

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Abderahmane Mira de Béjaia**

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



جامعة بجاية  
Taṣdawit n' Bgayet  
Université de Béjaïa

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention de diplôme de Master en Génie Mécanique

**Option : Fabrication Mécanique et Productique**

Thème

**Caractérisation mécanique d'un joint de soudure de  
deux plaques en acier S235. Influence de la nature  
du métal d'apport**

Présenté par :

*M<sup>r</sup>* RACHEK Abdelouahab

*M<sup>r</sup>* SAOUDI Azzedine

Soutenue publiquement le 26/06/2019 devant le jury composé de :

Président : *M<sup>r</sup>* KHELFAOUI.Y    Professeur    Université de Béjaïa

Examineur : *M<sup>r</sup>* YOUNES.R    M.A.C.B    Université de Béjaïa

Promoteur : *M<sup>r</sup>* AMARI.D    M.A.C.A    Université de Béjaïa

**Promotion 2019**

# REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces longues années.

Tout d'abord nous tenons à remercier notre promoteur de ce travail monsieur AMMARI DJAMEL pour son suivi, sa disponibilité ainsi que les nombreuses discussions que nous avons eues autour de ce mémoire.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux messieurs les membres du jury pour avoir accepté cette charge ainsi que l'intérêt qu'ils ont portée à notre travail de recherche :je cite monsieur KHELFAOUI.Y et monsieur YOUNES.R.

Nos chaleureux remerciements vont à l'ensemble de notre famille tout particulièrement nos parents pour leurs support inconditionnel, vous nous avez toujours encouragé à aller plus loin dans les domaines qui nos plaisent, ainsi que tous les membres de nos familles, nous vous en suis reconnaissant aujourd'hui.

Nous présentons nos meilleures salutations à l'entreprise des frères GUERROUD de Bejaïa tout particulièrement Mr Hakim GUERROUD, l'laboratoire d'université de Tizi ouzou tout particulièrement Mr Marzouk et aussi l'entreprise de ENMTP en particulier Mr Lounis TAOUINT.

Nous tenons à remercier tout les travailleurs du HALL de technologie de l'université de Bejaïa.

Enfin, nous remercions tous nos amis avec qu'on a partagé notre quotidien durant ces longues années et pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble.

# Dédicaces

Mon travail est dédié à ma mère comme expression de ma profonde reconnaissance, à la femme la plus belle de ma vie, à l'ange qui a appris seulement à aimer qui ne pourrait jamais mais jamais perdre cette habitude. J'apprécie énormément ton sacrifice. A la mère, l'ombre de clémence de dieu sur la terre et pour l'humanité.

Je dédie aussi ce modeste travail à mon père, je lui dis : j'espère que tu es fier de ton fils papa !!

A mes deux frères et leurs familles, à mes sœurs et leurs familles, je consacre pour vous toutes mes paroles et mes expressions fraternelles, mes mots qui volent comme des oiseaux qui se dirigent vers vous, ces oiseaux qui vous remercient pour votre soutien quotidien, vos prières. Je n'oublie jamais mes proches.

Ainsi à :

Toute la famille RACHEK.

Ma raison de vivre.

Tous mes amis(es).

Mes coéquipières de la branche Génie Mécanique.

**RACHEK Abdelouahab.**

<<Que ce mémoire soit un témoignage de mon affection>>.

# **Dédicaces**

*Je commence mes dédicaces les plus personnels à mes parents. Pour Mon père et ma mère, la richesse d'une présence, mais aussi ses patiences, actives durant mes périodes d'absences ont contribué énormément à la réalisation de ce travail. Un grand merci pour eux.*

*Ainsi à :*

*Toute la famille SAOUDI.*

*Tous mes amis.*

*Toute la promotion de la deuxième année Masters.*

*Fabrication Mécanique et Productique 2018/2019.*

*Et à tous ceux qui me sont chères et me portent dans leurs cœurs.*

**SAOUDI Azzedine.**

## **TABLE DES MATRIRES**

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

Liste Des Abréviations

**Introduction générale**..... 1

### **Chapitre I Etude bibliographique**

I. Introduction..... 2

I.1 Historique de soudage..... 2

I.1.1 Définition de soudage ..... 3

I.1.2 Classification des procédés de soudage..... 4

I.2 Soudage à l'arc électrique..... 4

I.2.1 Définition de l'arc électrique..... 4

I.3 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE)..... 5

I.3.1 Définition du procédé..... 5

I.3.2 Principe du procédé..... 6

I.4 Définition d'électrode enrobée..... 7

I.4.1 Classification des enrobages des électrodes enrobées..... 7

I.4.2 Les électrodes enrobées utilisées..... 8

I.4.3 Étuvage des électrodes enrobées..... 8

I.4.4 Domaines d'application..... 8

I.4.5 Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées..... 8

I.4.6 Le réglage de l'intensité appliquée à l'électrode..... 9

I.4.7 La courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension..... 10

I.5 Les différents types de générateurs de soudage.....	11
I.5.1 Nature de courant.....	11
I.5.1.1 Courant continu.....	12
I.5.1.2 Courant altératif.....	12
I.6 Le croquis didactique du procédé de soudage.....	12
I.6.1 Installation de soudage pour le soudage à l'arc à l'électrode enrobée.....	13
I.7 Les avantages et les inconvénients de soudage à l'arc à l'électrode.....	13
I.8 Le procédé de soudage MIG/MAG (Metal inert gas et Metal active).....	13
I.8.1 Définitions du procédé.....	13
I.8.2 Principe du procédé de soudure MIG/MAG.....	14
I.8.3 Installation d'une unité de soudage MIG/MAG.....	15
I.8.4 Domaines d'application.....	15
I.9 Conséquences du procédé de soudage.....	16
I.9.1 Conséquences thermiques du soudage.....	16
I.9.2 Conséquences métallurgiques du soudage.....	16
I.9.3 Conséquences mécaniques du soudage.....	16
I.10 Avantages et inconvénients du procédé.....	17
I.11 Les défauts de soudage.....	17
I.11.1 Les fissure.....	17
I.11.2 Les soufflures.....	18
I.11.3 La pollution ferreuse.....	20
I.11.4 Les retassures et criques de solidification.....	20
I.11.5 Les inclusions.....	20
I.11.6 Les déformations de soudage.....	20

I.12	Les remèdes de la fissuration.....	22
I.13	Le comportement mécanique des métaux.....	22
I.13.1	La dureté.....	23
I.13.2	Essai de résilience.....	23
I.13.2.1	Définition et principe de l'essai.....	23
I.13.2.2	Les éprouvettes pour la résilience.....	24
I.14	L'utilisation de soudage dans l'industrie.....	25
I.14.1	Comparaison entre soudage et rivetage.....	25
I.14.2	Les principaux risques liés au soudage.....	26
I.15	Conclusion.....	27

**Chapitre II Matériaux et techniques expérimentales**

II.	Introduction.....	28
II.1	Présentation des matériaux.....	28
II.1.1	Présentation de l'acier S235(E24).....	28
II.1.2	Métal d'apport.....	29
II.1.2.1	Électrode enrobée(EE) rutile.....	29
II.1.2.2	Électrode enrobée(EE) basique.....	30
II.2	Réalisation de maquette de liaison métallique S235.....	31
II.2.1	Préparation des plaquettes.....	31
II.2.2	Nettoyage des plaquettes à souder.....	32
II.2.3	Bridage.....	32
II.2.4	Soudage des plaques.....	33
II.3	Prélèvement des échantillons.....	34
II.3.1	Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques.....	35

II.3.2 Le fraisage des maquettes.....35

II.3.3 Réalisation de l'entaille.....35

II.4 Présentation des essais mécaniques réalisés.....36

II.4.1 Essai de la dureté.....36

    II.4.1.1 L'essai de macro dureté Brinell.....36

    II.4.1.2 Description terminologique.....37

II.4.2 Essai de résilience.....38

II.5 Métallographie.....39

II.5.1 Polissage.....40

II.5.2 Attaque chimique.....40

II.5.3 Examen au microscope optique.....41

II.5.4 But de la métallographie.....41

II.6 Conclusion.....41

**Chapitre III Résultats et discussion**

III. Introduction.....42

III.1 Caractérisation métallographique.....42

III.2 Essai de dureté.....45

    III.2.1 Résultats de la dureté.....47

III.3 Essai de résilience.....48

III.4 Conclusion.....50

**Conclusion général.....51**

Liste des figures

**Chapitre I Etude bibliographique**

Figure I.1 : Figure montre un joint de soudage.....3

Figure I .2 : Classification des procédés de soudage.....4

Figure I.3 : Schéma du système arc électrique.....5

Figure I.4 : Principe du Soudage à l’arc avec électrode enrobée (EE).....6

Figure I.5 : Électrode enrobée.....7

Figure I.6 : La courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension.....10

Figure I.7 : Les différents types de générateurs de soudage.....11

Figure I.8 : Le croquis didactique du procédé de soudage.....12

Figure I .9 : Schéma de principe du soudage MIG/MAG.....14

Figure I .10 : Schéma type d’une installation manuelle de soudage MAG.....15

Figure I.11 : Exemples de fissures..... 18

Figure I.12 : Fissuration à froid.....18

Figure I.13 : Les différents types de soufflure.....19

Figure I : 14 : Exemple de soufflures.....19

Figure I.15 : Déformations de soudage de joint V.....21

Figure I.16 : Déformations de soudage d’assemblages en T.....21

Figure I.17 : Le mouton de Charpy.....24

Figure I .18 : Eprouvette Charpy en U.....24

Figure I.19 : Eprouvette Charpy en V.....25

**Chapitre II Matériaux et techniques expérimentales**

Figure II.1 : Photo d’un EE rutile.....29

Figure II.2 : Photo d’un EE basique.....30

Figure II.3 : Plaquettes avant l'assemblage.....	32
Figure II.4 : Bridage des plaques.....	32
Figure II.5 : Différentes passes.....	33
Figure II.6 : Forme de la maquette soudée avec EE du type rutile après fraisage.....	34
Figure II.7 : Forme de la maquette soudée avec EE du type basique après fraisage.....	34
Figure II.8 : Echantillons (épreuves) découpées avec la scie mécanique.....	34
Figure II.9 : Réalisation de l'entaille avec un angle de 45°.....	35
Figure II.10 : Type d'épreuves pour les essais respectifs de résilience et dureté.....	36
Figure II.11 : Photo de duromètre Brinell.....	36
Figure II.12 : différentes positions.....	38
Figure II.13 : Mouton pendule d'essai de résilience.....	38
Figure II.14 : Photo d'une Polisseuse.....	40
Figure II.15 : Microscope optique piloté par ordinateur utilisé.....	41

### **Chapitre III Résultats et discussion**

Figure III.1 : Direction transversal.....	42
Figure III.2 : Microstructure du MB de la plaque soudée avec EE basique.....	42
Figure III.3 : Microstructure de la ZAT de la plaque soudée avec EE rutile.....	43
Figure III.4 : Microstructure de la zone fondue soudée avec EE rutile.....	43
Figure III.5 : Microstructure de la ZAT pour la plaque soudée avec EE basique.....	43
Figure III.6 : Microstructure de la zone fondue soudée avec EE basique.....	44
Figure III.7 : Histogrammes de la dureté HB30 pour la plaque soudée avec EE basique.....	46
Figure III.8 : Histogrammes de la dureté HB30 pour la plaque soudée avec EE rutile.....	46
Figure III.9 : Histogramme des valeurs de la résilience.....	49

## Liste des tableaux

### Chapitre I Etude bibliographique

Tableau I.1 : Choix de diamètres de électrodes.....	9
Tableau I.2 : Intensité moyenne de soudage pour la position à plat.....	10
Tableau I.3 : Les avantages et les inconvénients de soudage à l'arc avec électrode enrobée....	13
Tableau I.4 : Avantages et inconvénients du procédé.....	17
Tableau I.5 : L'influence des paramètres de soudage sur la déformation.....	21

### Chapitre II Matériaux et techniques expérimentales

Tableau II.1 : Désignation de la norme ancienne et nouvelle de l'acier E24(S235).....	28
Tableau II .2 : Certificat d'analyse chimique et mécanique d'acier E24(S235).....	29
Tableau II.3 : Composition chimique d'un E.E rutile.....	30
Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques d'un E.E rutile.....	30
Tableau II .5 : Composition chimique d'un E.E. basique.....	31
Tableau II .6 : Caractéristiques mécaniques d'un E.E. basique	
Tableau II.7 : Paramètres de soudage pour la réalisation de la liaison métallique.....	33
Tableau II.8 : Paramètres de fraisage.....	35

### Chapitre III Résultats et discussion

Tableau III.1 : Résultats de la dureté HB30 de la plaque soudée avec l'électrode basique et rutile.....	45
Tableaux III.2 : Résultats de l'essai de résilience en (J/cm <sup>2</sup> ) pour les deux plaques soudées et l'acier S235 (brute).....	48
Tableau III.3 : Montre les éléments caractéristiques du l'électrode basique et rutile.....	50

## Liste des abréviations

**EE:** électrode enrobée

**SMAW:** Shielded metal arc welding

**TIG:** Tungsten Inert Gas

**MIG:** Metal inert gas

**MAG:** Metal active gas

**USA:** United States of America

**MB:** Métal de base

**ZAT :** Zone affectée thermiquement

**ZF :** Zone de fusion

**EA :** électrode Acide

**EB :** électrode basique

**EO :** électrode Oxydant

**ER :** électrode rutile

**HB :** Brinell Hardness

**K<sub>cv</sub> :** résilience pour éprouvette à l'entaille <V>

**K<sub>cu</sub> :** résilience pour éprouvette à l'entaille <U>

**R :** la résistance

**P :** L'énergie

**U :** la tension

**I :** l'intensité

**ENMTP :** Entreprise Nationale de Matériel de Travaux Publics

**E1, E2, E3, E4, E5, E6 :** E : éprouvette

---

# Introduction générale

### Introduction générale

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, automobiles, ponts, réservoirs, Grues et tant d'autres machines qui ne seraient être construites sans le recours au soudage. Le soudage est un processus de fabrication généralement utilisé pour assembler des pièces. Il consiste à fondre partiellement les pièces à assembler en ajoutant un matériau d'apport pour former un bain de métal fondu qui devient après solidification et refroidissement une jonction fixe (joint soudé). Il existe un très grand nombre de procédés de soudage dont les principes sont différents.

Notre travail est structuré en 3 chapitres :

Pour notre cas d'étude nous avons utilisé le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE) utilisée pour la réalisation de la plupart des soudures.

Le soudage est un procédé très complexe est difficile à mettre en œuvre car il faut prendre en considération plusieurs critères est plusieurs phénomènes qui peuvent entrés en jeu lors de l'opération de soudage.

