (V/dec)	Ba (V/dec)	Rp (k $\Omega$ )	Uc(mm/an) $10^{-3}$
25°C	-0.33	0.19	0.03	0.05	136.87	0.88
55°C	-0.28	0.82	0.02	0.05	31.64	2.47
85°C	-0.51	7.82	0.04	0.03	3.33	10.53

Les valeurs de la résistance de polarisation diminuent plus de  $100\text{ k}\Omega$  et de  $133\text{ k}\Omega$  pour les températures plus chaudes de l'électrolyte respectivement  $55\text{C}^\circ$  et  $85\text{C}^\circ$  par rapport à la température  $25\text{C}^\circ$  de l'électrolyte.

Les valeurs de la densité de courant augmentent avec l'augmentation de la température de l'électrolyte, qui passent de  $0.19\mu\text{A}$  à  $0.82\mu\text{A}$  et à  $7.81\mu\text{A}$ , respectivement pour les températures de l'électrolyte  $25\text{C}^\circ$ ,  $55\text{C}^\circ$  et  $85\text{C}^\circ$  (Tableau IV.2).

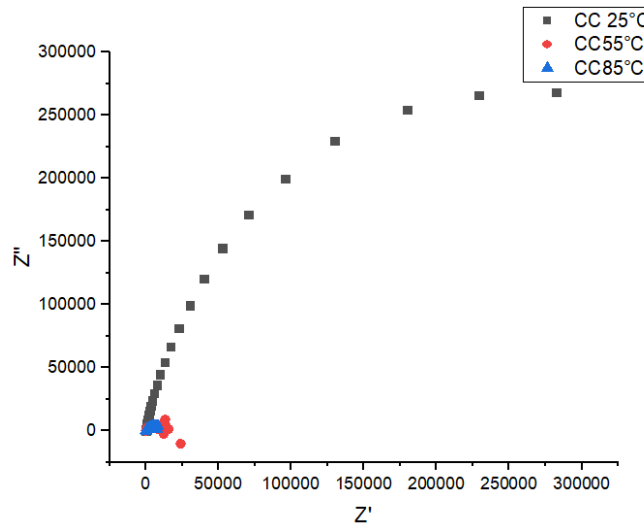
La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la température de l'électrolyte. Le cordon de soudure à la température de l'électrolyte  $25\text{C}^\circ$  présente la plus faible vitesse de corrosion et une meilleure résistance à la corrosion  $R_P$  qui est de l'ordre de  $136.87\text{ k}\Omega$  (Tableau IV.2).



**Figure IV.3:** Les courbes de polarisation d'échantillon soudé par CC à différentes températures d'électrolyte.

D'après la figure IV.3 de la polarisation d'échantillon soudé par CC, on remarque qu'il y a des perturbations au niveau de la courbe cathodique de comportement électrochimique à la température de l'électrolyte  $25\text{C}^\circ$  cela peut exprimer par la présence des pics dus aux défauts de soudage des échantillons ou bien aux défauts de polissage des électrodes.

La figure IV.4 représente les courbes d'impédances dans les différentes températures de l'électrolyte ( $25$ ,  $55$  et  $85\text{C}^\circ$ ) du cordon de soudure soudé par un courant continu (CC).



**Figure IV.4 :** Les courbes des impédances de cordon soudure soudé par CC à des différentes températures d'électrolyte NaCl 3.5M .

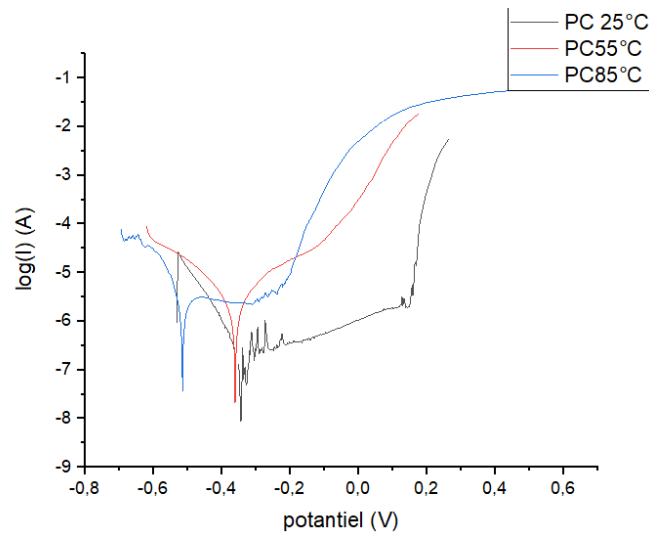
Pour une température de 25°C le diamètre le plus important, et le plus petit diamètre est propre à la boucle de température de l'électrolyte de 85°C. Ces résultats confirment les résultats obtenus par Les courbes de polarisation, c.-à-d. le cordons de soudure résiste mieux à la corrosion ou la température de l'électrolyte est de 25°C que les autres températures (55°C et 85°C).

### IV.2.3 L'échantillon Soudée Par Courant Pulsé

La corrosion d'un métal ou d'un alliage métallique dans un milieu corrosif s'effectue suivant un processus assimilable au fonctionnement d'une pile galvanique, composée de deux électrodes et d'une solution d'électrolytes dans laquelle elles plongent. Cette pile, lorsque les électrodes sont en court-circuit ou reliées électriquement par un circuit de faible résistance, est le siège d'une réaction électrochimique.

