

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Mécanique

**Spécialité** : Assemblage soudé et matériaux

**Par** : MEZOUAR Ayoub

### **Sujet**

**Analyse de l'influence de la forme du cordon sur le comportement mécanique des pièces soudées**

Soutenu publiquement, le 28 / 06 /2022, devant le jury composé de :

Mr. MANGOUCI Ahmed	MAA	Université de Tlemcen	Président
Mr. HADJOUI Fethi	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. GUEZZEN Samir	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. BENS Aid Ismail	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

# ***REMERCIEMENTS***

*Tout d'abord, je remercie le bon Dieu de m'avoir donné le courage,*

*La foi et la sagesse d'accomplir ce modeste travail.*

*Mes sincères remerciements vont à mon encadreur Mr.*

*GUEZZEN SAMIR avec ses connaissances qui m'ont été utile dans ma recherche. Et aussi un grande remerciement à Mr. BENSAID ISMAIL.*

*Je gratifie les membres du jury Mr. MENGOUCHI AHMED à qui l'honneur de présider le jury de ma soutenance, ainsi Mr. HADJOUI FETHI d'avoir accepté d'examiner mon travail. Je tiens également à remercier aussi tous mes enseignants, et toute l'administration de département de génie mécanique, ainsi que toutes les personnes qui m'ont aidé durant la période de mon cursus.*

*En fin, un grand merci à tous mes collègues de formation pour leurs encouragements, leur soutien et à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce travail de près ou de loin.*

## **Résumé :**

L'assemblage par soudage occupe une place très importante dans l'industrie de construction mécanique. Le type de joints de soudeur induit inévitablement à des modifications des propriétés microstructurales et mécaniques.

Ce travail présente une analyse comparative des différents types de joint de soudure (bord droit, X, V, O, U) appliquée sur un type de métal de base (acier S235) dont le but est de déterminer l'influence de la forme du cordon sur le comportement mécanique des structures soudées en faisant varier des paramètres tel que l'épaisseur et le type de soudage.

**Mots clé :** soudage à l'arc électrique, cordon de soudure TIG, E.E, essai de traction.

## Abstract :

The assembly of steel sheets by welding occupies a very important place in the mechanical engineering industry. The type of welder joints inevitably leads to changes in micro structural and mechanical properties.

This work presents a comparative study of the different types of welder joints (straight edge, X, V, O, U) by hand applied to a type of base metal (S235 steel) with different splice (8 mm and 5 mm), welded by two different types of welding (E.E, TIG), and identify the characteristics of these welds, in particular to study the mechanical behavior of weld joints such as traction.

**Keywords:** S235JR, TIG electric arc welding, E.E, mechanical characteristics.

## ملخص :

يحتل تجميع ألواح الصلب باللحام مكاناً مهماً للغاية في صناعة الهندسة الميكانيكية. نوع مفاصل اللحام يؤدي حتماً إلى تغييرات في الخواص البنيوية والميكانيكية.

يقدم هذا العمل دراسة مقارنة لأنواع مختلفة من وصلات اللحام (حافة مستقيمة ، X ، V ، O ، U) مطبقة يدوياً على نوع من المعدن الأساسي (فولاذ S235) مع لصق مختلف (8 مم و 5 مم) ، ملحومة بواسطة نوعين مختلفين من اللحام (E.E ، TIG) ، وتحديد خصائص هذه اللحامات ، خاصة لدراسة السلوك الميكانيكي لمفاصل اللحام مثل الجر.

**الكلمات المفتاحية:** S235JR ، لحام القوس الكهربائي TIG ، الخصائص الميكانيكية

## Liste des tableaux

<b>Tableau (I.01) :</b> influence du C <sub>eq</sub> sur l'indice de soudabilité.....	14
<b>Tableau (I.02):</b> Rendements effectifs thermiques des procédés $\eta$ .....	16
<b>Tableau (III.01) :</b> Composition chimique de l'acier S235JR.....	40
<b>Tableau (III.02) :</b> caractéristiques mécaniques de l'acier S235JR.....	40
<b>Tableau (III.03) :</b> composition chimique de matériaux d'apport.....	41
<b>Tableau (III.04) :</b> paramètres de soudage.....	48
<b>Tableau (IV.01) :</b> résultat d'essai de validation.....	55
<b>Tableau (IV.02) :</b> Les paramètres de soudage des éprouvettes de caractérisation.....	56
<b>Tableau (IV.03):</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents épaisseurs.....	57
<b>Tableau (IV.04) :</b> Résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par TIG pour différents épaisseurs.....	58
<b>Tableau (IV.05) :</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes d'épaisseur 5mm soudées par TIG et EE.....	60
<b>Tableau (IV.06) :</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes d'épaisseur 8mm avec différents procédés de soudage.....	62
<b>Tableau (IV.07) :</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par TIG et E.E, pour différentes épaisseurs.....	64
<b>Tableau (IV.08) :</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents type de joint (B.d),X,V .....	66
<b>Tableau (IV.09) :</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joint (B.d,O,U).....	67
<b>Tableau (IV.10) :</b> résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées pour différents types de joints (B.d,O,U,V,X).....	69