L'objectif est d'étudier l'influence du métal d'apport sur la fiabilité d'un joint de soudure d'un assemblage de deux pièces en acier S235 par le procédé (EE) avec deux électrodes enrobées différentes (rutilé et basique), et la détermination des propriétés mécaniques de résilience et dureté avant et après soudage.

- ❖ Le premier chapitre fera l'œuvre d'une étude bibliographique sur les différents types de soudage à l'arc électrique ainsi que le comportement mécanique aux chocs (résilience) et (la dureté).
- ❖ Le deuxième chapitre traitera les étapes de la fabrication des éprouvettes d'essais, la réalisation de maquettes soudées ainsi que la présentation des techniques de caractérisation.
- ❖ Le troisième chapitre rassemble les résultats obtenus et leurs discussions. Enfin, en terminera par une conclusion générale.

**Chapitre**

**1**

**Revue bibliographiques**

## **I. Introduction**

Le soudage à l'arc électrique est un moyen d'assemblage permanent, il est utilisé pour des réalisations rapides, et lorsqu'il permet un gain de temps par rapport à un usinage, on distingue plusieurs types de soudages :

- ❖ Soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE) ;
- ❖ Soudage électrique à l'arc sous flux solide ;
- ❖ Le procédé de soudage sous protection gazeuse TIG ;
- ❖ Le procédé de soudage sous protection gazeuse MIG/MAG.

### **I.1 Historique de soudage**

Les origines du soudage moderne datent la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et du début de 20<sup>ème</sup> siècle. À cette époque s'invente :

- Le soudage par aluminothermie (procédé chimique) : Goldsmith, Allemagne.
- Le soudage avec électrode de charbonne : Bernardo et Olszewski, Russie.
- Le soudage avec électrode fusible flue : Slavian, RUSSIE.
- Le soudage avec électrode enrobée Keller, Suède.
- Le soudage par résistance Thompson, USA.
- Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard, France.

Le développement des procédés du soudage est devenu de plus en plus rapide avec l'invention du soudage avec les électrodes enrobées et le soudage au chalumeau oxyacétylénique, ce dernier a rendu possible la réalisation des premiers œuvres importants comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout à USA et en Angleterre). L'introduction massive du soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile et parmi les nouveaux procédés nous pouvons nommer :

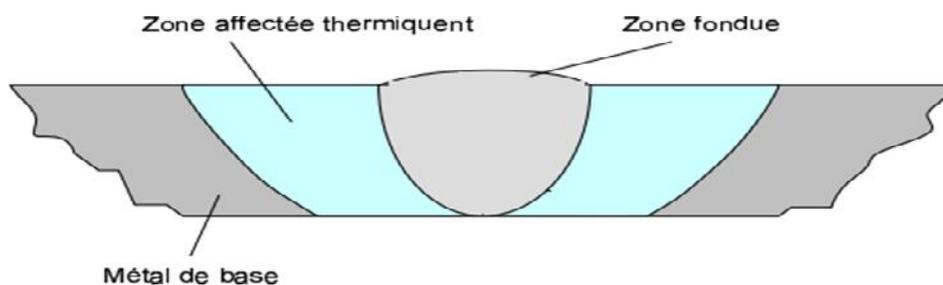
- Le soudage avec électrode de tungstène : 1924 à l'USA.
- Les soudages sous flux en 1935 à l'USA.
- Le soudage vertical sous laitier en 1950 en URSS.
- Le soudage sous la protection gazeuse de 1950 à 1960.
- Le soudage avec fils fourre de 1950 à 1960.
- Le soudage explosion de 1950 à 1960.

- Le soudage par bombardement électronique en 1956 en France.
- Le soudage au laser en 1965. [1].

### I.1.1 Définition de soudage :

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, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. [1]

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimiques. [2]. Dans l'opération de soudage, la liaison atomique réalisée au niveau de joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée l'élévation de la température dans les pièces soudées. La continuité entre les pièces est schématisée sur la figure I.1. [1]



**Figure I.1** : figure montre un joint de soudage.

#### ✓ Zone de fusion (ZF)

C'est la région chauffée au-dessus de la température du liquide. La structure du métal de base initial est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés.

#### ✓ Zone affectée thermiquement (ZAT)

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

## I.1.2 Classification des procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes de la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres les continuités métalliques sont obtenues sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure I.2. [3]

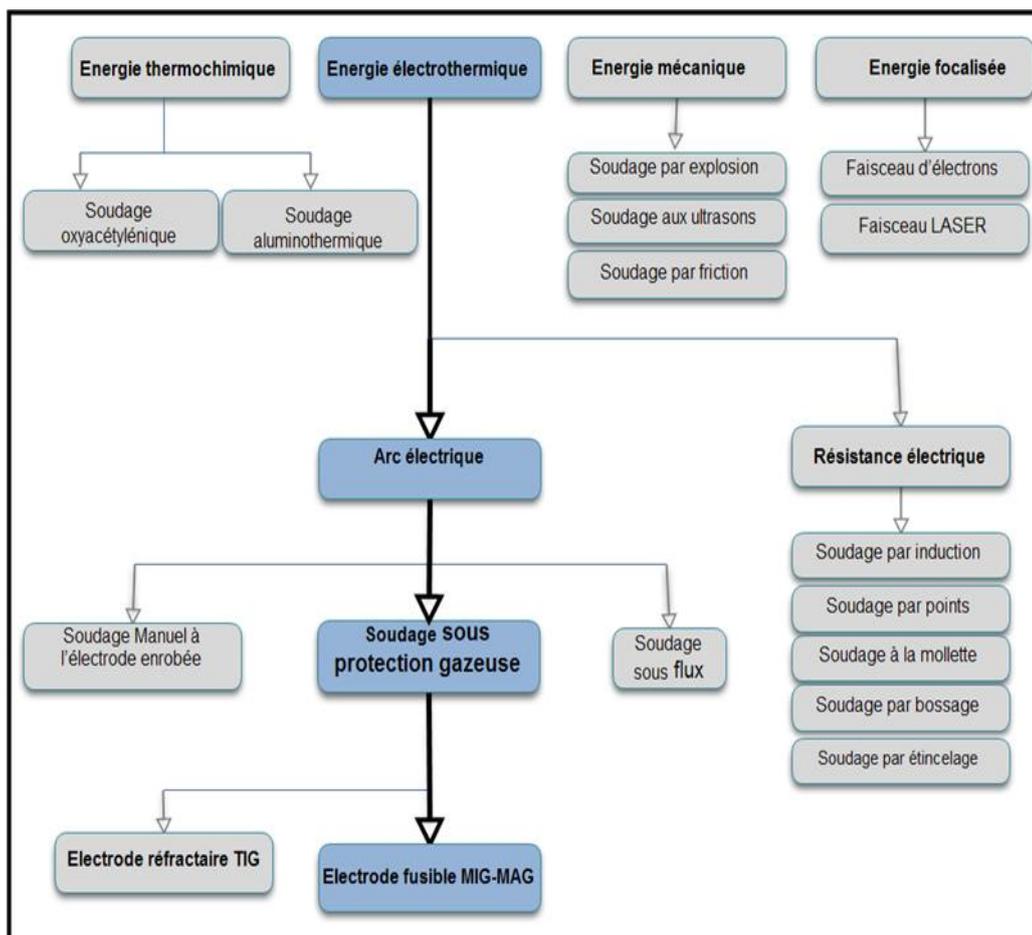


Figure I .2 : Classification des procédés de soudages. [4]

## I.2 Soudage à l'arc électrique

### I.2.1 Définition de l'arc électrique :

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur en dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques, essentiellement [5] :

- ✓ Électriques, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs ;
- ✓ Thermiques auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion. On peut représenter l'arc électrique dans la figure I.3 [3], où on distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc.

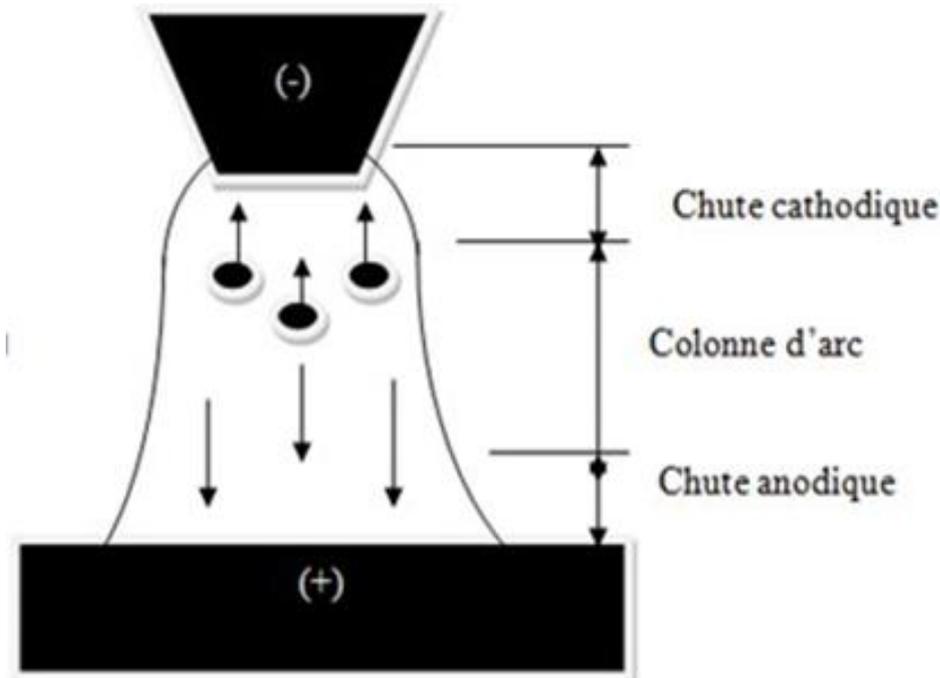


Figure I.3 : schéma du système arc électrique.

- ✓ La cathode : C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire de deux modes distincts appelés émission thermoïonique et non thermoïonique. Le rôle de la cathode est de fournir les électrons à l'arc. [3]
- ✓ L'anode : C'est le collecteur d'électrons.
- ✓ La colonne d'arc : C'est la zone de passage des électrons entre les électrodes.

### I.3 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE)

#### I.3.1 Définition du procédé :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (EE) ou (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de

l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variante de 30 à 400 ampères(A) en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur ( $U_0$ ) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts(V). [6]

### I.3.2 Principe du procédé :

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder. [6]

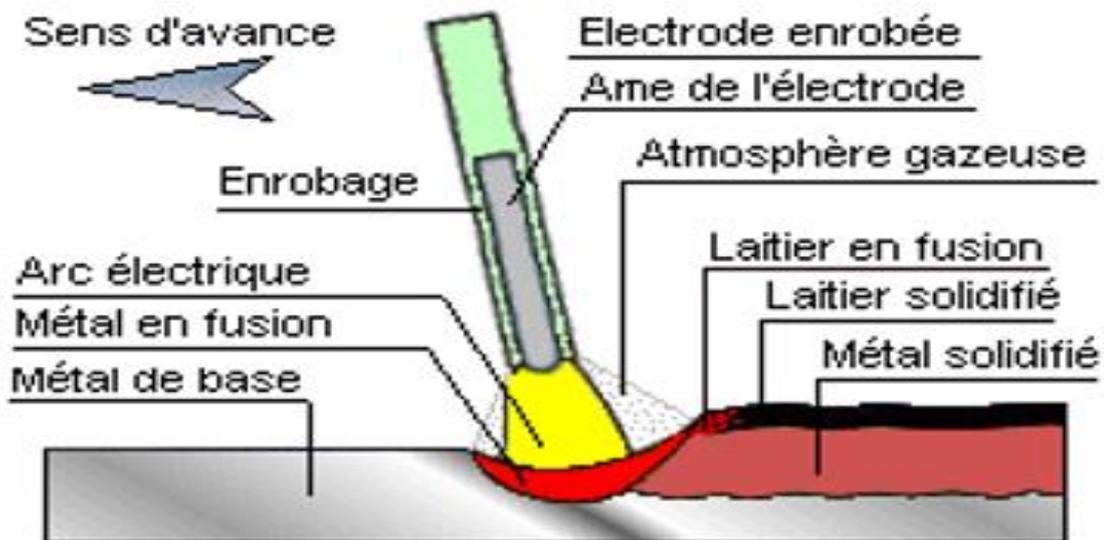


Figure I.4 : Principe du Soudage à l'arc à l'électrode enrobée (EE).

## I.4 Définition de l'électrode enrobée :

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

- **L'âme** : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.
- **L'enrobage (revêtement)** : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. L'enrobage a un rôle électrique, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante. L'enrobage a un rôle métallurgique, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe, le diamètre de l'électrode enrobée varie de  $\varnothing$  1,6 à  $\varnothing$  8 mm, la longueur totale est comprise entre 250 et 500 mm. Certaines électrodes peuvent atteindre 1 mètre(m) pour des applications spécifiques (soudage automatique).

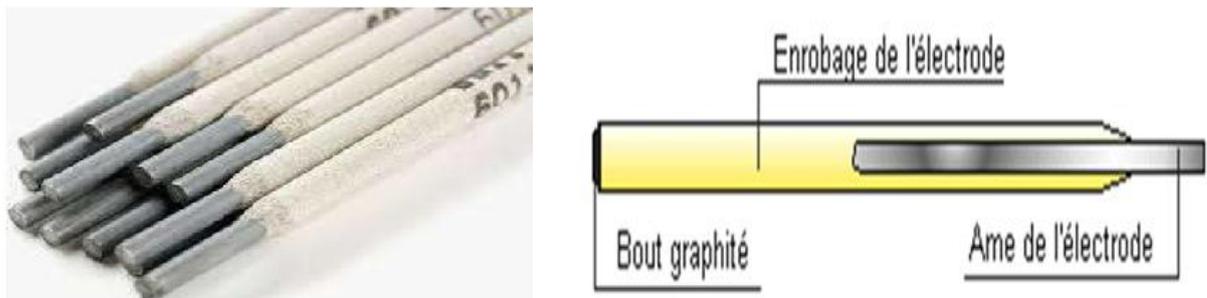


Figure I.5 : Électrode enrobée.

### I.4.1 Classification des enrobages des électrodes enrobées

- Acide ou A (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages).
- Basique ou B (à base de carbonate de calcium et de fluor de calcium).
- Cellulosique ou C (à base de cellulose).
- Oxydant ou O (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages).
- Rutile ou R (à base d'oxyde de titane).

- Haut rendement ou RR (à base de poudre métallique).
- Spécial ou S.

#### **I.4.2 Les électrodes enrobées utilisées**

- Rutiles pour les travaux courants.
- Basiques pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression).
- Cellulosiques pour les soudures à forte pénétration en position descendante.

#### **I.4.3 Étuvage des électrodes enrobées :**

Les électrodes à enrobage basique et rutile-basiques doivent être étuvées dans un four-étuve à 300° Celsius pendant 2 heures. Après étuvage, les électrodes à enrobage basique et rutile-basiques doivent être conservées à une température de 120° Celsius dans des étuves portatives sur le lieu de soudage. Les autres types d'électrodes à enrobage rutile, cellulosique et acide sont conservées dans un local chauffé avec une humidité relative inférieure à 60%.