Dans le cas de métaux plongés dans un environnement agressif, la réaction d'oxydation a lieu à la surface du métal le moins noble (ou le plus anodique) et la réactions de réduction d'oxydation a lieu à la surface du métal le moins noble (ou le plus anodique) et la réaction de réduction a lieu à la surface du métal le plus noble (ou le plus cathodique).seul, le métal le moins noble présente une dégradation .le métal le plus noble est protégé cathodiquement .on parle alors de dégradation .le métal le plus noble est protégé cathodiquement .on parle alors de corrosion ou de couplage galvanique. Alors de corrosion ou de couplage galvanique.

La figure IV.5 représente le courant de corrosion en fonction du potentiel d'un échantillon soudé par un courant pulsé à des différentes température 25°C, 55°C et 85°C.



**Figure IV.5 :** Les courbes de polarisations d'un échantillon soudé par courant pulsé des différentes températures de l'électrolyte (NaCl 3.5 M).

De cette dernière (figure IV. 5), à chaque fois la température de l'électrolyte (NaCl 3.5 M) diminue :

- Le courant de corrosion diminue se déplace vers les valeurs les plus nobles.
- Le point d'intersection entre la partie anodique et la partie cathodique se diminue.

Le tableau IV.3 regroupe les différents résultats des paramètres électrochimiques de cordon de soudures soudé par un courant pulsé dans les déférente de températures de l'électrolyte (25, 55 et 85°C).

**Tableau IV.3** Les paramètres électrochimiques à déférentes températures des cordons de soudures soudés par un courant pulsé (PC).

T	Ec (V)	Ic (µA)	Bc (V/dec)	Ba(V/dec)	Rp (kΩ)	Uc(mm/an)10 <sup>-3</sup>
25°C	-0.36	0.67	0.06	0.23	39.2	0.94
55°C	-0.36	2.34	0.01	0.02	1.15	5.19
85°C	-0.51	3.89	0.05	0.05	6.70	6.83

D'après le tableau IV.3 :

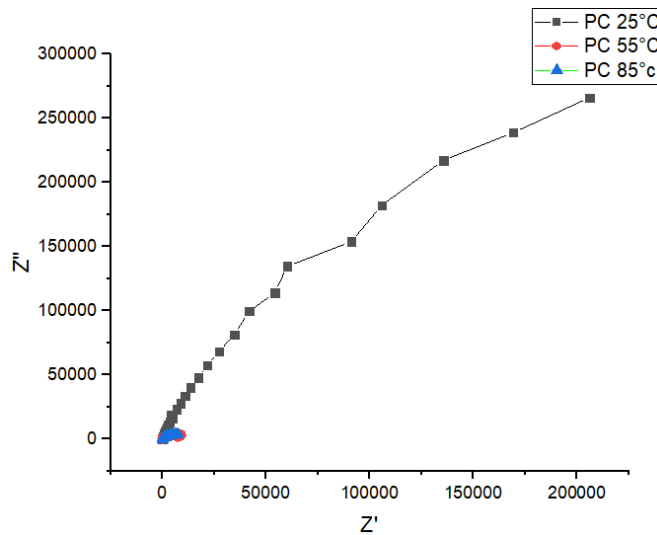
❖ L'augmentation de la température de l'électrolyte (NaCl 3.5 M) 25°C, 55°C et 85°C fait déplacer les potentiels de corrosion des échantillons vers des valeurs plus anodique (moins noble).

❖ La valeur de la résistance de polarisation  $R_p$  à la température de l'électrolyte (NaCl 3.5 M) 25°C est plus élevée par rapport aux autres températures de l'électrolyte (55°C et 85°C) de l'ordre de 39.2k $\Omega$ .

❖ La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la température de l'électrolyte (NaCl 3.5M) qui passe de  $10^{-3}$  à  $6 \cdot 10^{-3}$  mm/an.

❖ Pour une température d'électrolyte de 55°C, le cordon de soudure présente une faible résistance à la corrosion est de l'ordre de 1.15 k $\Omega$ .

Les résultats des courbes d'impédances d'un échantillon soudé par un courant pulsé à des différentes températures 25°C, 55°C et 85°C sont regroupés dans la figure IV.6.



**Figure IV.6:** Les courbes d'impédances d'échantillon soudée par une courant pulsé avec différentes températures.

On peut constater que le diamètre est influencé par la variation de la température de l'électrolyte NaCl 3.5M, pour une température de 25°C le diamètre plus important, tandis que le plus petit diamètre est propre à la boucle de température de l'électrolyte est de 55°C. ce qui veut dire que l'acier 430 résiste mieux à la corrosion ou la température de l'électrolyte est de 25°C que les deux autres températures (55°C et 85°C).