## Liste des figures

Figure (I.01) : les zones de la soudure.....	03
Figure (I.02) : Organigramme des procédés de soudage les plus répondus. ....	05
Figure (I.03) : Principe de soudage par pression.....	06
Figure (I.04) : Principe de soudage TIG.....	08
Figure (I.05) : Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique.....	10
Figure (I.06) : électrode enrobée.....	10
Figure (I.07) : courbe de coefficient de soudabilité S en fonction du % de carbone.....	13
Figure (I.08) : -cycle thermique : courbe (température – temps $T=f(t)$ ). ....	19
Figure (I.09) : Répartition thermique : courbe (température – distance). ....	20
Figure (I.10) : Cycle thermique du soudage multi passe.....	21
Figure (II.01): les différents joints de soudure.....	27
Figure (II.02) : Types de configuration de joint bout à bout.....	28
Figure (II.03) : Types de joints d'angle.....	29
Figure (II.04) : différents types de configurations de joint en T sont illustrés.....	30
Figure (II.05) : Exemple de joint à recouvrement.....	30
Figure (II.06) : Exemple de joint de bord.....	31
Figure (II.07) : Exemple de joint cruciforme.....	32
Figure (II.08) : Exemple de joint conique évasé.....	32
Figure (II.09) : Formation d'une piscine de la soudure.....	34
Figure (II.10) : Solidification de métal de la soudure.....	35
Figure (II.11) : Fusion progressive et solidification.....	35
Figure (II.12) : Soudure par arc.....	39
Figure (II.13) : méthode de protection.....	37
Figure (II.14) : Positions de soudage.....	39
Figure (III.01) : métal d'apport utilisé (ER70S-3), (E6010).....	41
Figure (III.02) : machine de découpage.....	42
Figure (III.03) : Chanfreinée sur bords droits.....	43
Figure (III.04) : Chanfreinée en V.....	44
Figure (III.05) : Chanfreinée en X.....	45
Figure (III.06) : Chanfreinée en O.....	46
Figure (III.07) : Chanfreinée en U.....	47
Figure (III.08) : soudage par TIG.....	48
Figure (III.09) : des pièces souder par électrode enrobée.....	49
Figure (III.10) : des pièces soudées par TIG.....	50
Figure (III.11) : Machine de traction utilisée.....	51
Figure (III.12): Courbe de traction.....	52
Figure (III.13) : ordinateur pilote de la machine.....	53
Figure (III.14) : logiciel utilisé.....	53
Figure (III.15) : l'éprouvette placée dans la machine.....	54
Figure (IV.01) : courbe de résultat d'essai de validation.....	56
Figure (IV.02) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E (Epaisseur : 5mm et 8mm).....	57
Figure (IV.03): éprouvettes (5mm et 8mm) soudées par E.E après traction.....	58
Figure (IV.04) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par TIG pour différents épaisseurs.....	59
Figure (IV.05): Eprouvettes 5mm et 8mm soudées par TIG après traction.....	60
Figure (IV.06) : courbe de traction d'éprouvettes d'épaisseur 5mm avec changement de procéder de soudage.....	61
Figure (IV.07): éprouvettes 5mm soudées par déférente procédé après traction.....	62

Figure (IV.08) : courbe de traction d'éprouvettes d'épaisseur 8mm pour différents procédés de soudage.....	63
Figure (IV.09): éprouvettes 8mm soudées par déférente procédé après traction.....	64
Figure (IV.10) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par TIG et E.E, pour différentes épaisseurs.....	65
Figure (IV.11): éprouvettes 8mm et 5mm soudé par déférente procédé après traction.....	66
Figure (IV.12) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joint (B.d,X,V).....	67
Figure (IV.13) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joints (B.d,O,U).....	68
Figure (IV.14) : Courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joints (B.d,O,U,V,X).....	69
Figure (IV.15): éprouvettes 8mm soudées par E.E avec déférente type de joint après traction.....	70

## **Liste des abréviations**

ZF : Zone fondue.