Un nouveau système de fabrication et d'emballage sous vide permet d'obtenir des électrodes à enrobage basique à très faible taux d'humidité qui ne nécessitent aucun étuvage avant utilisation.

#### **I.4.4 Domaines d'application**

Tôlerie, construction navale, construction mécanique (châssis, ensemble mécano-soudé, charpente métallique, réservoirs...).

#### **I.4.5 Paramètres de soudage par diamètre des électrodes enrobées**

Lorsque l'intensité est trop faible, il y a collage de l'électrode enrobée sur la pièce à souder, la fusion est molle et la pénétration est faible, l'amorçage est difficile, une instabilité de l'arc et une mauvaise compacité du métal déposé (présence de défauts type soufflure et inclusion de laitier).

Lorsque l'intensité est trop forte, vous constatez des projections importantes aux bords du joint, des écoulements de métal lors du soudage en position.

Ø électrode	Enrobage mince	Enrobage semi-épais	Enrobage épais	Enrobage R % 110/130
Ø 1.6 mm	25A	30A	35A	
Ø 2 mm	40A	50A	55A	
Ø 2.5 mm	60A	70A	75A	80A
Ø 3.2 mm	90A	100A	110A	115A
Ø 4 mm	130A	150A	160A	170A
Ø 5 mm	170A	190A	200A	220A

**Tableau I.1** : Choix de diamètres des électrodes.

Les règles générales pour calculer l'intensité du courant de poste soudure par rapport

Au diamètre de l'électrode ( $\emptyset$ ), la résistance ( $R$ ) et l'énergie ( $P$ ) de l'arc est :

- diamètre de l'électrode ( $\emptyset$ )       $I = (\emptyset - 1) \times 50 \dots (I.1)$
- la résistance ( $R$ )       $I = U / R \dots (I.2)$
- Avec cette équation, on peut aussi déduire que si la tension est constante, l'intensité du courant diminuera à mesure que la résistance augmentera.
- L'énergie ( $P$ )       $I = P / U \dots (I.3)$
- La chaleur atteinte dans l'arc dépend donc de ces deux paramètres. Plus l'intensité du courant et la tension seront élevés, plus la chaleur libérée sera grande.

#### I.4.6 Le réglage de l'intensité appliqué à l'électrode

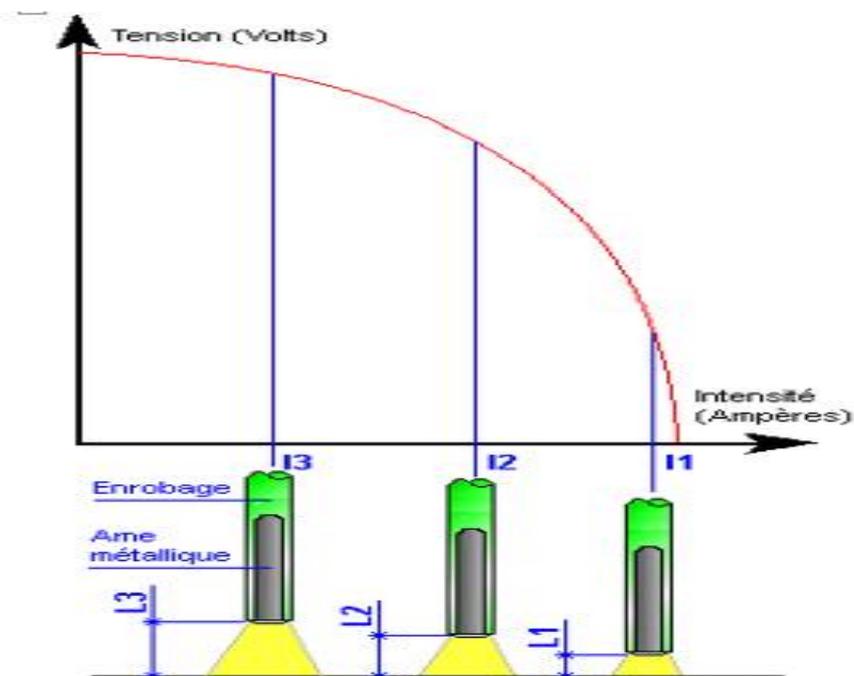
Il dépend :

- du diamètre de l'électrode (voir tableau ci-dessus).
- de la nature de l'âme de l'électrode.
- de la nuance des pièces à assembler.
- de la position de soudage.
- du type d'assemblage rencontré
- de l'épaisseur des pièces à souder

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat						
Épaisseur	Ø 1,6 mm	Ø 2,0 mm	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm
3 mm		60 A	70 A	90 A		
4 mm			80 A	100 A	120 A	
5 mm			90 A	110 A	130 A	160 A
6 mm			90 A	120 A	140 A	160 A
8 mm			90 A	125 A	150 A	170 A
10 mm				130 A	160 A	190 A
12 mm				130 A	170 A	190 A
15 mm		130 A	170 A		200 A	
20 mm			190 A		220 A	

**Tableau I.2:** Intensité moyenne de soudage pour la position à plat.

#### I.4.7 La courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension :



**Figure I.6 :** La courbe de caractéristique plongeante de l'intensité et de la tension.

Les générateurs de soudage à l'arc à l'électrode enrobée sont à caractéristiques plongeantes, c'est à dire que lorsque la hauteur de l'arc électrique est modifiée (par le mouvement de l'électrode par le soudeur), l'intensité du courant est modifiée très faiblement.

L'intensité du courant de soudage diminue lorsque la longueur d'arc augmente. Inversement, lorsque la longueur d'arc diminue, l'intensité augmente.

## I.5 Les différents types de générateurs de soudage

Les différents types de postes de soudage ou générateurs sont :

- Les transformateurs statiques monophasés qui fournissent du courant alternatif à 50 hertz. Ces postes sont les plus économiques du marché et les plus simples.
- Les transformateurs statiques monophasés ou triphasés à redresseur (pont de diodes, thyristors ou transistors) qui fournissent du courant continu. Les bornes électriques de sortie sont repérées par les signes conventionnels (+) et (-).
- Les groupes rotatifs à changeur de fréquence. Ils se composent d'un moteur entraînant une génératrice à courant alternatif de 150 à 450 Hertz.
- Les transformateurs rotatifs à redresseur qui fournissent un courant continu redressé.



**Figure I.7** : Les différents types de générateurs de soudage.

### I.5.1 Nature de courant

Selon le type de métal à souder et la nature de courant peut être continu ou alternatif.

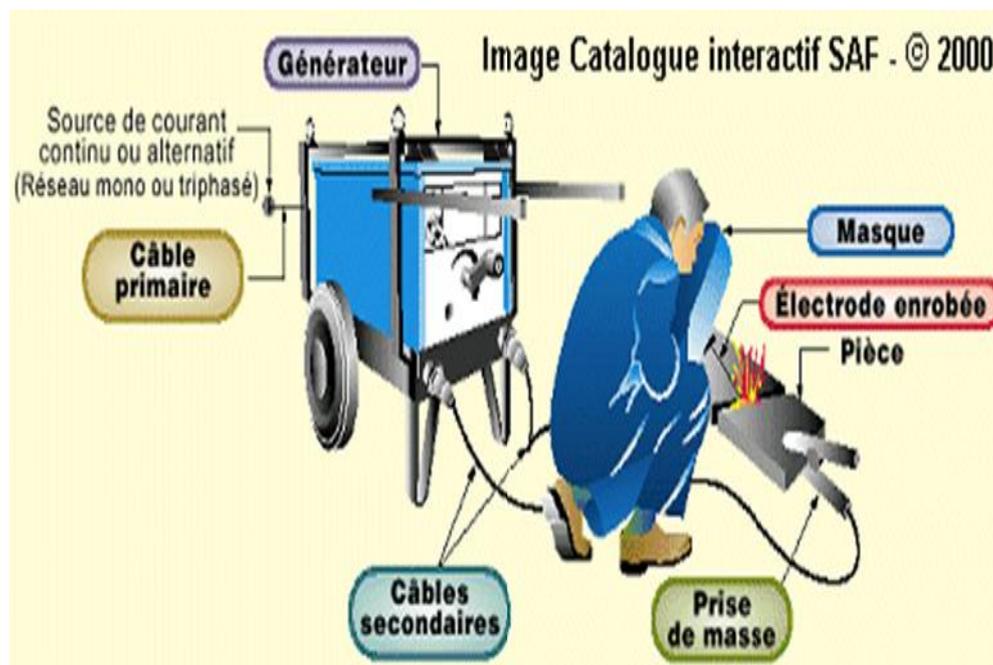
### I.5.1.1 Courant continu

Le courant continu permet un amorçage et maintient de l'arc faciles mais il nécessite un redressement du courant de distribution presque toujours alternatif. L'autre difficulté de ce type de courant est le soufflage magnétique dont l'arc se comporte comme un conducteur mobile est dévié par le champ magnétique induit par le courant de soudage.

### I.5.1.2 Courant alternatif

Le courant alternatif présente l'avantage d'éviter le besoin de redresser le courant de distribution étant lui aussi alternatif. Il suffit de le faire passer dans un transformateur pour abaisser sa tension. Les alternances induisent dans la pièce métallique des courants de Foucault dont son champ est antagoniste du champ induit par le courant de soudage ce qui empêche le soufflage magnétique. L'inconvénient principal est que l'arc en alternatif est moins stable car il se refroidit à chaque alternance lorsque le courant s'annule. Pour y remédier une augmentation de fréquence de courant de distribution est exigée.

## I.6 Le croquis didactique du procédé de soudage



**Figure I.8** : Le croquis didactique du procédé de soudage.

### I.6.1 Installation de soudage pour le soudage à l'arc à l'électrode enrobée

- 1) Un générateur de courant (poste de soudage).
- 2) Une pince porte-électrode avec câble conducteur.
- 3) Une pince de masse avec câble conducteur.
- 4) Une étuve portative pour les électrodes basique.
- 5) Un masque avec verres teintés spéciaux.
- 6) Une combinaison de soudeur et gants en cuir souple.
- 7) Un marteau à piquer et une brosse métallique.
- 8) Une meuleuse d'angle électrique.
- 9) Des écrans ou rideaux de protection.
- 10) Une ventilation dans les endroits confinés.

### I.7 Les avantages et les inconvénients de soudage à l'arc à l'électrode enrobée

Les avantages	Les inconvénients
-Soudure de bonne qualité -Procédé "économique" -Résistance des soudures	-Aspect des soudures -Les électrodes doivent toujours être maintenues dans un état sec -Déformations des pièces soudées

**Tableau I.3** : les avantages et les inconvénients de soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

### I.8 Le procédé de soudage MIG/MAG (Metal inert gas et Metal active gas)

#### I.8.1 Définitions du procédé :

Le soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil électrode fusible est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil d'apport ( $\varnothing$  0,6 à 2,4 mm) à dévidage continu et à vitesse constante (de 2 à 20 mètres /minutes environ) et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil métallique pour constituer le bain de fusion donnant lieu au cordon de soudure après refroidissement. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible de gaz de protection

actif ( $\text{CO}_2$  ou Argon +  $\text{CO}_2$  ou Argon +  $\text{O}_2$ ). Un générateur électrique fournit le courant exclusivement continu avec une intensité variante de 40 à 700 ampères (A) en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil électrode, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler.

La bobine du fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la torche, dans la gaine guide-fil de la torche de soudage jusqu'au tube contact. La torche de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie positive du générateur de soudage à courant continu.

La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débit mètre. L'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder. [7]

## I.8.2 Principe du procédé de soudure MIG/MAG

Lorsque le soudeur actionne la gâchette, celui-ci actionne le dévidage du fil, la sortie du gaz et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le métal d'apport peut ainsi se mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue. Le tout s'exécute sous protection gazeuse. La figure I.9 présente le principe du procédé de soudure sous protection gazeuse MAG :

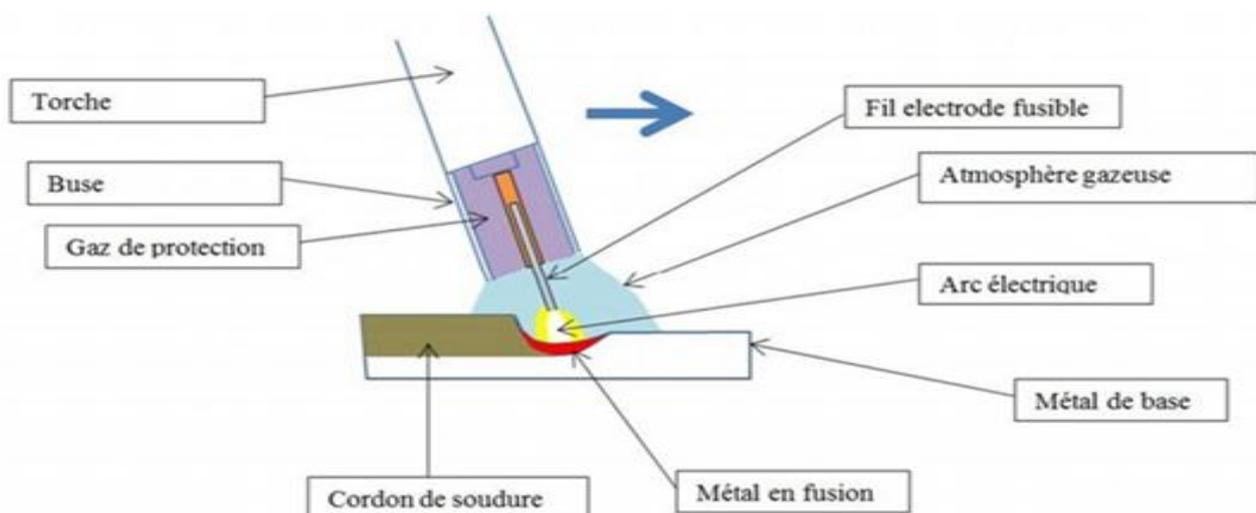
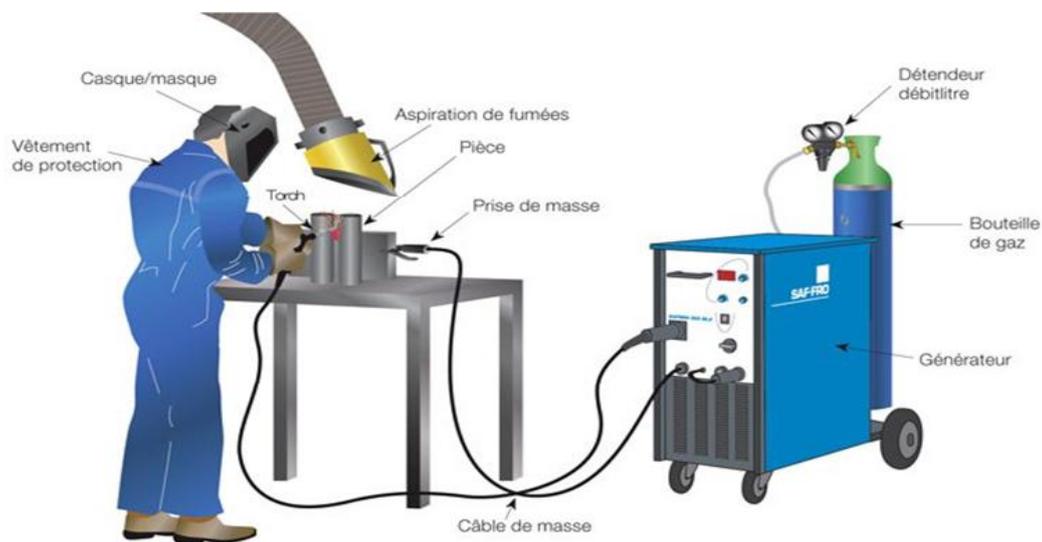


Figure I .9 : Schéma de principe du soudage MIG/MAG.