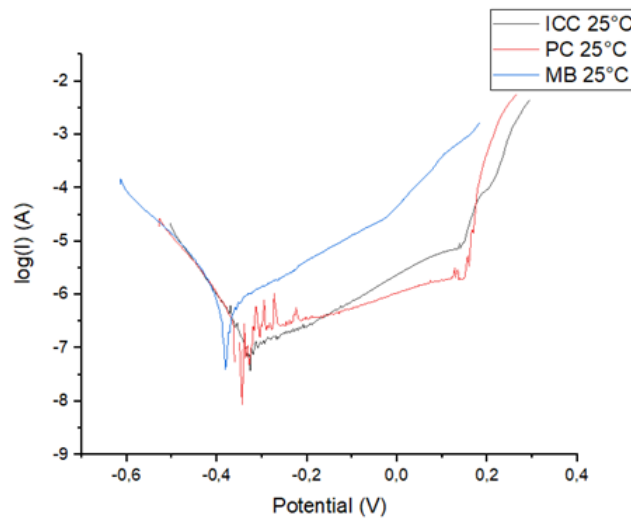


### IV.3 L'EFFET DU COURANT DE SOUDAGE SUR LE COMPORTEMENT À LA CORROSION DES CORDONS DE SOUDURES

Cette partie est basée sur l'étude de l'effet de type du courant de soudage sur le comportement des cordons de soudure vis à vis de la corrosion dans l'électrolyte NaCl 3.5M chauffée à différentes températures à savoir : 25, 55 et 85°C.

#### IV.3.1 Comportement vis à vis de la corrosion à la température de l'électrolyte 25°C

La figure IV.7 regroupe les courbes du comportement électrochimique des cordons de soudures soudés par différents types de courant à savoir le courant continu et le courant pulsé et celui de métal de base AISI430 à la température 25°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M).



*Figure IV.7: Les courbes de polarisations du cordons de soudure à la température 25°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M).*

À partir de la figure IV.7:

- ❖ Présence des perturbations au niveau de la partie anodique du cordon de soudure soudé par un courant pulsé à la température de l'électrolyte 25°C (NaCl 3.5M).
- ❖ Le point d'intersection entre la partie cathodique et anodique de métal de base (MB) à la température de l'électrolyte 25°C se déplace vers les valeurs plus négatives (moins noble).

Le tableau ci-dessus (Tableau IV.4) regroupe les paramètres électrochimiques à différentes cordons de soudures soudés et le métal de base à la température 25°C de l'électrolyte.

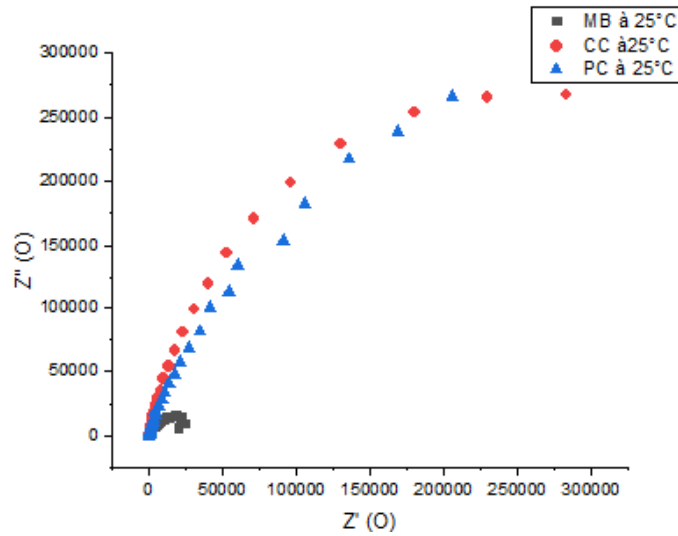
*Tableau IV.4 : Les paramètres électrochimiques à différentes cordons de soudures soudés et le métal de base à la température 25°C de l'électrolyte.*

TYPE	Ec (V)	Ic (µA)	Bc(V/dec)	Ba(V/dec)	Rp(kΩ)	Uc(mm/an)10 <sup>-3</sup>
MB	-0.38	0.12	0.02	0.4	30.45	3.70
CC	-0.33	0.19	0.03	0.05	136.87	0.88
PC	-0.36	0.67	0.06	0.23	39.2	0.94

Selon le tableau IV.4 :

- Le potentiel de corrosion est presque le même pour le métal de base (-0.38V) et celui des échantillons soudés : par un courant continue (-0.33V) et soudé par un courant pulsé PC (-0.36).
- Le courant de corrosion d'échantillon soudé par un courant pulsé (0.67 µA) est supérieur à celle du métal de base (0.12µA) et celui de l'échantillon soudé par un courant continue (0.19µA).
- Le métal de base et l'échantillon soudé par un courant pulsé a une résistance la plus faible par rapport à l'échantillon soudé par un courant continue.
- Le métal de base l'acier inoxydable AISI430 est le plus vite corrodable (3.70.10<sup>-3</sup>mm/an) que les échantillons soudés par un courant continue (CC) (0.93527.10<sup>-3</sup>mm/an) et l'échantillon soudé par un courant pulsé (0.88.10<sup>-3</sup>mm/an).

La figure IV.8 représente les courbes des impédances des cordons de soudures et le métal de base à une température de l'électrolyte 25°C immergés dans une solution de NaCl 3.5M.