ZAT : Zone affecté thermiquement.

MB : Métal de base.

ZL : Zone de liaison.

$\sigma_{\max}$  : Contrainte maximale.

$\sigma_{\min}$  : Contrainte minimale.

SMAW : Procédé de soudage a l'arc électrique.

$\gamma$  : Phase austénitique.

$\alpha$  : Phase ferritique.

$\varepsilon$  : Phase martensitique.

E : Module d' Young du matériau.

Rm : contrainte maximale a la rupture.

Re : contrainte élastique.

HSLA : Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique.

TIG : soudage tungstène Inert Gas.

I : intensité de soudage en ampères (A).

U : tension de soudage en volts (V).

v : vitesse d'avance de l'arc électrique(mm/s).

F : force en newton (N).



Re : limite d'élasticité en (MPa).

ReL : limite d'élasticité inférieure en (MPa).E :

Module de Young du matériau.

Re : contrainte élastique.

N1 : essai réalisé par E.E.

N2 : essai réalisé par TIG.

B.d : type de joint bord droit.

N3 : essai de confirmation d'essai de traction

# TABLE DE MATIERE

**REMERCIEMENTS**

**RESUME**

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**TABLE DE MATIERES**

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur le soudage .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Définition de soudage.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3. procédés de soudage.....</b>	<b>4</b>
I.3.1. Soudage par pression .....	6
I.3.2 Soudage par fusion.....	6
<b>I.4. Soudabilité .....</b>	<b>11</b>
I.4.1. Définition .....	11
I.4.2. Soudabilité des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés .....	12
I.4.3. Carbone équivalent C <sub>eq</sub> d'après l'IIS.....	12
I.4.4. Coefficient de soudabilité (S) .....	13
I.4.5. Influence des éléments d'additions.....	14
I.4.6. Soudabilité des aciers inoxydables .....	15
<b>I.5. Paramètres de soudage.....</b>	<b>16</b>
I.5.1. Energie de soudage (E) .....	16
I.5.2. Relation entre énergie dissipée et énergie équivalente .....	16
I.5.3. Choix des paramètres.....	17
<b>I.6. Cycle thermique de soudage .....</b>	<b>18</b>
<b>I.7. Répartition thermique.....</b>	<b>19</b>
<b>I.8. Les Aciers.....</b>	<b>22</b>
<b>I.9. Aciers HSLA.....</b>	<b>23</b>
<b>I.10. Défauts de soudures .....</b>	<b>24</b>
I.10.1 Fissurations .....	24
I.10.2. Soufflures.....	26
I.10.3. Retassures et criques de solidification .....	26
I.10.4. Morsures et caniveaux .....	26
<b>Chapitre II : Conception des joints soudure.....</b>	<b>27</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2. Différents types de joints de soudure .....</b>	<b>27</b>

II.2.1 Joint bout à bout .....	28
II.2.2. Joint d'angle .....	28
II.2.3. Joint en T .....	29
II.2.4. Joint à recouvrement .....	30
II.2.5. Joint de bord .....	30
II.2.6. Joint cruciforme .....	31
II.2.7. Joint conique évasé .....	32
<b>II.3. Préparation des joints .....</b>	<b>32</b>
<b>II.4. Méthodes de réalisation d'un joint soudé .....</b>	<b>33</b>
<b>II.5. Positions de soudage.....</b>	<b>38</b>
<b>Chapitre III : Partie expérimentale .....</b>	<b>40</b>
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>40</b>
<b>III.2. Matériaux utilisés.....</b>	<b>40</b>
III.2.1. Métal de base.....	40
III.2.2. Métaux d'apport .....	40
<b>III.3.Préparation des tôles .....</b>	<b>41</b>
III.3.1. Découpage des éprouvettes .....	41
III.3.2. Chanfreinée des éprouvettes.....	42
<b>III.4. Paramètres de soudage.....</b>	<b>47</b>
<b>III.5. Exécution des joints soudés.....</b>	<b>49</b>
<b>III.6. Essai de traction .....</b>	<b>50</b>
<b>III.7. Exécution de l'essai.....</b>	<b>52</b>
<b>III.8. Conclusion .....</b>	<b>54</b>
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions .....</b>	<b>55</b>
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.2. Caractérisation des soudures.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.3. Résultats d'essais de traction .....</b>	<b>56</b>
IV.3.1 L'effet de changement de l'épaisseur d'éprouvettes.....	56
IV.3.2 Effet de changement de procédé de soudage .....	60
IV.3.3. Comparaison entre différent procédé de soudage TIG et E.E avec changement de l'épaisseur .....	64
IV.3.4. L'effet de changement de type de joint.....	66
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>71</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>73</b>

# Introduction générale

L'assemblage par soudage est l'un des procédés les plus utilisés dans le monde de l'industrie. Son développement est passé par plusieurs étapes jusqu'aux nouveaux procédés qui sont le MIG, MAG, soudage par faisceau laser...etc.