### I.8.3 Installation d'une unité de soudage MIG/MAG

Une installation de soudage est constituée de trois principaux éléments comme illustré en figure I.10.

- ✓ Le générateur qui fournit le courant à l'origine de l'arc électrique ;
- ✓ Le dévidoir de fil qui permet l'apport de fil de la bobine jusqu'à la torche de soudage ainsi que l'amenée de courant ;
- ✓ La torche de soudage ainsi que la gaine qui permet le passage du courant, l'apport de fil et l'amenée de gaz.



**Figure I .10** – Schéma type d'une installation manuelle de soudage MAG. [8]

### I.8.4 Domaines d'application

On peut utiliser les procédés MIG/MAG dans l'installation de charpentes métalliques et dans tous les alliages commerciaux. Le premier procédé est utilisé pour le soudage des aciers doux et le deuxième procédé permet de réaliser des soudures en toutes positions, il est utilisé pour l'assemblage des métaux semblables, ferreux et non ferreux. [9]

## **I.9 Conséquences du procédé de soudage**

### **I.9.1 Conséquences thermiques du soudage**

Les opérations de soudage engendrent des cycles thermiques qui conduisent à des changements de phase à l'état liquide et solide dans la zone soudée. Les cycles thermiques sont caractérisés par un chauffage suivi d'un refroidissement. L'amplitude et la durée de ce trajet thermique varie en fonction de la distance par rapport à la source de la chaleur qui peut être mobile (ex. soudage à l'arc) ou non (ex. soudage par résistance).

### **I.9.2 Conséquences métallurgiques du soudage**

Les cycles thermiques du soudage conduisent à des modifications métallurgiques du matériau de base dans la zone où la température maximale obtenue au chauffage est suffisamment importante. Ces modifications métallurgiques dépendent de la composition chimique locale du matériau de base et des conditions de soudage telles que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la source de chaleur et les conditions de refroidissement.

### **I.9.3 Conséquences mécaniques du soudage**

L'histoire thermique et les modifications de microstructures provoquées par le soudage s'accompagnent naturellement d'évolutions importantes des propriétés mécaniques par rapport au métal de base. D'autre part, la localisation de la source de chaleur ou autrement dit, les dilatations hétérogènes et les variations des propriétés mécaniques du matériau en fonction de la température et de la microstructure ainsi que les conditions de bridage des pièces engendrent les contraintes et les déformations résiduelles dans les structures après soudage.

## I.10 Avantages et inconvénients du procédé (MIG/MAG)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bobine de fil (soudage en continu) ;</li> <li>- Productivité importante (comparé au TIG) ;</li> <li>- Peu de fumée (par opposition au soudage à l'électrode enrobée) ;</li> <li>- Procédé semi-automatique ou automatique ;</li> <li>- Soudage de l'acier et de l'aluminium en toutes positions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- outille de gaz de soudage ;</li> <li>- Soudage en intérieur (éviter les courants d'air) ;</li> <li>- Pénétration à maîtriser (sinon collage) ;</li> <li>- Le soudage ne peut être effectué à une très grande distance de la source de courant à cause de l'alimentation en fil électrode ;</li> <li>- L'intensité est liée au débit du fil électrode, ce qui peut conduire à certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage.</li> </ul>

**Tableau I.4** : Avantages et inconvénients du procédé [10].

## I.11 Les défauts de soudage

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Sont exposés dans cette ressource les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé.

### I.11.1 Les fissures

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

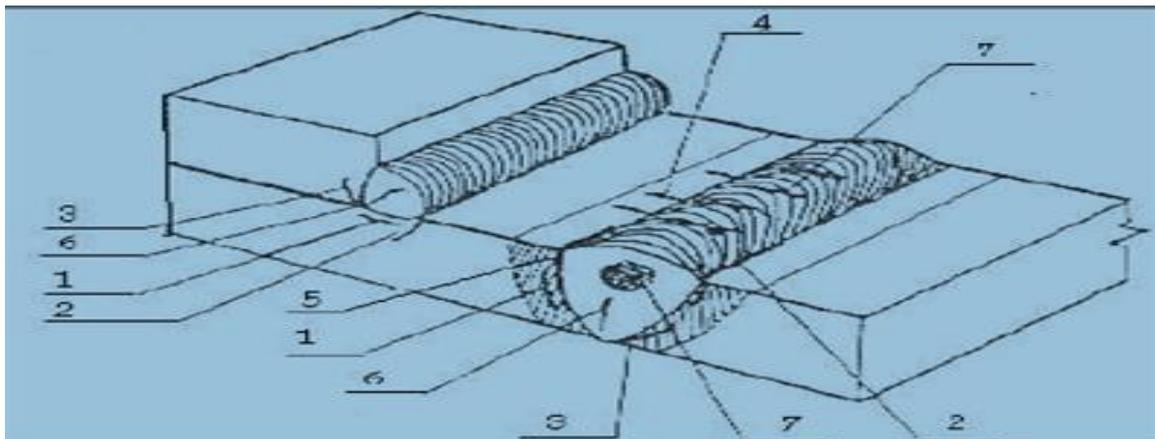
On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure :

- La fissuration à chaud.
- La fissuration à froid

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou phosphore). [11]



**Figure I.11** : Exemples de fissures [12].

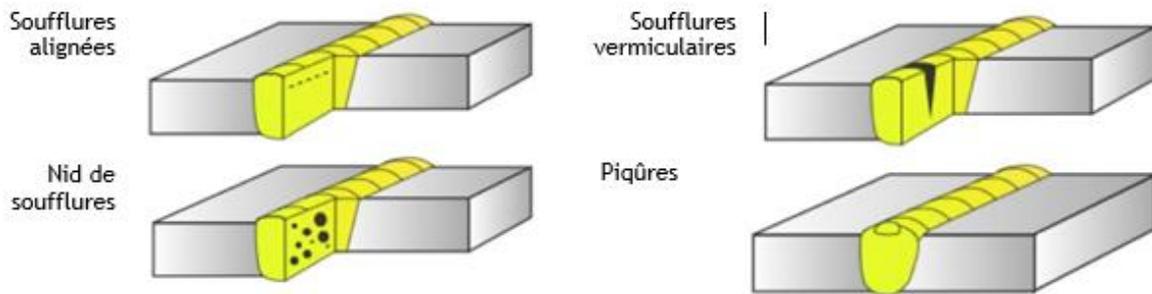


1- fissure sous cordon ; 2- fissure au raccordement ; 3- fissure à la racine ; 4- fissure transversale ; 5- fissure longitudinale ; 6- fissure longitudinale ; 7- fissure transversale.

**Figure I.12**– Fissuration à froid. [11]

### I.11.2 Les soufflures

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Des soufflures débouchantes sont appelées piqûres.



**Figure I.13**– Les différents types de soufflure.

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder. Pour les prévenir, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures.

Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base. [13]



**Figure I : 14**– Exemple de soufflures.

### **I.11.3 La pollution ferreuse**

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage.

Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections du métal fondu lors des opérations de soudage. [14]

### **I.11.4 Les retassures et criques de solidification**

Comme en fonderie (voir ressource « Le moulage en coquille par gravité : règles de tracé »), à la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon.

Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope.

### **I.11.5 Les inclusions**

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger. Il existe différents types d'inclusion :

- Inclusion solide (poussières),
- Inclusion de laitier,
- Inclusion de flux,
- Inclusion d'oxyde métallique,
- Inclusion métallique (électrode). [15]

### **I.11.6 Les déformations de soudage**

Les déformations liées au procédé de soudage sont fonction de type de soudure. Figure I.15 présente les déformations lors du soudage d'un joint en V ; les déformations durant un assemblage en T sont présentées dans la figure I.16. [16]

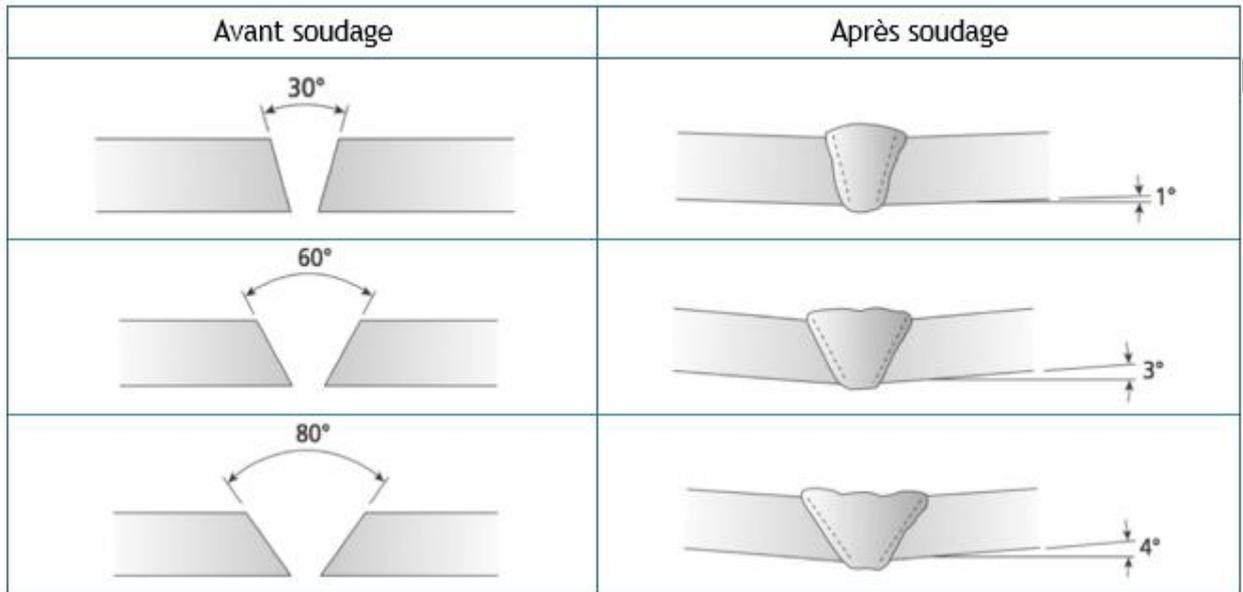


Figure I.15 : Déformations de soudage de joint V.

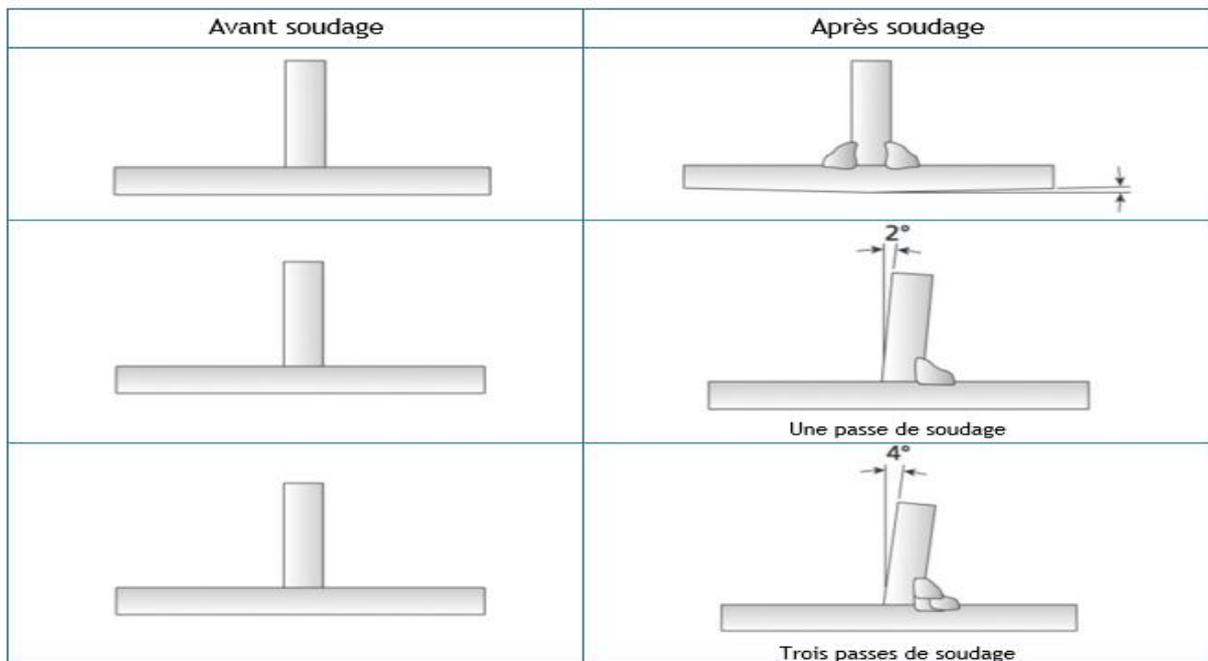


Figure I.16 : Déformations de soudage d'assemblages en T.

Le retrait angulaire se contrôle par l'application de déformations préalables ou par une séquence de soudage appropriée.

Paramètres	Effets sur la présence de déformations
Bonne préparation des joints	↓
Nombre de passes      ↗	↗*
Vitesse de soudage      ↗	↓

Tableau I.5 : l'influence des paramètres de soudage sur la déformation .

\* Augmente les risques de déformations angulaires mais diminue les risques de déformations longitudinales

Plusieurs méthodes existent pour éviter les déformations de soudage comme de prévoir une préparation adéquate des joints, une vitesse de soudage la plus rapide possible et une réduction du nombre de passes de soudage au minimum.