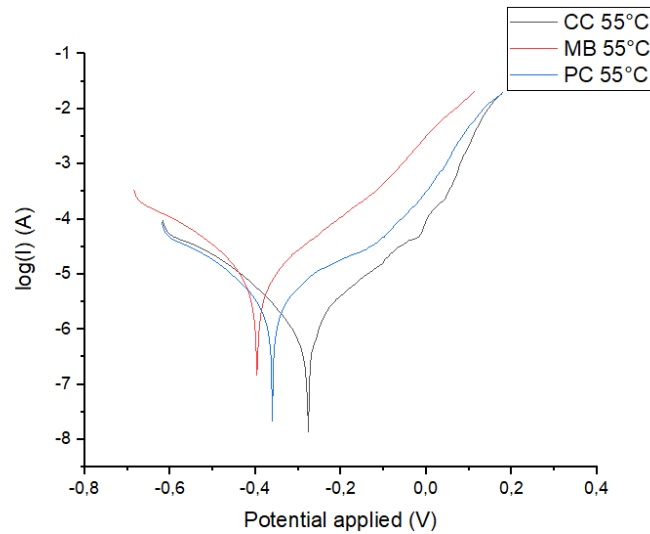


**Figure IV.8:** Les courbes des impédances du cordons de soudures et le métal de base à la température de 25°C de l'électrolyte NaCl 3.5M.

D'après le figure IV.8, le cordon soudé par courant continue à la température de 25°C de l'électrolyte a le diamètre le plus important ; tandis que le plus petit diamètre est propre à la boucle de métal de base. Cela veut dire que le cordon soude par courant continue résiste mieux à la corrosion que le cordon soudé par courant pulsé et le métal de base à la température de 25°C de l'électrolyte. Ce résultat confirme le résultat des tests potentiodynamique.

#### IV.3.2 Comportement vie à vie la corrosion à la température de l'électrolyte 55°C

La figure IV.9 montre que l'allure de la partie cathodique des différentes courbes (celle de l'acier inoxydable AISI 430(MB) et les échantillons soudés par un courant continue (CC) et courant pulsé (PC) immergé dans la solution NaCl 3.5M à la température 55°C) a un décroissement continu du courant en fonction du potentiel. Par contre la partie anodique de la courbe de polarisation montre un accroissement continu du courant en fonction du potentiel.



**Figure IV.9:** Les courbes de polarisations déférentes cordons de soudures soudés et le métal de base à la température 55°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M).

Les paramètres électrochimiques du processus de corrosion de métal de base l'acier 430 et les cordons de soudures (l'échantillon soudés par un courant continue et l'échantillon soudé par un courant pulsé) dans l'électrolyte NaCl 3,5 M à la température de 55°C, obtenus à partir du logiciel de corrosion NOVA en extrapolant les droites de Tafel au potentiel de corrosion, sont rassemblées dans le tableau IV.6.

**Tableau IV.4 :** Les paramètres électrochimiques à la température 55°C de l'électrolyte : des cordons de soudures soudés par le courant continue, des cordons de soudures soudés par le courant pulsé et le métal de base.

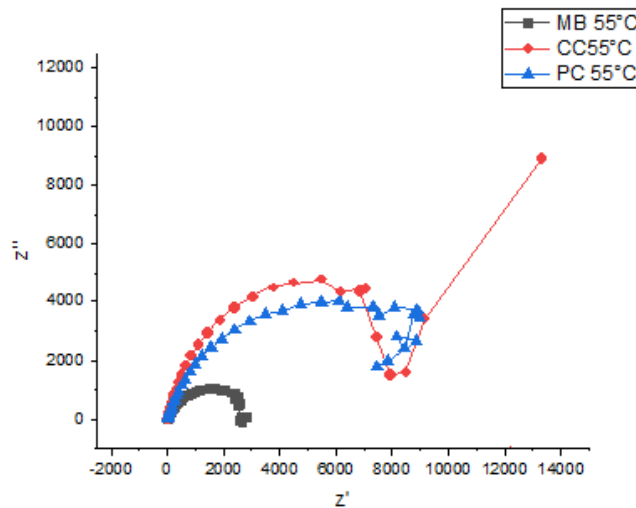
INOX	Ec(V)	Ic (μA)	Bc(V/dec)	Ba(V/dec)	Rp (kΩ)	Uc(mm/an).10 <sup>-3</sup>
MB	-0.40	1.61	0.01	0.06	4.45	17.16
CC	-0.28	0.82	0.02	0.05	31.64	2.47
PC	-0.36	2.34	0.01	0.02	1.15	5.19

À partir de Tableau IV.6 :

- Le courant de corrosion (Ic) de l'échantillon soudé par le courant continue (0.82μA) est plus bas que celui du métal de base d'inox AISI430 (1.81μA) et de l'échantillon soudée par le courant pulsé (2.34μA).
- Le métal de base se corrode plus vite que les autres échantillons (PC et CC).

- Le potentiel de corrosion de l'échantillon soudé par le CC (-0.28 V) est le plus noble que celui des autres échantillons (soudé par le courant PC (-0.35V) et que le métal de base (-0.40V).
- L'échantillon soudé par un courant continue présente une meilleure résistance de polarisation 31.64 kΩ.

Le figure ci-dessus (figure IV.10) représente les courbes de polarisations des cordons de soudures à la température 55°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M).