Les pièces assemblées sont soumises à des sollicitations tel que la traction, le cisaillement ...etc.

Les caractéristiques mécaniques des structures soudées peuvent avoir des changements sous l'influence de différents types de cordon, et aussi le type de soudage.

Le but de notre travail est une étude sur l'influence de types de cordon sur les caractéristiques mécanique des structures soudées.

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée de quatre chapitres :

- Le premier chapitre, nous avons abordé des généralités sur les procédés de soudages les plus utilisés dans le domaine industriel.
- Le deuxième chapitre, une présentation des différents types de joints de soudure.
- Le troisième chapitre est consacré à la partie expérimentale.
- Le quatrième chapitre, regroupe les différents résultats et discussion.

Nous avons clôturés par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur le soudage**

### **I.1. Introduction:**

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique.

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires [1].

Le soudage est né à la fin du 19ème siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique oxyacétylénique, puis avec celles du soudage à l'arc et du soudage par résistance.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au chalumeau oxyacétylénique, qui a rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout en USA et en Angleterre). L'introduction massive de soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile.

Parmi les nouveaux procédés on peut citer :

- le soudage avec électrode de tungstène : 1924 – USA.
- le soudage sous flux : 1935 – USA.
- le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.
- le soudage sous la protection gazeuse : 1950 – 1960.
- le soudage avec fils fourrés : 1950 – 1960.
- le soudage par explosion : 1950-1960.
- le soudage par bombardement électronique : 1956 – France.
- le soudage par laser : 1965 [2].

## I.2. Définition de soudage :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, par intervention de pression, ou par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base [3].

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones voir la (Figure I.01).

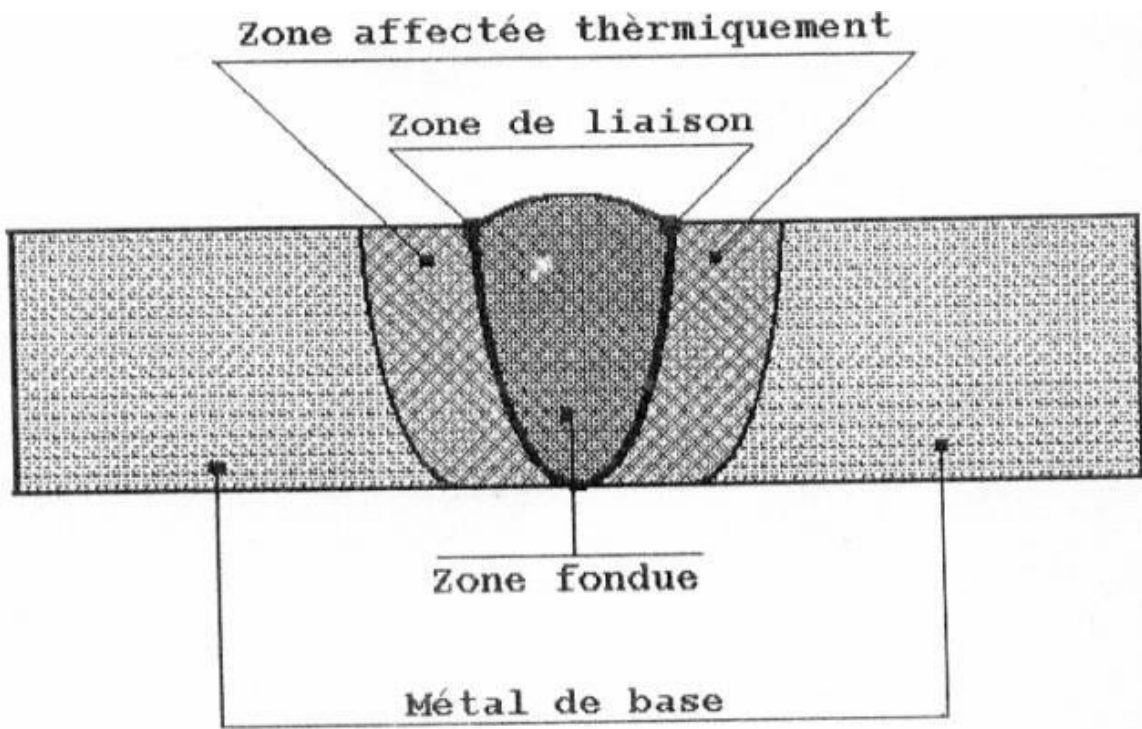


Figure (I.01) : Les zones de la soudure

➤ **Métal de base (MB) :**

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

➤ **Zone affectée thermiquement (ZAT) :**

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

➤ **Zone de liaison (ZL) :**

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

➤ **Zone fondue (ZF) :**

Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification. [4]

**I.3. Procédés de soudage :**

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre.
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur).
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser [4].