D'autres méthodes incluent le préchauffage, le chauffage, le bridage et le pointage. [16]

## **I.12 Les remèdes de la fissuration**

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour atténuer et dans beaucoup de cas pour supprimer la fissuration des soudures :

- Energie de soudage assez élevée afin de ralentir le refroidissement.
- Le contrôle de la température entre passes toujours dans l'objectif de limiter le refroidissement dans le temps. Il est nécessaire de limiter les contraintes internes et externes en limitant des bridages abusifs et en choisissant judicieusement les séquences de soudage.
- Elimination de toutes les sources d'hydrogène : calamine, rouille, graisse, peinture, humidité sur les pièces et surtout présence d'humidité dans les enrobages (emploi des électrodes à basses teneur en hydrogène comme certaines électrodes basiques).

## **I.13 Le comportement mécanique des métaux**

Le comportement mécanique d'un matériau reflète sa réponse (déformation) à une force appliquée. Les principales propriétés mécaniques sont la résistance, la dureté, la résilience ; la ductilité et la rigidité. On détermine les propriétés mécaniques des matériaux par des expériences minutieuses en laboratoire aussi proches que possible des conditions d'utilisation. Les facteurs à considérer comprennent la nature de la charge appliquée, la durée de l'application et les conditions du milieu. La charge peut exercer une traction, une compression ou une cession, et sa valeur peut être constante ou varier continument. L'application peut ne durer qu'une fraction de seconde ou durer plusieurs années.

### I.13.1 La dureté

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété physique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. Les essais habituels de dureté sont simples, rapides, et généralement non destructifs, ils s'offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique. La dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la conservation du poli, la difficulté d'usinage, etc. Elle permet d'apprécier la résistance des corps fragiles (carbures, composés intermétalliques, etc.), on distingue trois essais de dureté [17]

1. Essais de dureté par pénétration (Essai de dureté Brinell).
2. Essais de dureté Rockwell.
3. Essais de dureté Vickers (Essai de macro dureté Vickers).

### I.13.2 Essai de résilience

L'essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture.

#### I.13.2.1 Définition et principe de l'essai :

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie  $W$  (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre  $K$  Joules/cm<sup>2</sup>.

L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau la figure I.17 montre le principe de l'essai du mouton de Charpy.

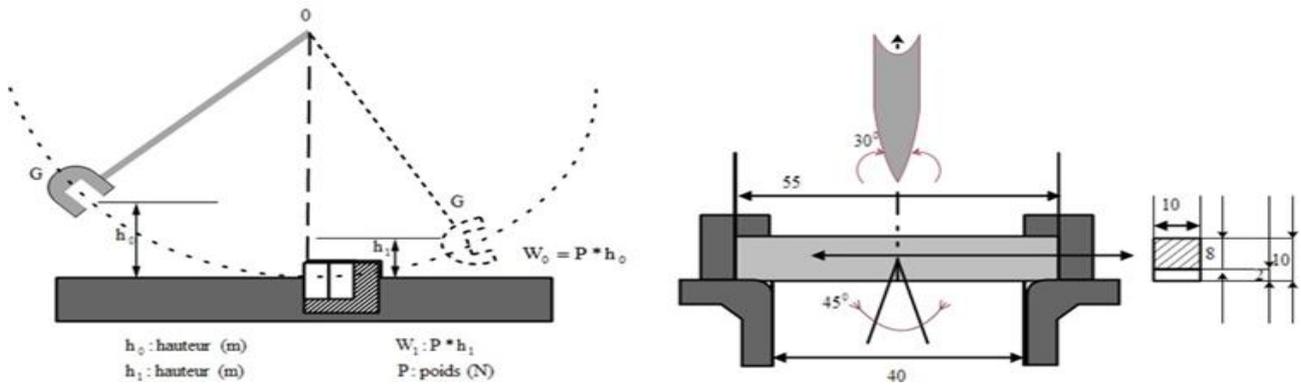


Figure I.17 : Le mouton de Charpy.

### I.13.2.2 Les éprouvettes pour la résilience

#### a) Eprouvettes CHARPY U

Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55 mm, l'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole **Kcu**.

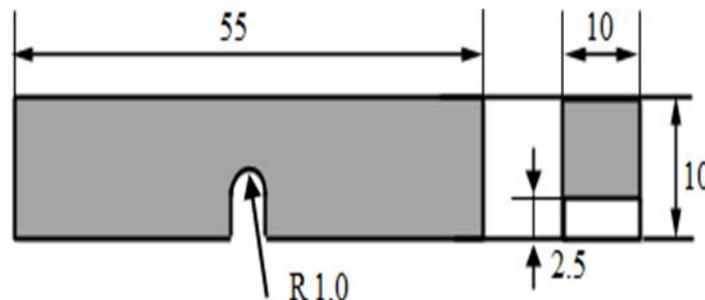


Figure I.18 : Eprouvette Charpy en U.

#### b) Eprouvettes CHARPY V

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole **Kcv**.

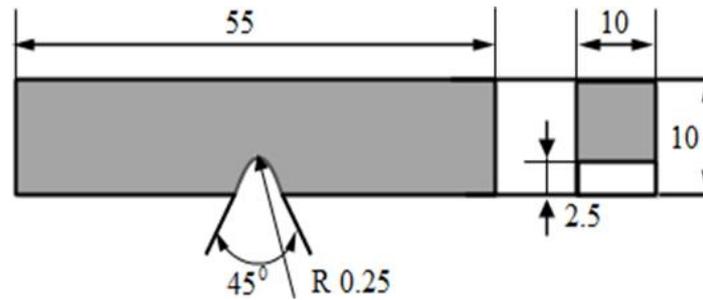


Figure I.19 : Epreuve Charpy en V.

## I.14 L'utilisation de soudage dans l'industrie

Nous estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier est destiné à la fabrication des produits soudés.

A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métalliques à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydrauliques.

Actuellement nous avons la possibilité de souder des éléments d'épaisseur de 0.01 mm jusqu'à 1000 mm et même plus. En bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes.

Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés.

Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipements), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER. [18]

### I.14.1 Comparaison entre soudage et rivetage

Le soudage peut être un excellent procédé d'assemblage techniquement, La durabilité maximal du soudage est son premier avantage, car ces deux parties n'en deviennent qu'une donc cette pièce pourra résister à un impact mécanique et pour le point de vue de l'éco-design. Il a l'avantage de lier des éléments constitués d'un même matériau. Dans ce contexte le recyclage d'une telle structure est largement facile puisque le temps de désassemblage est diminué en plus l'efficacité économique de ce procédé de transformation de la matière car elle

ne nécessite pas d'équipement et de matériaux coûteux. D'un point de vue des stratégies le soudage réduit la consommation de matériaux et augmente la conservation des ressources naturelles et de réduction des déchets, nuisances. Par contre le rivetage est une technique qui se réalise pour des pièces de faibles épaisseurs. On l'associe généralement à l'assemblage de pièces de tôlerie dont les dimensions longitudinales peuvent être importantes.

D'un point de vue technique le rivetage impose le perçage des éléments à fixer pouvant fragiliser localement la structure.

D'un point de vue de l'éco-design, la séparation d'éléments liés par ce procédé implique la destruction des rivets. Cette contrainte génère des déchets de faibles dimensions que l'on doit pouvoir récupérer. Cependant il peut être judicieux d'utiliser cette technique si les pièces ainsi assemblées et les rivets ont le même matériau. On supprime ainsi la phase de destruction pour le recyclage de la matière. On peut ajouter aussi que le rivetage peut augmenter d'une manière significative le poids du produit agissant ainsi sur la consommation énergétique durant les phases de distribution ou d'utilisation.

### **I.14.2 Les principaux risques liés au soudage**

L'opération de soudage comporte de nombreux risques, qui dépendent de la technique utilisée :

- Risques liés aux fumées et aux gaz : la fusion des métaux donne naissance à des fumées et gaz toxiques.
- Risques d'incendie et d'explosion.
- Risques d'électrisation : danger présent lors de la création d'arc électrique.
- Risques pour la peau et les yeux : production d'UV nocifs.
- Risques liés à l'exposition au bruit. [19]

**I.15 Conclusion**

Les procédés de soudage sont aussi divers que variés suivant les principes et les buts recherchés. Les procédés de soudage les plus utilisés sont les EE, MIG/MAG Suite aux travaux de recherche déjà entamés, le procédé EE pour différents métaux de base, ce travail est orienté vers l'utilisation du procédé de soudage EE pour la caractérisation d'un joint soudé des pièces en acier S235.

**Chapitre**

**2**

**Matériaux et techniques expérimentales**

## II. Introduction

Dans ce chapitre on a défini les matériaux étudiés ainsi que les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser l'effet du joint soudé sur la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par soudage à l'arc électrique avec le procédé EE (électrode enrobée). Le matériau utilisé pour le soudage des plaquettes est l'acier de construction S235.

### II.1 Présentation des matériaux

#### II.1.1 Présentation de l'acier S235(E24)

C'est un acier de construction mécanique d'usage générale avec une teneur en carbone ne dépassant pas 0.2%, c'est donc un acier hypoeutectoïde classé dans la catégorie des aciers doux. Selon la nouvelle désignation (EURONORME) (NF- EN 10027) S235, l'acier E24 est désigné par S235 qui indique que c'est un acier de construction mécanique dont la valeur maximale de la limite d'élasticité ne dépasse pas 235 MPa ou 24 kg/mm<sup>2</sup> soit en moyenne 24 daN/mm<sup>2</sup> d'où la désignation de E24 selon l'ancienne norme : 24 indiquant sa limite d'élasticité minimale en daN/mm<sup>2</sup>. Cet acier a comme une particularité une excellente soudabilité, mais une mauvaise résistance à la corrosion.

E24	(NF- EN 10025) S235
E : Classe E ou Engine pour construction métallique.	S : acier de construction ou structure pour un usage général de construction métallique
24 : résistance d'élasticité minimale en daN/mm <sup>2</sup> (Re=24daN/mm <sup>2</sup> ).	235 : résistance élastique (limite minimale) de l'acier en Mpa.

**Tableau II.1** : désignation de la norme ancienne et nouvelle de l'acier E24(S235).

Les différents éléments chimiques et les caractéristiques mécaniques de cette acier sont représentées sur le tableau fournit par le HALL TECHNOLOGIE :

L'acier E24 (S235)		
Caractéristique mécanique	Re [Mpa]	305
	Rm [Mpa]	429
	A%	33
Elément d'alliage	C	0.08
	Si	0.16
	Mn	0.61
	P	0.026
	Cu	0.43
	Cr	0.12
	Ni	0.16
	V	0.002
	Mo	0.002
	N	0.002
	Ti	0.002
S	0.34	

Tableau II .2 : certificat d'analyse chimique et mécanique d'acier E24(S235).

## II.1.2 Métal d'apport

Le métal d'apport utilisé pour l'assemblage par soudage bout à bout est le procédé électrode enrobée (EE) (rutile ; basique).

### II.1.2.1 Électrode enrobée(EE) rutile

Électrode enrobée rutile est classifié selon les normes suivantes :

DIN EN ISO 2560-A      E 42 0 RC 12

AWS A-5.1              E 6013



Figure II.1 : photo d'un EE rutile.

### 1- Composition chimique d'EE rutile :

La composition chimique d'électrode enrobée est présentée dans le tableau ci-dessous :

C	Si	Mn
0,09	0.65	1

**Tableau II.3:** Composition chimique d'un E.E rutile.

### 2- Caractéristiques mécaniques d'EE rutile :

Les caractéristiques mécaniques d'électrode enrobée rutile sont présentées dans le tableau suivant :

Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	KV(J)
420	510-610	22%	47J (0°C)

**Tableau II.4 :** caractéristiques mécaniques d'un E.E rutile.

### 3- Propriétés de l'électrode enrobée rutile :

- ✓ facile à souder, également en positions
- ✓ approprié pour la racine de la soudure et le remplissage
- ✓ aspect lisse de la soudure et bonne élimination du laitier
- ✓ faible tension d'amorçage.
- ✓ faible risque de projections.

#### II.1.2.2 Électrode enrobée(EE) basique

Électrode enrobée basique est classifié selon les normes suivantes :

DIN EN ISO 2560-A      E 42 4 B 12 RC12

AWS A-5.1              E 7016



**Figure II.2:** photo d'un EE basique.

### 1- Composition chimique d'EE basique :

La composition chimique d'électrode enrobée basique est présentée dans le tableau ci-dessous :

C	Si	Mn
0.05	0.5	0.7

**Tableau II .5** : Composition chimique d'un E.E. basique.

### 2- Caractéristiques mécaniques d'EE basique :

Les caractéristiques mécaniques d'électrode enrobée basique sont présentées dans le tableau suivant :

Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	KV (J)
420	50640	22%	47 J (-20 °C)

**Tableau II .6** : caractéristiques mécaniques d'un E.E. basique.

### 3- Propriétés d'électrode enrobée basique :

- ✓ modérément bien soudable.
- ✓ nécessité d'une tension d'amorçage élevée.
- ✓ aspect assez rugueux de la soudure.
- ✓ formation relativement forte de projections.
- ✓ élimination laitier assez bonne du.
- ✓ métal déposé ayant de bonnes propriétés à la résilience.

## II.2 Réalisation de maquettes de liaison métallique S235

### II.2.1 Préparation des plaquettes

L'acier (S235) est fourni par le Hall Technologie sous forme de tôle à forte épaisseur. Nous avons prélevé quatre (04) plaquettes de l'acier avec les dimensions (80×80×10 mm<sup>3</sup>). Pour l'exécution de l'assemblage des plaquettes nous avons utilisé le procédé EE, les deux plaquettes de base (soudure bout à bout) sont réalisées par fraisage sur un coté de chaque plaquettes avec chanfrein à 45° d'inclinaison pour obtenir la forme « V » présenté dans la figure II.3.



**Figure II.3 :** plaquettes avant l'assemblage.

### II.2.2 Nettoyage des plaquettes à souder

Avant le soudage, les plaques sont usinées et nettoyées de leurs impuretés (graisse, huile...).

### II. 2.3 Bridage

Avant soudage, on bride les deux plaquettes à souder dans le but d'éviter leurs déformations pendant l'exécution de soudage présenté dans la figure II.4.



**Figure II.4 :** bridage des plaques.

### II.2.4 Soudage des plaques

Le soudage utilisé dans ce travail est du type soudage à l'arc électrique avec EE de diamètre 3.25 mm (métal d'apport) de type rutile et basique compte tenu de l'épaisseur des plaquettes (10 mm), la réalisation du joint de soudure nécessite trois passes avec l'utilisation des paramètres consignés dans le tableau II.7 et qui sont ceux de la fiche technique de l'entreprise.

Plaques	Tension	L'intensité	Polarité	Position de soudage
Basique	220V	90 A	Normal	à plat
Rutile	220 V	90 A	Normal	à plat

**Tableau II.7:** paramètres de soudage pour la réalisation de la liaison métallique.



Première passe



Deuxième passe



Troisième passe

**Figure II.5 :** différentes passes.

Après le réglage du poste de soudage sur les paramètres calculés et l'exécution de l'opération de soudage on obtient deux tôles (plaquettes) assemblées illustre la maquette de la liaison métallique de l'acier S235 assemblée par le métal d'apport, la présence des deux brides sur la maquette ont été effectuées avant la réalisation de la liaison métallique pour maintenir d'une part la distance de 2 mm entre les deux bouts des deux métaux de base et éviter le flambage sous l'effet thermique durant l'opération de soudage.