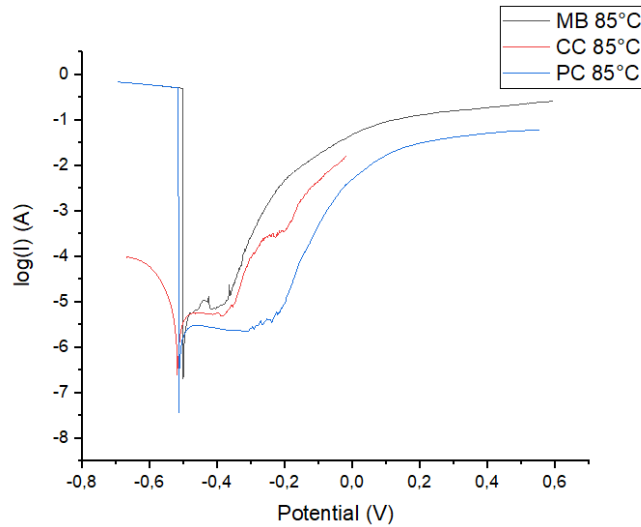


**Figure IV.10:** Les courbes des impédances des cordons de soudures à la température 55°C de différents joints de soudures courant continu et pulsé et métal de base.

Il est clairement aussi visible que la courbe correspondant à l'échantillon soudé par CC présente un important diamètre, donc une résistance meilleure par rapport aux autres échantillons. Le métal de base a le plus petit diamètre donc se corrode le plus rapidement à la température 55°C que les autres échantillons soudés.

### IV.3.3 Comportement vie à vie la corrosion à la température de l'électrolyte 85°C

La figure dessous représente les courbes de polarisations des cordons soudés par un courant continue et courant pulsé et le métal de base à une température 85°C de l'électrolyte NaCl 3.5M.



**Figure IV.11:** Les courbes de polarisations des cordons de soudures soudé par un courant continue et courant pulsé à la température 85°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M).

L'allure de la partie anodique des courbes de polarisations présente un palier de passivation ce qui signifie la formation d'une couche protectrice qui protège le métal de la corrosion.

Le tableau ci-dessus (Tableau IV.7) regroupe les paramètres électrochimiques à différentes cordons de soudures soudés et le métal de base à la température 85°C de l'électrolyte NaCl 3.5M.

**Tableau IV.5:** Les paramètres électrochimiques à la température 85°C de l'électrolyte : des cordons de soudures soudés par le courant continue, des cordons de soudures soudés par le courant pulsé et le métal de base.

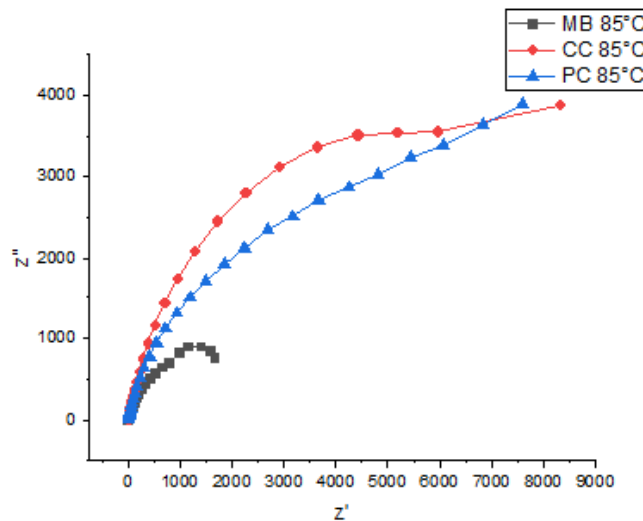
INOX	Ec (V)	Ic ( $\mu$ A)	Bc(mV/dec)	Ba(mV/dec)	Rp(k $\Omega$ )	Uc(mm/an)10 <sup>-3</sup>
<b>MB</b>	-0.50	2.50	0.03	0.13	1.99	29.39
<b>CC</b>	-0.51	7.82	0.04	0.03	3.33	10.53
<b>PC</b>	-0.51	3.89	0.05	0.05	6.70	6.83

À partir de tableau IV.7:

- Le potentiel de corrosion est presque le même pour tous les échantillons égale à -0.51V.
- Le courant de corrosion de l'échantillon soudé par un courant continue est le plus élevé.

- Le métal de base a une faible résistance à la corrosion  $R_p$  de l'ordre de  $1.99 \text{ k}\Omega$ , cela dû à la longueur du palier de passivation qui est petit qui veut dire que la couche protectrice se détériore plus rapidement par rapport aux autres couches formées des autres échantillons.

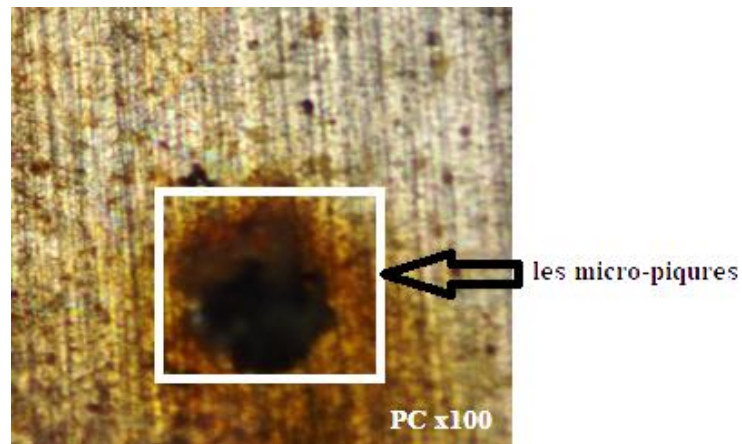
Les résultats électrochimiques des tests d'impédance sont regroupés dans la figure IV.12. Selon le figure IV.12, l'échantillon soudé par un courant continue présente le diamètre le plus important, donc il résiste mieux que le métal de base et l'échantillon soudé par un courant pulsé.