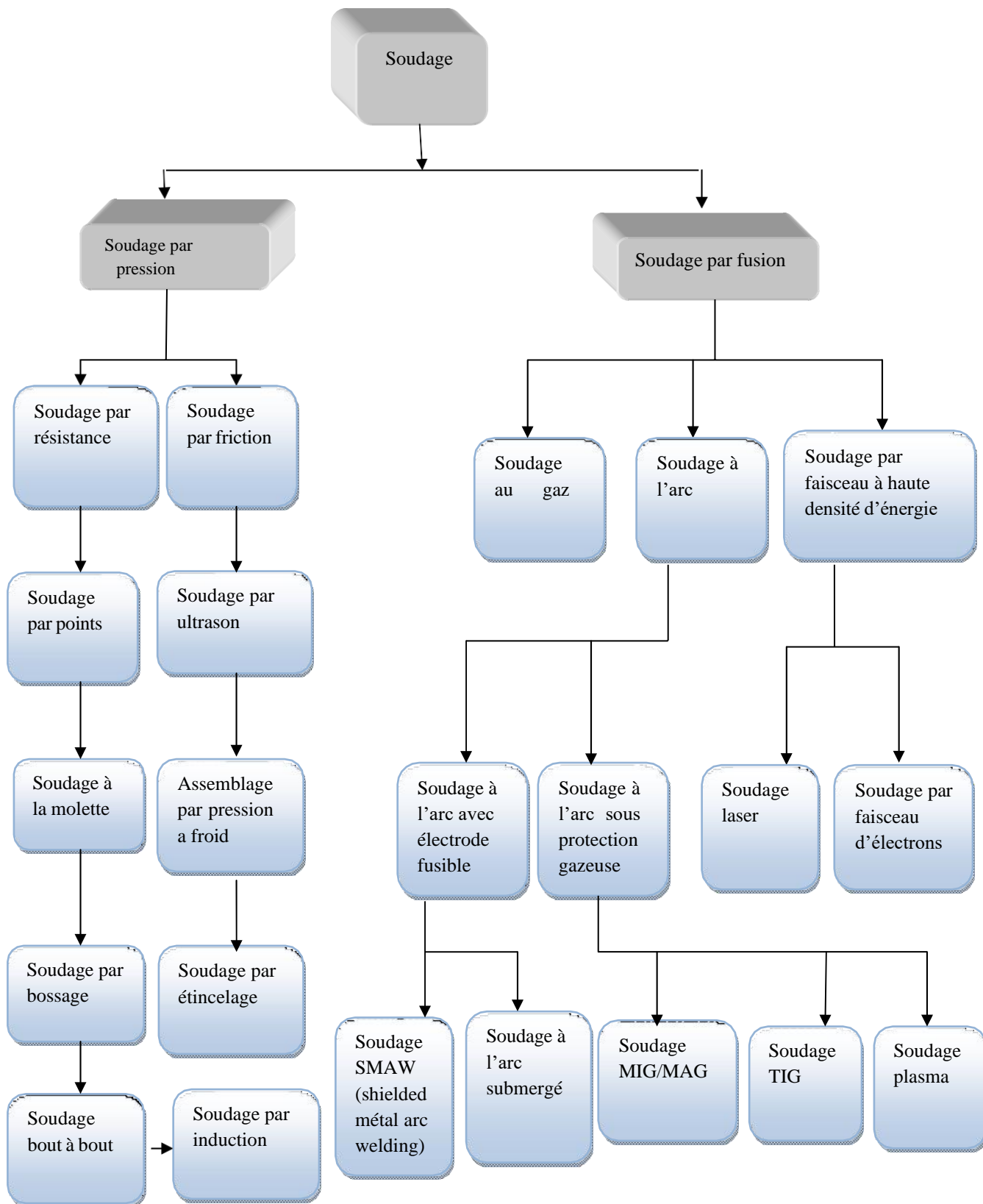


Figure (I.02) : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus [4].