### II.3 Prélèvement des échantillons

Après soudage nous allons travaillé sur une fraiseuse universelle pour effectuer un surfacage pour avoir une épaisseur de 10 mm afin d'avoir une forme parallélisme des faces.



**Figure II.6** : forme de la maquette soudée avec EE du type rutile après fraisage.



**Figure II.7**: forme de la maquette soudée avec EE du type basique après fraisage.

Les deux maquettes sont ensuite découpées en éprouvettes de 16 mm de largeur à l'aide d'une scie mécanique sous lubrification montré dans les figures suivantes (figure II.8).



**Figure II.8** : Echantillons (épreuves) découpées avec la scie mécanique.

### II.3.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques

Pour avoir des éprouvettes normalisées pour l'essai de résilience et de dureté, les six (06) échantillons découpés seront coupés et fraisés à nouveaux pour avoir une longueur de 55 mm de manière où le joint de soudure soit centré, en suite, ils vont subir une deuxième opération de surfaçage pour obtenir la dimension  $55 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ .

### II.3.2 Le fraisage des maquettes

Les paramètres de fraisage utilisés sont présentés dans le tableau II.8 :

Machine	Outils de coupe	Vitesse de coupe (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Passe (mm)
fraiseuse universelle	Fraise 2T $\emptyset$ 60 mm	Ebauche 350 Finition 500	Ebauche 320 Finition 500	Ebauche 0.4 Finition 0.2

**Tableau II.8** : paramètres de fraisage.

### II.3.3 Réalisation de l'entaille

Après avoir la forme finale des échantillons de dimensions normalisés de l'essai de résilience consiste a réalisé une entaille de forme V d'angle  $45^\circ$  et une profondeur de 2 mm au milieu du joint soudé. L'entaille est réalisée sur une fraiseuse verticale a quelle on a tourné le porte outil de  $45^\circ$ .



**Figure II.9** : réalisation de l'entaille avec un angle de  $45^\circ$ .

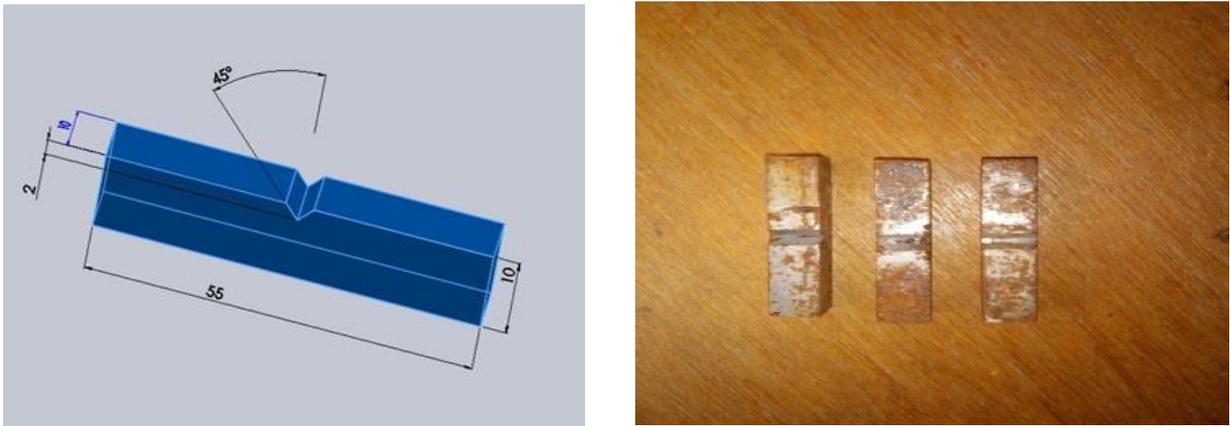


Figure II.10 : Type d'éprouvette pour les essais respectifs de résilience et dureté.

## II.4 Présentation des essais mécaniques réalisés

### II.4.1 Essai de la dureté

#### II.4.1.1 L'essai de macro dureté Brinell

Les essais de dureté ont été réalisés sur une machine de dureté universelle DIATESTOR de l'ENMTP présenté dans la figure II.11, nous avons choisis l'essai Brinell, qui est effectué avec un pénétrateur de bille polie en acier trempé de forme à base circulaire. La valeur de la dureté Brinell HB30 est le rapport de la charge  $F$  qui est égale à 187.5 kgf à la surface  $S$  de l'empreinte.



Figure II.11: photo de duromètre Brinell.

### II.4.1.2 Description terminologique

La machine d'essai de macro dureté Brinell comporte les étapes suivantes :

- ❖ Opérations avant l'essai qui permettent d'avoir le sommet de l'empreinte correspondant avec l'axe de la tête optique.
- ❖ Exécution de l'essai qui consiste à appliquer la force sur la pièce d'essai par le pénétrateur.
- ❖ Mesure de diamètre de l'empreinte du pénétrateur, après enlèvement de la force d'essai.

#### a) Opération avant l'essai

Avant d'allumer la machine, nous avons monté le pénétrateur Brinell pour assurer le réglage de la charge d'essai à 187.5 kgf, puis nous allons alimenter la machine pour allumer la lampe. L'échantillon étant en position, nous avons remonté la charge jusqu'à ce que la surface apparaisse clairement dans l'écran.

#### b) Exécution de l'essai

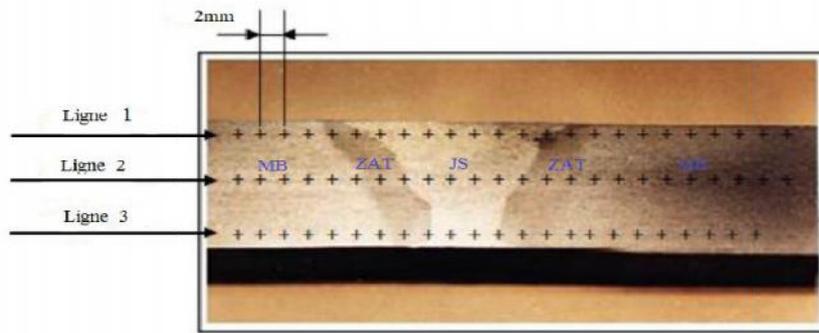
On applique la charge en soulevant le levier et le maintenir pendant 15s, on décharge en ramenant le levier a sa position initiale.

#### c) Mesure de l'empreinte

À la fin, on mesure le diamètre de l'empreinte avec la règle adaptée au grossissement de l'objectif. Cette valeur correspond à une dureté qu'on retrouve à l'aide des tableaux de dureté standardisées et prédéfinies, ces valeurs de dureté recensées dans ces tableaux en fonction de la charge utilisée sont issues de calculs en utilisant la relation suivant :

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2 \times 0.102 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \dots \text{ (II. 1)}$$

Cette opération est répétée plusieurs fois pour examiner l'homogénéité ou pas du joint soudé(JS) et la zone affectée thermiquement(ZAT) au niveau du métal de base(MB) de l'acier S235 et aussi a l'état brut, pour conclure à des résultats satisfaisants, on prend trois positions horizontales sur les deux échantillons, la première ligne on haut, la deuxième ligne au milieu et la troisième ligne en bas avec un pas de 2 mm entre les points.



**Figure II.12:** différentes positions.

#### II.4.2 Essai de résilience

La machine d'essai utilisée à l'ENMTP de Bejaïa est de capacité 300J, l'énergie de rupture en Joule de l'éprouvette testée est lue directement sur le cadran de la machine, c'est un mouton pendule équipé d'un marteau oscillant dans un plan verticale autour d'un axe O. La masse comporte un couteau destiné à rompre l'éprouvette. L'appareil est équipée d'un système qui permet de mesurer l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette. Dans ce système, la masse est abandonnée à elle-même à partir d'une certaine hauteur, l'éprouvette se trouve au point bas. La masse entraine une aiguille qui se déplace devant un cercle ou la mesure de l'angle de remontée avec et sans rupture de barreau, permet le calcul de travail absorbé par cette rupture ; la figure II.13 représente le mouton pendule d'essai de résilience (flexion par choc).



**Figure II.13:** Mouton pendule d'essai de résilience.

Le couteau est écart de la verticale à une hauteur correspondante à une énergie de départ

$$W_0 = m \cdot g \cdot h_0 = 300 \text{ Joule} \quad \dots \text{ (II. 2)}$$

- On libère le pendule, dans sa chute, le couteau rompt l'éprouvette.
- On mesure à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée.

$$W_1 = m \cdot g \cdot h_1 \quad \dots \text{ (II. 3)}$$

- On calcule la différence

$$W_0 - W_1 = m \cdot g \cdot (h_0 - h_1) = W \quad \dots \text{ (II. 4)}$$

Avec:

**m**: masse de pendule ;

**g**: pesanteur terrestre ;

**h<sub>0</sub>** : hauteur initiale du pendule ;

**h<sub>1</sub>** : hauteur après rupture de l'éprouvette.

La résilience s'exprime en Joule (J) ou en Joule par centimètre (cm<sup>2</sup>) si on rapporte à la section sous entaille de l'éprouvette, ce qui permet de définir la résilience (ténacité) du matériau par :

$$K_{cv} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture}}{\text{Surface sous entaille en cm}^2} = \frac{W_0 - W_1}{S} \left( \frac{\text{Joule}}{\text{cm}^2} \right) \quad \dots \text{ (II. 5)}$$

Dans notre cas l'énergie de rupture de l'éprouvette testée est lue directement sur le cardon de l'appareil gradué en Joule.

## II.5 Métallographie

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence de la macrostructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement au Nital. Dans ce qui suit, nous donnons les détails de chaque opération.

### II.5.1 Polissage

Cette opération consiste à rendre la surface plane et brillante, pour cela on utilise une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse), c'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométrie des grains abrasifs en carbure de silicium (du plus gros au plus fin : 180,400,600,800,1000,1200 jusqu'à 4000 ) disparaissent, cela en prenant soin de rayer l'échantillon dans un sens avec abrasif et dans le sens contraire avec le suivant, et on tourne à chaque fois avec un angle de 90° tout long de cette opération en l'aspergeant avec de l'eau pour éviter l'échauffement.



**Figure II.14:** photo d'une Polisseuse.

### II.5.2 Attaque chimique

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures, cette opération donne une différence de couleurs entre les différentes phases, car elle liée directement à la différence de vitesse de réaction des constituants. Le réactif chimique utilisée pour notre acier est le Nital 4% (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol), une fois étalée sur la surface de l'échantillon, un temps de maintien de 5 à 10 seconds est respectée, cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée puis on sèche avec du papier absorbants.

### II.5.3 Examen au microscope optique

L'étude de la structure micrographique appelée métallographie nécessite l'emploi d'un microscope optique, pour cela nous avons fait l'examen au laboratoire des matériaux à l'université HASSNAOUA de Tizi ousou pour la disponibilité d'un microscope optique de marque OPTIKA, équipé d'une camera CCD couplée à un microordinateur munie d'un logiciel de camera CCD.



Figure II.15: Microscope optique piloté par ordinateur utilisé.

### II.5.4 But de la métallographie

La métallographie est la technique consistante à déterminer la structure d'un métal en observant avec un microscope optique. On peut déterminer ainsi, selon les cas :

- La taille et la forme des grains.
- La répartition des phases.
- La direction des lignes de glissement (intersection des plans de glissement avec la surface) dans le cas d'un échantillon déformé.

## II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les matériaux utilisés, ainsi que les différentes techniques expérimentales pour caractériser l'effet du soudage sur les propriétés mécaniques des joints soudés à savoir : la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par soudage à l'arc électrique avec le procédé électrode enrobée EE du type (rutile ; basique).

**Chapitre**

**3**

**Résultats et discussions**

### III. Introduction

Après la réalisation de l'opération de soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée des deux plaques métalliques en acier S235 et la préparation des éprouvettes, nous avons procédé à une série d'essais mécaniques de dureté et de résilience. Nous présenterons dans ce chapitre l'ensemble des résultats obtenus suivi d'une discussion.

#### III.1 Caractérisation métallographique

Les différentes structures métallographiques obtenues dans différentes zones (MB, ZAT et ZF) pour les deux plaques soudées sont représentées ci-dessous. Pour être mieux organisé, nous avons pris la direction transversale dans les échantillons. Pour l'ensemble des microstructures, les images a) sont prises par un grossissement  $G \times 200$  et les images b) sont prises par un grossissement  $G \times 500$ .