**Figure IV.12 :** Les courbes des impédances des joints de soudures de l'acier AISI 430 à la température  $85^\circ\text{C}$  de l'électrolyte ( $\text{NaCl } 3.5\text{M}$ ).

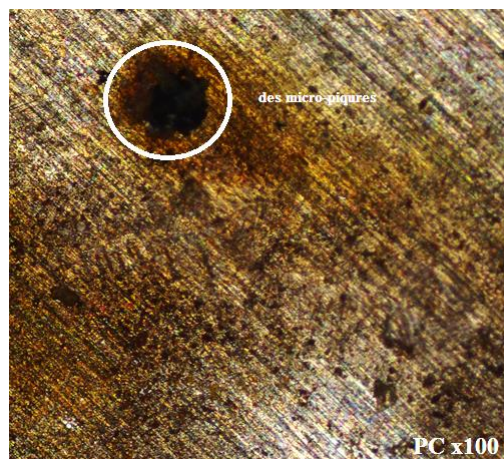
#### IV.4 Les Micrographie optiques des échantillons après les tests électrochimiques

Les observations métallographiques des échantillons corrodés peuvent contribuer à la compréhension de la nature du processus de corrosion sur les cordons de soudures. Afin de préserver l'intégrité des surfaces corrodées en vue d'une analyse au Microscope optique, aucun polissage mécanique n'est effectué. L'observation topographique au Microscope optique (figure IV.13, 14 et 15) révèle alors le dépôt d'une couche d'oxyde protectrice. En plus des raisons mentionnées pour le mécanisme de corrosion, les mécanismes de corrosion par piqûres sont en prédominances (figures IV.13, 14 et 15).

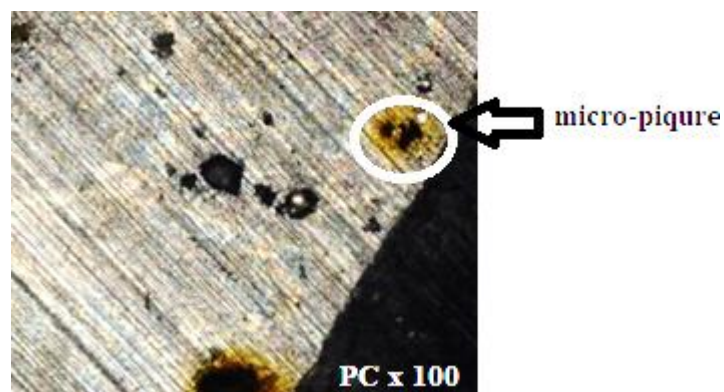


*Figure IV.13: Les micro optique du cordons de soudure soudé par un courant continue(CC) à la température 55°C de l'électrolyte (NaCl 3.5M) après les tests d'électrochimies.*

D'après le figure ci-dessus, il y a des piques sur la surface de cordon de soudure soudé par un courant continue à la température 55°C



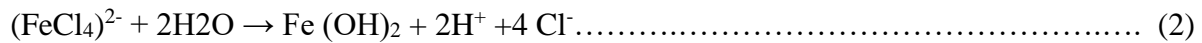
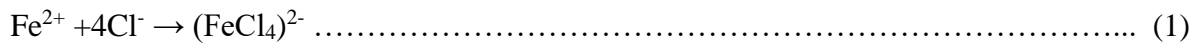
*Figure IV.14: micro optique du soudure PC à 85°C après les tests d'électrochimiques.*



*Figure IV.15: micro optique du soudure PC à 25°C après les tests d'électrochimiques.*



R. MEHRA *et al.* [60] ont étudié la variation de la vitesse de corrosion et de la densité du courant de corrosion d'un alliage de fer en fonction du temps d'immersion dans diverses solutions salines. D'après ces auteurs, les solutions de NaCl sont les plus corrosives pour cet alliage de fer. Ils mentionnent aussi que les anions jouent un rôle primordial dans la détermination de la facilité avec laquelle l'acier a subi une dissolution lors de l'application d'une certaine densité de courant anodique. Ceci peut être lié à l'accélération des anions et au comportement des inhibiteurs causés par la stabilité du film d'oxyde de fer (FeO) formé après une réaction de corrosion. Ainsi, on peut citer les principaux mécanismes de corrosion des aciers par l'action des chlorures. En premier lieu, les chlorures sont adsorbés dans la couche protectrice de l'oxyde de fer, par la suite, le fer oxydé (FeO) réagit en complexe soluble  $(\text{FeCl}_4)^{2-}$  suivant la réaction (1), ce dernier réagit avec l'eau pour former l'hydroxyde de fer  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  suivant la réaction (2). Le pH est alors abaissé et la concentration du chlorure est augmentée.



Le cycle répété impliquant la réaction de  $\text{Fe}^{2+}$  avec les ions  $\text{Cl}^-$ , la formation de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  et la libération des ions de  $\text{H}^+$  et de  $\text{Cl}^-$ , continuent jusqu'à ce que la couche protectrice de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  est complètement détruite. La migration des ions de chlorures vers le fond d'une piqure, sous l'effet du champ électrique augmente la concentration d'anions agressifs dans la cavité. Une fois formée ce phénomène est auto-catalytique. La piqure crée des conditions favorables à sa croissance. Une des formes principales de corrosion provoquée par l'ion de chlore est la corrosion par piqûres.