- D'une manière très globale on classe les procédés de soudage des aciers sous deux importantes catégories :

### I.3.1 Soudage par pression :

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ( $I > 2000 \text{ A}$ ) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression «forge» la soudure.

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, nous allons voir le plus caractéristiques : le soudage par points. Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder.

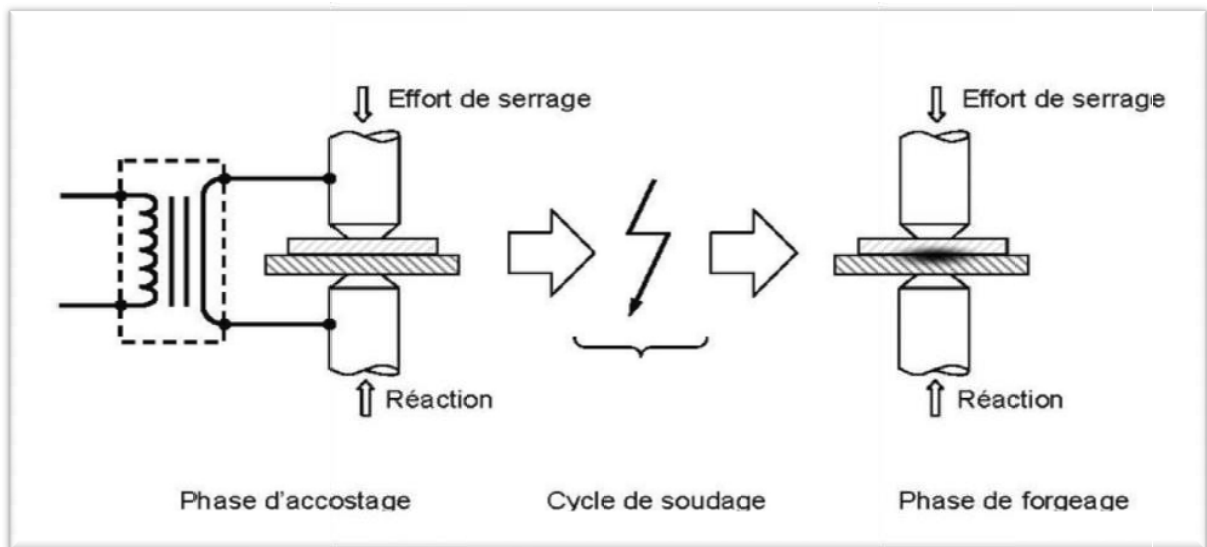


Figure (I.03) : Principe de soudage par pression [5].

### I.3.2 Soudage par fusion :

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie électriques ou chimique...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Soudage à l'arc électrique.
- Soudage à l'arc sous gaz de protection.
- Soudage par jet de plasma.
- Soudage sous flux [6].

**A. Soudage à l'arc électrique :**

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisée par une densité de courant élevée et par une faible différence de potentiel.

Par une décharge électrique on entend le passage du courant électrique à travers un milieu gazeux. Il y a plusieurs formes ou types de décharges électrique : en arc, à lueur, par étincelles, décharge orageuse (éclair) et autre elles par leurs durée, tension, intensité de courant et autres paramètres [7].

**B. Soudage à l'arc électrique sous gaz de protection (TIG) :**

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis. Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure.

Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu. La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

La soudure se fait sous protection de gaz inerte (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif)

**❖ Différents types de gaz utilisés :**

- Argon pour l'acier
- Argon- Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium
- Argon- Hélium- Oxygène [7].