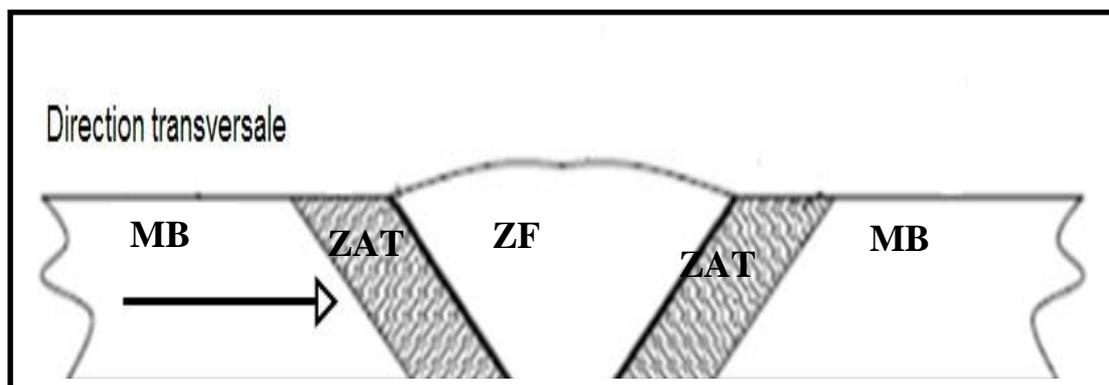


Figure III.1 : Direction transversal

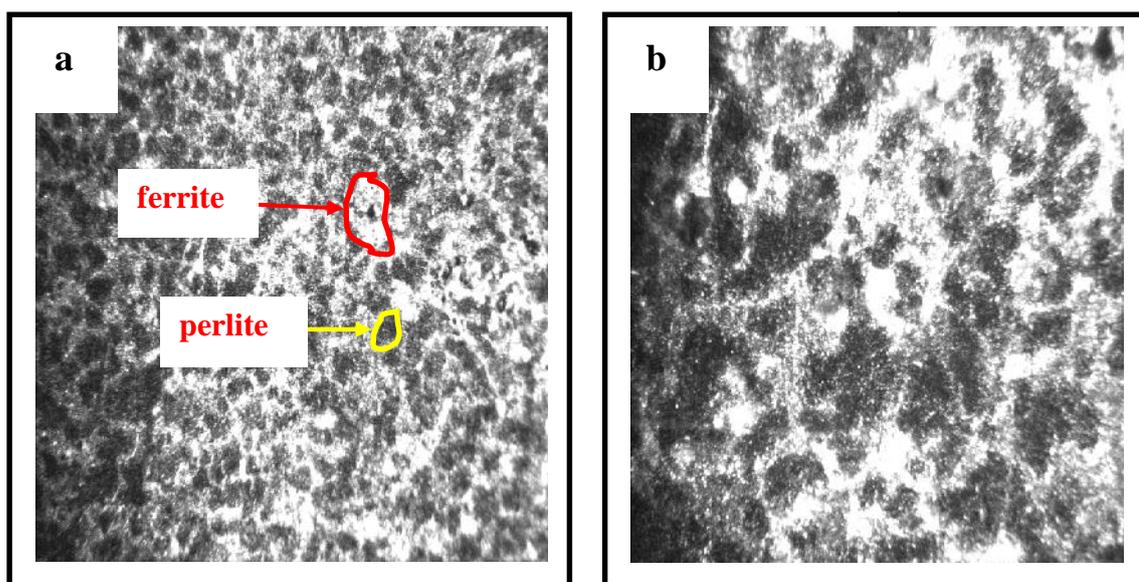


Figure III.2 : Microstructure du MB de la plaque soudée avec EE basique

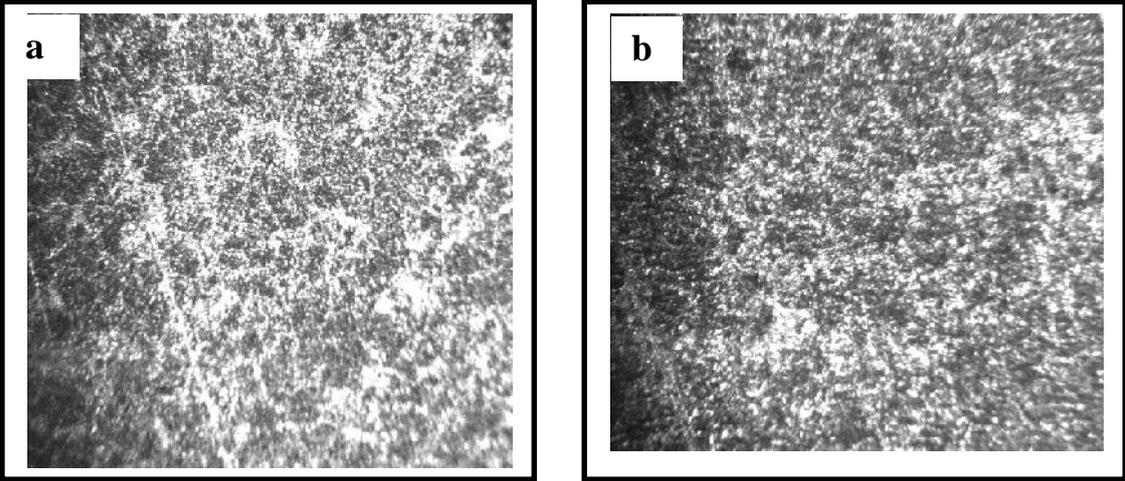


Figure III.3 : Microstructure de la ZAT de la plaque soudée avec EE rutile.

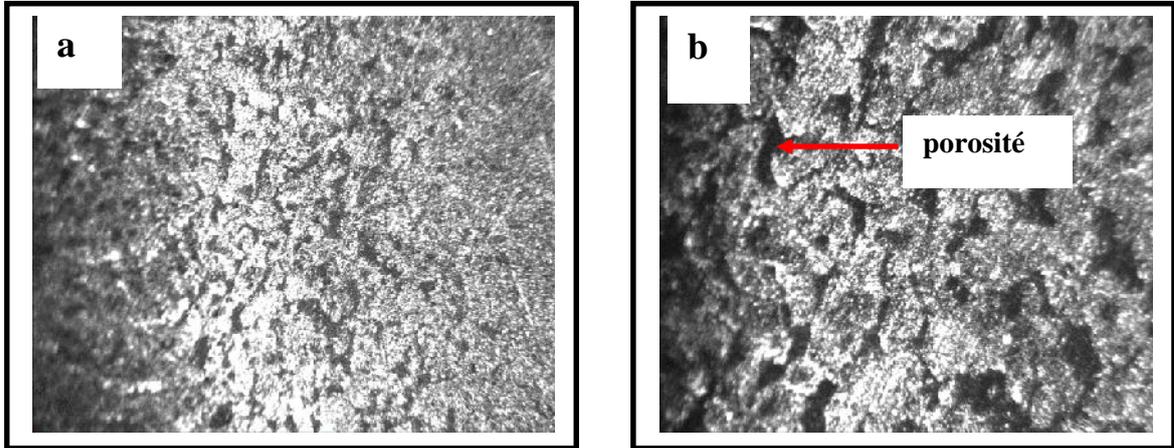


Figure III.4 : Microstructure de la zone fondue soudée avec EE rutile.

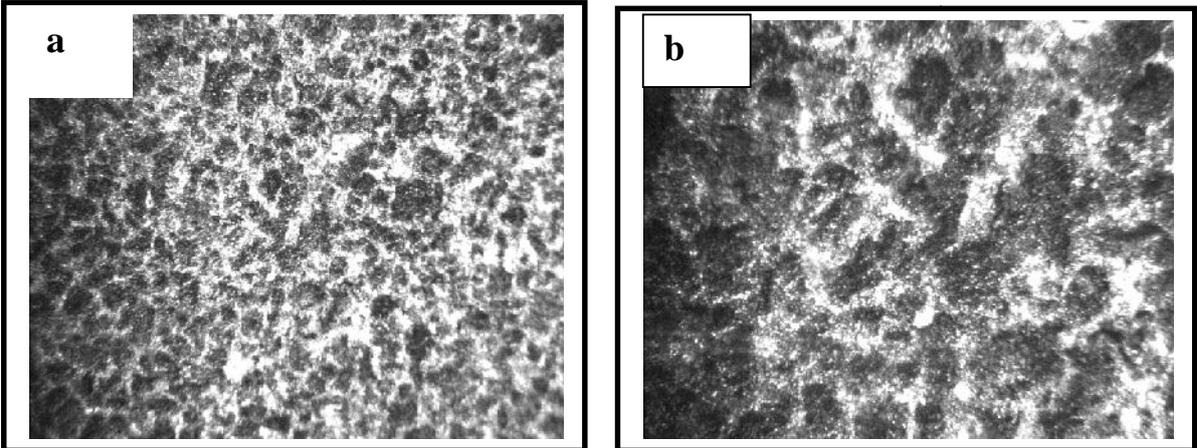
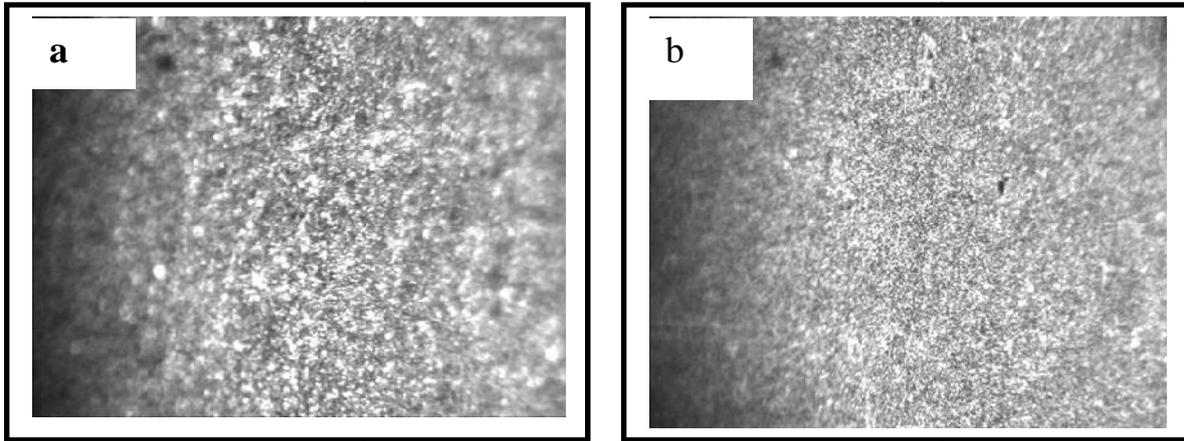


Figure III.5 : Microstructure de la ZAT pour la plaque soudée avec EE basique.



**Figure III.6** : Microstructure de la zone fondue soudée avec EE basique.

Nous constatons que la microstructure du métal de base (S235) est composée de ferrite (blanc) et de perlite (noir) (figure 2). La zone affectée thermiquement dans le cas de la soudure par l'électrode rutile (figure 3) présente une microstructure ferrito-perlitique à grains fins. Cette morphologie de grains fins est due à l'influence de température lors du soudage. En effet, cette zone affectée thermiquement a subi un traitement thermique à partir d'une certaine température suivi d'un refroidissement à l'air.

Par contre, la zone fondue (joint de soudure) est composée d'agrégats de ferrite et de perlite à gros grains avec présence de porosités (figure 4).

Pour la plaque soudée avec l'électrode basique, on remarque que la zone affectée thermiquement présente une microstructure ferrito-perlitique qui ressemble à la microstructure du métal de base et avec une même dimension des grains (figure 2 et 5). Enfin, la figure 6 présente une microstructure d'un joint de soudure avec une électrode basique. La morphologie de cette microstructure est dense à grains très fins sans porosités.

A partir de cette constatation, nous pouvons dire que la soudure avec l'électrode basique présente une meilleure microstructure de point de vue : densité et dimension de grains.

### III.2 Essai de dureté

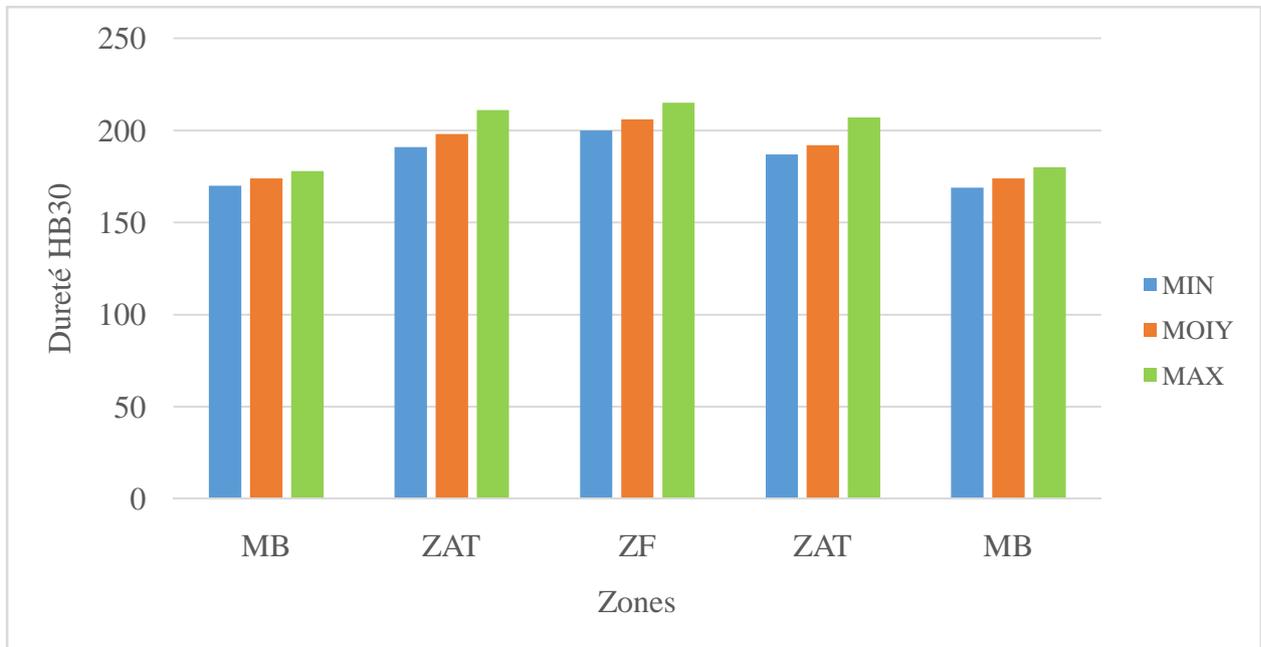
Le tableau ci-dessous représente les valeurs obtenues de la dureté sur les deux plaques soudées de l'acier S235.

**Tableau III.1** : Résultats de la dureté HB30 de la plaque soudée avec l'électrode basique et rutile.

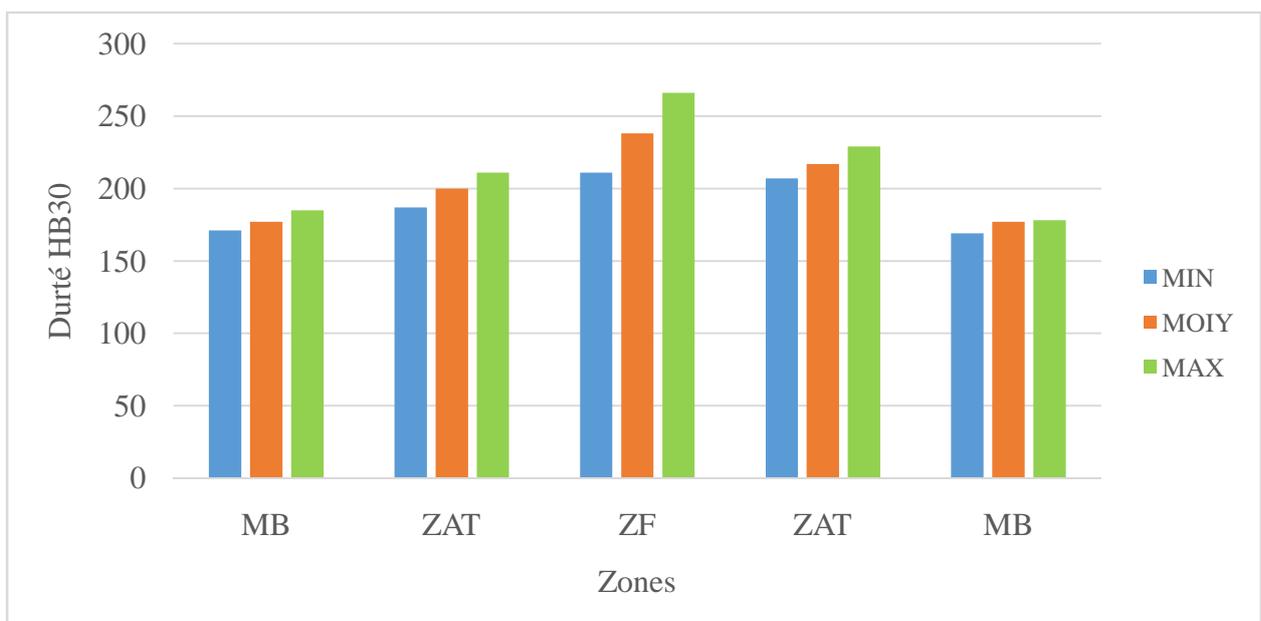
<b>La dureté HB30 de la plaque soudée avec l'électrode basique</b>					
lignes	MB	ZAT	ZF	ZAT	MB
L1	177	191	207	187	175
	175	194	215	191	180
			205		
L2	170	195	202	191	177
	173	202	207	207	170
			203		
L3	170	195	202	191	169
	178	211	215	187	173
			200		
<b>Moy</b>	174	198	206	192	174
<b>La dureté HB30 de la plaque soudée avec l'électrode rutile</b>					
lignes	MB	ZAT	ZF	ZAT	MB
L1	171	211	266	219	178
	175	198	215	211	169
			249		
L2	185	187	211	219	189
	179	211	239	229	173
			234		
L3	183	187	255	207	175
	171	211	239	219	177
			234		
<b>Moy</b>	177	200	238	217	177

- Ces valeurs de dureté, avec les deux électrodes de soudage (basique et rutile), nous donne un profil de variation en fonction des différentes zones (MB, ZAT et ZF).