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du soudage homogène des structures. Elle a été conduite selon une démarche purement expérimentale pour comprendre les principaux phénomènes, à prendre en compte lors de la réalisation de jonctions soudées homogènes par soudage TIG.

Nous avons proposé d'étudier le comportement électrochimique des soudures. Après la réalisation des jonctions de soudage par le procédé TIG avec deux tôles de l'acier AISI430 et deux courants différents (courant continu et courant pulsé). L'objectif étant d'expliquer l'effet de température de l'électrolyte NaCl 3.5M sur les joints de soudures.

D'après les résultats de cette étude nous concluons que :

- Le métal de base de l'acier AISI430 à la température ambiante 25°C est plus résistant que les cordons de soudures réalisés soit en courant continu ou en courant pulsé.
- Le métal de base se corrode plus vite que les autres échantillons soudés (PC et CC) aux différentes températures chaudes de l'électrolyte NaCl 3.5M (55 et 85°C).
- L'augmentation de température accélère la réaction chimique (oxydation/acide) à cause de la rupture des liaisons chimiques de l'acier AISI430.

Pour mieux interpréter les résultats et les cohérents avec les études métallographiques il faut compléter cette étude avec d'autres moyens d'investigations à savoir :

- Étude cristallographique des produits de corrosion par la technique de diffraction des rayons X DRX.
- Étude métallographique des produits de corrosion par le microscope électronique à balayage MEB.

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] Mustafa BENEDEB . “ Etude les defaults de soudage des pipelines” mémoire de MASTER , Université Mohamed Khider Biskra . pp2.

[2] Le soudage par PLASMA. Cours technologie Par: Rocardier Publié le : 27/11/2015.

[3] <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/141-le-soudage-vertical-sous-laitier.html>

[4] M. Abdellatif, “Etude comparative des différents procédés de soudage sur l’effet de fissuration à froid dans la ZAT ‘’, Mémoire de Master, Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2018.

[5] A. Kechaou, “ Etude du soufflage magnétique de l’arc électrique de soudage ‘’, Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2013.

[6] R.VARISELLAZ : « Soudage, éléments de conception et de réalisation », Paris 1982.

[7] Principaux procédés du soudage, description, démarche d’évaluation et prévention des risques.<https://www.slideshare.net/> consulté le 25/05/2022.

[8]<http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/131-soudage-oxyacetylenique.html>  
[consulté le 25/05/2022.](#)

[9,10] Roland CAZES. “Soudage à l’arc” techniques d’ingénieur, travail des matériaux – assemblage. Article B7730.

[11] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER ,PARIS .pp31.

[12] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edition LAVOISIER,PARIS.

[13] <https://www.orexad.com/soudage-tig>. Consulté le 22/05/2022.

[14]<http://ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/137>  
[lesoudage%20plasma.%20%20%20pdf?type=raw](#)

[15]<http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/141-le-soudage-vertical-sous-laitier.html>

[16] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4063, “ Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers ”. Third edition 1998-09-01.

[17] **ESAB Antony FERNANDES**, jeudi 29 octobre 2009

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [18] **W. CHAPEAU, R. BAUS.** “Application du soudage aux constructions” Editions Sciences et Lettres. (1977).
- [19] Miller: Guidelines for gas tungsten arc welding (GTAW)
- [20] Edition originale: Polysoude S.A.S. Nantes France Publié par Fronius International GmbH.
- [21] Metalshandbook Vol.1 «Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys», ASM International, USA, 2005.
- [22] **Althous**, Procédé de soudage à l’arc, Éd. Rynald Goulet inc, 2008.
- [23] le soudage TIG, LINCOLN ELECTRIC the welding experts.
- [24] MISE EN OEUVRE ET CARACTERISATION D’ASSEMBLAGES SOUDES PAR PROCEDES TIG ET LASER DE TOLES D’ALLIAGES DE TITANE REFRACTAIRES le 9 novembre 2005 Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [25] Amuda, Moh, and S. Mridha. "MICROSTRUCTURAL FEATURES OF AISI 430 FERRITIC STAINLESS STEEL (FSS) WELD PRODUCED UNDER VARYING PROC." International Journal of Mechanical and Materials Engineering4, no. 2 (1970).
- [26] Amuda, M. O. H., and Shahjahan Mridha. "Grain refinement in ferritic stainless steel welds: the journey so far." In Advanced Materials Research, vol. 83, pp. 1165-1172. Trans Tech Publications, 2010.
- [27] Kotecki, D. J., and J. C. Lippold. "Welding metallurgy and weldability of stainless steels." Wiley, Hoboken, NJ Barbero B, Ureta E (2011) Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. Comput Aided Des 43 (2005): 188-206.
- [28] Sedriks, A., Corrosion of stainless steels, 1996. Sponsored by The Electrochemical Society, Princeton, NJ, and John Wiley & Sons, New York, 2nd ed., p. 111.
- [29] Sabioni, Antônio Claret Soares, Anne-Marie Huntz, Elizete Conceição da Luz, Marc Mantel, and Christian Haut. "Comparative study of high temperature oxidation behaviour in AISI 304 and AISI 439 stainless steels." Materials Research 6, no. 2 (2003): 179-185.
- [30] Mouloud Aissani, Sofiane Guessasma, Abdelhalim Zitouni, Rabah Hamzaoui, David Bassir, Younes Benkedda. Three-dimensional simulation of 304L steel TIG welding process: Contribution of the thermal flux, Applied Thermal Engineering 89 (2015) 822-832