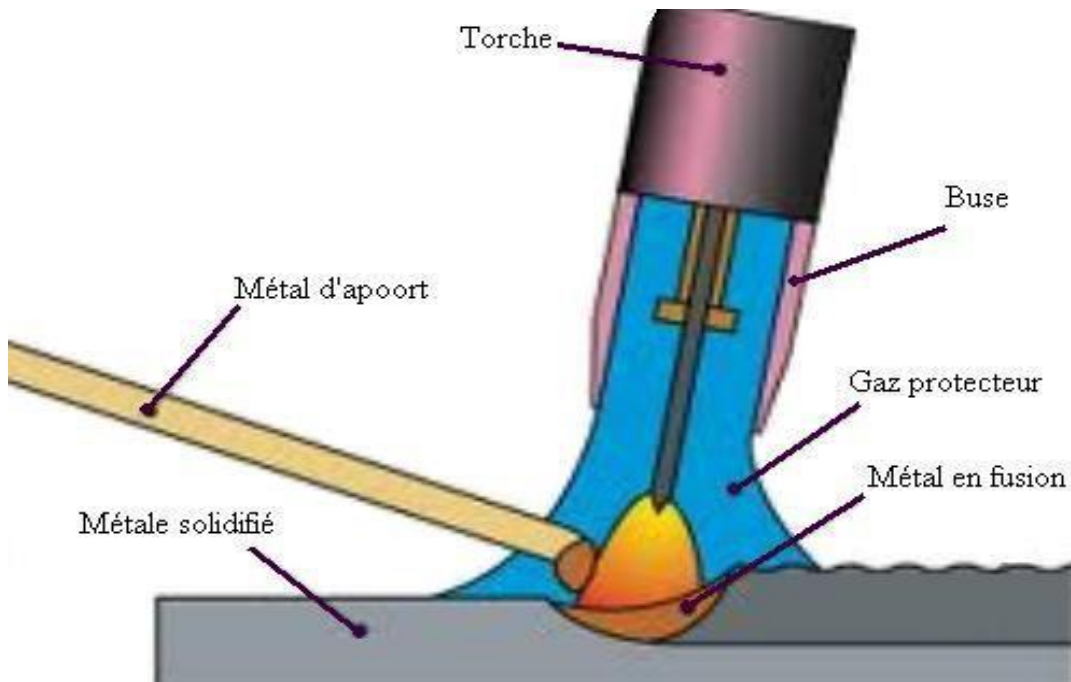


Figure (I.04) : Principe de soudage TIG.

### C. Soudage sous protection gazeuse MIG ou MAG :

L'arc est protégé entre un fil consommable et les bords de la pièce à souder. Le fil en fusion et le bain de soudure est protégé de l'oxydation de l'air par un flux de gaz inerte (le procédé se dénomme alors M.I.G = métal inerte gaz) ou actif (procédé M.A.G = métal active gaz). Le déroulement du fil à vitesse constant permet d'alimenter en métal d'apport le bain de fusion. Ces différentes fonctions de protection et d'amenée de métal sont remplies par une installation qui comprend :

- le générateur de courant continu.
- une source de gaz protecteur.
- un système de refroidissement de torche.
- la torche ou pistolet [8].

#### ❖ Gaz de protection :

On distingue les gaz inertes et les gaz actifs.

- Les gaz inertes à base d'argon, pour ou mélange à l'oxygène, ou d'hélium sont surtout utilisés pour les métaux légers et les aciers inoxydables ;
- Les gaz actifs servent au soudage des aciers au carbone ou faiblement alliés (aciers à tube). Le gaz carbonique, parfois mélangé à l'oxygène, est le gaz actif le plus fréquemment utilisé. Il permet d'obtenir une pénétration plus importante et augmente la concavité du cordon [8].

**D. Soudage avec les électrodes enrobées :**

Le soudage à l'arc électrique est le plus répandu comme procédé d'assemblage des pièces métalliques. Une fusion rapide localisée fait que les déformations des pièces soudées à l'arc sont peu importantes. Cette localisation de la chaleur implique une grande rapidité de soudage et un rendement important, avantages indéniables de ce procédé, même sur des tôles de faible épaisseur. Cette rapidité de soudage est encore accentuée par l'emploi d'électrode à haut rendement [9].

**❖ Grâce à la simplicité de son principe, le soudage manuel présente les avantages suivants :**

- Possibilité de soudage d'un large éventail de matériaux sous réserve de trouver l'électrode correspondante,
- Le soudage manuel permet l'assemblage :
  - Des aciers faiblement et fortement alliés.
  - Des fontes.
  - Des alliages de nickel.
  - Des alliages de cuivre.
  - Et éventuellement des alliages d'aluminium.
- Possibilité de souder également une large gamme d'épaisseur (quelques mm à plusieurs centimètres).
- Possibilité de s'adapter à des travaux très divers-artisanat-construction de hautes caractéristiques (appareil à pression par exemple-rechargement).

**❖ Par contre ce type de soudage présente les inconvénients suivants :**

- Productivité réduite (nécessité de changer l'électrode, taux de dépôt faible).
- Nécessité d'une main d'œuvre qualifiée.

Le schéma de principe du soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée est présenté sur la figure I.05.