**Figure III.7:** Histogramme de la dureté HB30 pour la plaque soudée avec EE basique.



**Figure III.8:** Histogramme de la dureté HB30 pour la plaque soudée avec EE rutile.



### III.2.1 Résultats de la dureté

- Les valeurs de la dureté est relativement constantes pour le métal de base sur les différentes lignes avec une moyenne de 174 HB pour la basique et 177 HB pour la rutil.
- Au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT), nous remarquons que la dureté est plus élevée dans le cas de la plaque soudée avec l'électrode rutil de moyenne 217 HB par rapport à celle soudée avec l'électrode basique de moyenne 206 HB. Cela est du probablement à la morphologie de la microstructure de la ZAT pour la plaque soudée à la rutil. Cette morphologie, à grains fins de la ZAT (rutil) (figure 3), présente aussi une densité de grains importante qui donne cette valeur élevée de la dureté.
- Au niveau du joint soudé, nous remarquons aussi que la dureté présente une moyenne de 238 HB pour la plaque soudée avec l'électrode rutil par contre la plaque soudée avec l'électrode basique présente une moyenne de 206 HB. Cette augmentation est du probablement à la microstructure de la ZF (rutil) qui présente une forte porosité, source de concentration de contraintes. De plus l'électrode rutil présente un pourcentage en carbone relativement élevé par rapport à l'électrode basique (0,09%C pour la rutil, 0,05%C pour la basique). Aussi Mn diminué la ductilité par la formation du Carbone de Magnésie (Mnc). La présence de ce dernier fait augmente la dureté, ce résultat est visible dans le tableau dureté (la dureté du joint soudé a l'électrode rutil est supérieure à celle soudé à l'électrode basique). La présence de Mn dans l'électrode rutil (1% Mn) à un autre rôle très important, une fois que le métal d'apport en contact avec le métal de base, le Mn présent dans le métal d'apport fait contre balancer la mauvaise influence des sulfures de fer [20]. En effet le Mn fait piéger les sulfures de fer, qui est nocif aux aciers particulièrement dans les joints soudés. Le Mn aussi favorise le retrait du métal d'apport lors de refroidissement. Cela est visible dans notre résultats des microstructures du joint soudé à l'électrode rutil (figure III.4).
- Cette dureté s'améliore progressivement du métal de base jusqu'à la zone fondue en passant par la ZAT due à l'effet de chaleur qui modifie la structure et la taille des grains.

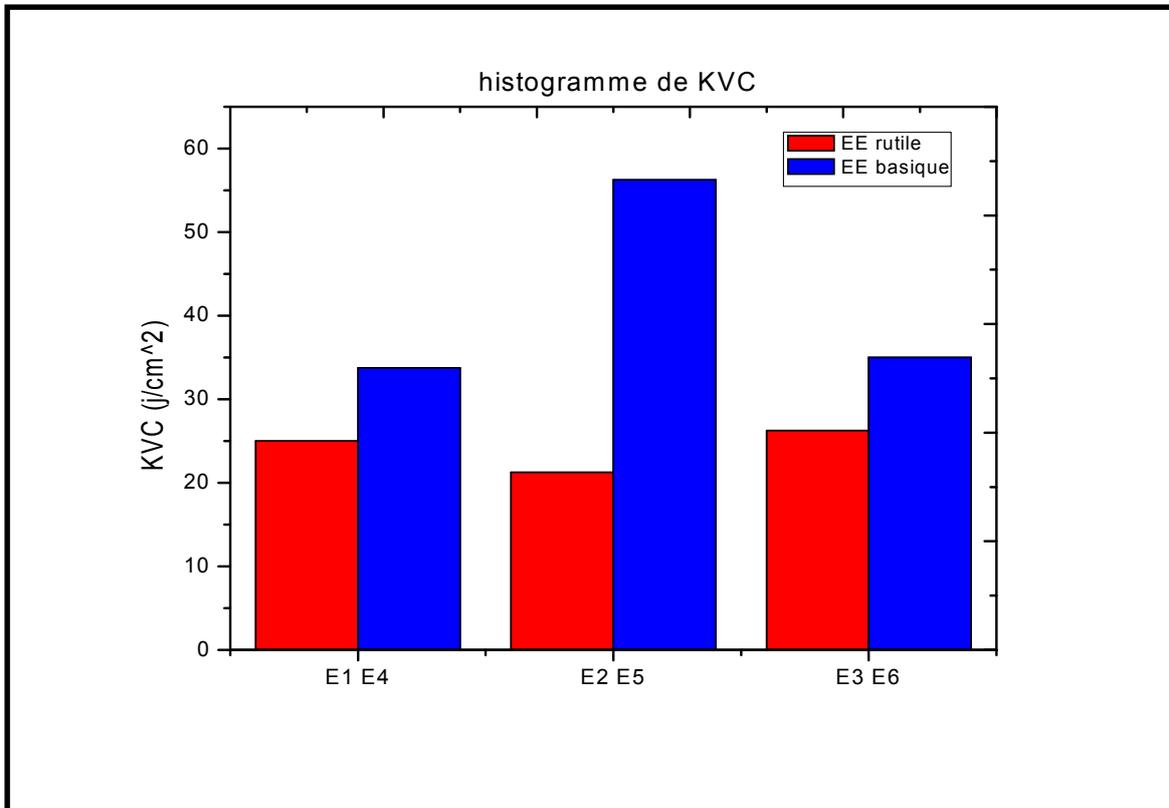
### III.3 Essai de résilience

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de la résilience en KCV ( $J/cm^2$ ) des deux plaques.

**Tableaux III.2** : résultats de l'essai de résilience en ( $J/cm^2$ ) pour les deux plaques soudées et l'acier S235 (brute).

<b>Résilience en KCV (<math>J/cm^2</math>) de la plaque soudée avec l'électrode rutile</b>		
Eprouvette 1	25	
Eprouvette 2	21.25	
Eprouvette 3	26.25	
<b>Moyenne</b>	<b>24.16</b>	
<b>Résilience en KCV (<math>J/cm^2</math>) de la plaque soudée avec l'électrode basique</b>		
Eprouvette 4	33.75	
Eprouvette 5	56.25	
Eprouvette 6	35	
<b>Moyenne</b>	<b>41.66</b>	
<b>Résilience en KCV (<math>J/cm^2</math>) du métal de base (acier S235)</b>		
Essai 1	Essai 2	Essai 3
32	38	35
<b>Moyenne</b>	<b>35</b>	

L'Histogramme représente les valeurs de la résilience enregistrées sur les éprouvettes des deux plaques soudées.



**Figure III.2:** Histogramme des valeurs de la résilience

Les résultats de l'essai de résilience, effectué sur des éprouvettes entaillées en V au milieu du joint soudée à la basique, montrent une moyenne de  $KCV = 41,66 \text{ j/cm}^2$  largement supérieur à celle soudée à la rutile ( $KCV = 24,16 \text{ j/cm}^2$ ). Nous pouvons dire que le joint soudé à la basique demande beaucoup plus d'énergie pour la rupture de l'éprouvette. Cette différence au niveau de la résilience est due probablement à la microstructure à grains très fins du joint de soudure à la basique. Par contre la microstructure du joint de soudure à l'électrode rutile, présente une microstructure à forte porosité qui fragilise la liaison métallique. Sachant que le silicium qui rentre dans la composition chimique de électrodes basique et rutile est de 0,5% et 0,65% respectivement, est un élément qui diminue la résistance à la fissuration du joint de soudure. Nous remarquons que le joint soudé à la rutile présente une résilience faible, cela signifie que cette dernière engendre une dureté élevée par rapport au joint soudé à basique.

**Tableau III.3** montre les éléments caractéristiques du l'électrode basique et rutile.

Métal	C %	Si %	Mn %
EE basique	0.05	0.5	0.7
EE rutile	0.09	0.65	1

### III.4 conclusion

L'aspect métallurgique en générale, caractérise l'opération de soudage qui par son apport thermique modifie les structures métallurgiques et les propriétés locales des pièces assemblées. L'influence de différents facteurs tels que les cycles thermiques de soudage et la composition chimique des pièces à assembler et de métal d'apport, peuvent contribuer aux variations de la structure de la zone soudée du métal (ZF), et par conséquent perdre les propriétés mécaniques demandées.

# Conclusion générale

### Conclusion générale

Notre modeste travail a porté sur l'influence du métal d'apport de soudage sur les caractéristiques mécaniques de dureté et de résilience d'une plaque soudée à l'arc électrique d'une électrode enrobée (EE). Ces résultats sont appuyés par des microstructures métallographiques des différentes zones de la plaque soudée.

Le joint de soudure est testé par rapport à son comportement aux chocs à travers l'essai de résilience dont la caractéristique mécanique (ténacité) est une propriété de ductilité. Les essais de dureté ont pour but de mettre en évidence l'intensité sur l'homogénéité de la microstructure dans le métal de base, la zone affectée thermiquement et le joint de soudure (zone fondue).

- En effet, la microstructure métallographique du métal de base présente une structure ferrito-perlitique. Par contre celle de la ZAT (rutil) est une microstructure ferrito-perlitique à grains fins qui est différentes de la ZAT soudée à la basique. Cette dernière présente une microstructure qui ressemble à celle du métal de base. La morphologie de la microstructure de joint soudé à l'électrode basique est dense à grains très fins sans porosités par contre le joint de soudure à l'électrode rutil est composé d'agrégats de ferrite et de perlite à gros grains avec présence de porosités.
- La dureté de la zone fondue de la plaque soudée avec EE rutil est de (238HB) qui est supérieure à celle de la zone fondue soudée avec EE basique (206HB).
- Les tests de résilience montrent que le joint soudé avec EE basique qui est de la moyenne de (41.66 J/cm<sup>2</sup>) est supérieur à celui soudé avec EE rutil qui est de la moyenne de (24.16 J/cm<sup>2</sup>). L'énergie nécessaire à la rupture de la plaque soudée avec EE basique est supérieure à celle soudée avec EE rutil. De ce fait la plaque soudée avec l'électrode rutil présente un comportement fragile à la rupture.

D'une manière générale on peut conclure que le joint de soudure à l'électrode basique par le procédé EE est plus résistant que le joint soudé avec l'électrode rutil.

## Références bibliographiques

- [1] L.Reynard ; thèse doctorat de l'école central de Lyon ; 2006.
- [2] P. Ferton ; thèse doctorat de l'université Paul Sabatier ; Toulouse III ; 2002.
- [3] F. LAGO ; thèse doctorat de l'université Paul Sabatier ; Toulouse III ; Mars 2004.
- [4] Bachir Mezrag, Etude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMTHAL Id.
- [5] K. Ramachandran ; 3D modelling of plasma-particle interactions in a plasma jet Under dense loading conditions ; J. Phys. D : Appl. Phys. 435 ; 2003, pp298-306.
- [6] (www.rocdacier.com) Soudage à l'arc avec électrode enrobée - Chapitre 4.
- [7] Dan Erlandsson. Les fondamentaux du procédé MIG/MAG, Soudage -MIG/MAG. ESAB AB Welding Equipment AB, Laxå, Sweden 2007.
- [8] R. BLONDEAU, Procédés et applications industrielles du soudage, Hermès Science publication, (2001)
- [11] Bernard Barthélémy. "Notions pratiques de mécanique de la rupture", Eyrolles 1980.
- [13] Paul Parnière, Métallographie par les méthodes de diffraction, Techniques de l'Ingénieur, Traité Matériaux métalliques, M100-1,2006.
- [14] R. Varisellaz. "Soudage : éléments de conception de réalisation. Dunod" 1987.
- [15] S. Laroze, "Résistance des matériaux et structures", Tome 3.Eyrolles, Masson 1982.
- [16] Jean-Michel Jorion, "livre-la-soudure-a-l-arc-pas-a-pas ", éditions S.A.E.P 2000.
- [18] Le soudage (tec 340 office de publication universitaire).université de Constantine, institut de génie mécanique.
- [19] Bruce ANGLADE – Hélène HORSIN MOLINARO Sylvain LAVERNHE, "les principaux défauts et risques liés au soudage" Edité le 10/03/2017
- [20][http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/métallurgie/trait\\_thermic/influence\\_elements\\_d.htm](http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/métallurgie/trait_thermic/influence_elements_d.htm)
-

## **RESUME**

Notre travail a porté sur l'assemblage par soudage à l'arc électrique avec de deux plaques métalliques en acier S235. Nous sommes intéressés à l'influence de métal d'apport sur certaines propriétés mécaniques tel que la dureté et la résilience. Les résultats de dureté montrent que la plaque soudée avec électrode enrobée (basique) présente une valeur moyenne de la dureté de 206 HB pour le joint soudé, d'autre part le joint soudé par l'électrode rutil présente une valeur moyenne de la dureté de 238 HB.

Pour les résultats de la résilience, la plaque soudée avec électrode enrobée (basique) présente une énergie de rupture largement plus élevée par rapport à la plaque soudée avec électrode enrobée rutil (41.66 J/cm<sup>2</sup> et 24.16 J/cm<sup>2</sup> respectivement).

La structure ferrito-perlitique homogène. Caractérise l'acier S235.

La ZAT présente une microstructure ferrito-perlitique à grains fins dans le cas de la soudure par l'électrode rutil et présente une microstructure ferrito-perlitique qui ressemble à celle du métal de base et avec une même dimension des grains.

La ZF (joint de soudure) est composée d'agrégats de ferrite et de perlite à gros grains avec présence de porosités dans le cas de soudure par l'électrode rutil. Aussi sa microstructure est dense à grains très fins sans porosités avec soudure par l'électrode basique.