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [31] Santhana Babu A.V., Giridharan P.K.: Productivity improvement in flux assisted TIG welding, International Journal on Design & Manufacturing Technologies, Vol. 6, No. 2, July 2012
- [32] B.BAROUX, G.BERANGER, C.LEMAITRE, *Les aciers inoxydables, Passivité et rupture de la passivité des aciers inoxydable*, Les Ulis Editions de physique, 1990, page163.
- [33] T. SOURISSEAU, *Influence d'éléments d'alliage sur la résistance à la corrosion par piqûre d'aciers inoxydable austénitique*, Thèse, Grenoble (INPG), 2001.
- [34] G. OKAMOTO, *Passive of film 18-8 stainless steel structure and its function*, Corrosion Sciences, volume 13, n° 6, 1973, page 471.
- [35] T. P.HOAR, *The production and breakdown of the passivity of metals*, Corrosion Science, vol. 7, n°6, 1967, page 341.
- [36] N. SATO, *A Theory for breakdown anodic oxide films on metal*, Electrochem. Acta, volume 16, n°10, 1971, page 1683.
- [37] C.Y. CHAO, F.L.LIN, D.D. MACDONALD, *A point defect model for anodic passive film*, J. Electrochem. Soc., vol. 128, n° 6, 1981, page 1187.
- [38] J.L.DAWSON, M.G.S.FERREIRA, *Electrochemical studies of the pitting of austenitic stainless steel*, Corrosion science, vol. 26, n° 12, 1986, page 1009.
- [39] J. DERNARD, A. MICHEL, J. PHILIBERT, J. TALBOT, *Métallurgie générale Parie MASSON*, (1984), Edition PYC (1992), page 358.
- [40] M. G. FONTANA, *Corrosion engineering*, Mc CRAW, HILL international Edition, (1987) page 67.
- [41] J. HORVATH, H. H. UHLIG, J. *Electrochem. Soc*, 115, (1968), page791.
- [42] E. VERENING, V. D. EISENHUTTENLENTES, *Les aciers inoxydables Edition Lavoisier* (1990), page 17.
- [43] H. E. HANNINEN, *Inter. Met. Rev.*, 24 (1979), page 85.
- [44] T. KODAMA. J. R. AMBROSSE, *Corrosion* 33(1977), page 155.
- [45] A. DEVASENAPATHI, V. S. RAJA, *Corrosion*, 52 (1996), page 249.

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[46] M. Parise, Mécanismes de corrosion des alliages de zirconium : étude des cinétiques initiales d'oxydation et du comportement mécanique du système métal-oxyde, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1996.

[47] Ramanathan, V. L. Corrosão e seu controle, Hemus, 1990.

[48] S. Wolyneć; Técnicas Eletroquímicas em Corrosão Vol. 49, Edusp, 2003.

[49] B. F. Mainier, C.G. Sandres and M.S.S Tavares ; Corrosão por sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e suas implicações no meio ambiente e na segurança industrial ; In: CIBIM 8o CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA 2007, Outubro 23-25, Cusco, Peru. Proceedings... Cusco, Peru: CIBIM8, 2007.

[50] P. Sarin, V. L. Snoeyink, J. Bebee W. M. Kriven and J. A. Clement; Physical- Chemical Characteristics of Corrosion scale in Old Iron Pipes; Elsevier Science, Vol. 35, No. 12, pp. 2961–2969, Great Britain, 2001.

[51] T. Misawa, W. Suetaka and S. Shimodaira; The mechanism of atmospheric rusting and the effect of Cu and P on the rusting formation of low alloy steel; Corrosion Science, Oxford V. 11, n. 1, p. 35 – 48, Jan. 1971.

[52] Huy Ha LE and E. Ghali; Interpretation des diagrammes E-pH du système Fe-H<sub>2</sub>O en relation avec la fragilisation caustique des aciers ; Journal of applied electrochemistry, vol 23 (1), p72—77, 1993.

[53] Sébastien BEAUVAIS, Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Mines de Paris, France, 08/07/2003.

[54] P. A. Christensen and A. Hamnett, Techniques and Mechanisms in Electrochemistry, Blackie

Academic & Professional, Great Britain, 1994.

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[55] J. O. M Bckriss, A. K. N Reddy, *Modern Electrochemistry*, 2, 1249, PLENUM Press N. Y, 1974.

[56] E. MC. Cafery, N. Hackerman, *J. Electrochem. Soc*, 199, 1972.

[57] I. Epelbotn, M.Josselin, R. Wiart, *J. J. Electrochem. Chem*, 119, 1981, p 61-71.

[58] B. F. Mainier, C.G. Sandres and M.S.S Tavares ; Corrosão por sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e sua implicações no meio ambiente e na segurança industrial ; In: CIBIM 8o CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA 2007, Outubro 23-25, Cusco, Peru. Proceedings... Cusco, Peru: CIBIM8, 2007.

[59] R. Mehra and A. Soni; Cast iron deterioration with time in various aqueous salt solutions; *Bulletin of Materials Science*, 25(1): 53-58, 2002.

[60] R. Mehra and A. Soni, Cast iron deterioration with time in various aqueous salt solutions, *Bul of Mat Sci*, 25(1), 2002, 53-58.