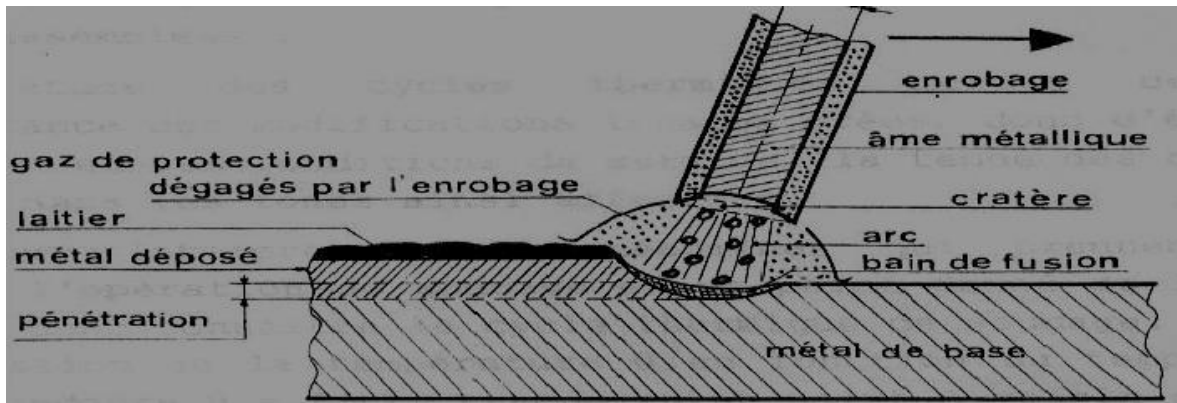


Figure (I.05). Schéma de principe du Soudage à l'arc électrique.

- **Source d'énergie** : Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, produit un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et les deux pièces à assembler [10].
- **Métal d'apport** : Le métal d'apport se présente sous forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage.
- **Les électrodes** : Les électrodes de soudages sont constituées par :

Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant est dont fusion forme le métal déposé.

Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :

- Stabilité électrique de l'arc ;
- Protection du métal en fusion ;
- Apport d'éléments dans le métal déposé [10].

Parmi Les enrobages les plus utilisés on a :

- L'enrobage cellulosique ;
- L'enrobage basique ;
- L'enrobage rutile.

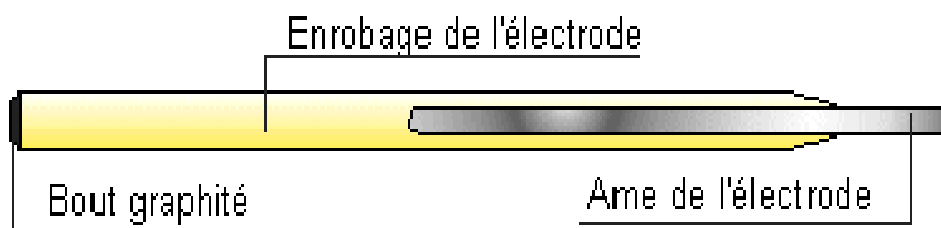


Figure (I.06) : 'électrode enrobée.

➤ **Les paramètres de soudage par l'électrode :**

- Nature et épaisseur des pièces métalliques à souder.
- L'environnement dans lequel sera réalisée la soudure (en atelier ou sur un chantier en extérieur).
- Le savoir-faire de l'opérateur.
- L'intensité du courant de soudage, laquelle a une incidence directe sur la vitesse de fusion du métal.
- L'ampérage de courant de soudage maximum que peut délivrer un générateur joue donc un rôle déterminant dans l'épaisseur de métal qui pourra être soudée.
- Le diamètre de l'électrode.
- La position de soudage.
- La nature de l'âme de l'électrode.

#### **I.4. Soudabilité :**

##### **I.4.1. Définition [11] :**

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné, par un procédé donné pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondantes à ce degré, à la réalisation d'une construction assurant la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont les propriétés requises et choisies comme bas de jugement. On distingue :

##### **a. La Soudabilité métallurgique :**

Elle est conditionnée par les transformations métallurgiques, sous l'effet de la fusion et du refroidissement postérieur, dans les zones soudées (métal déposé et ZAT ou zone affectée thermiquement) et qui peuvent conduire à des structures fragiles dans lesquelles des risques de fissuration peuvent apparaître, dont le plus important est le risque de fissuration à froid.

##### **b. La soudabilité globale ou constructive :**

Elle concerne les problèmes liés au comportement des joints soudés dans une construction donnée, compte tenu de l'influence de facteurs tels que :

- La forme de la pièce, de sa masse et les caractéristiques mécaniques du métal.
- Le bridage et l'existence de tensions internes.
- Les possibilités de répartition des déformations à travers la structure.
- La conception de la construction soudée et le type de joint.

**c. La soudabilité opératoire ou relative :**

Elle est liée aux problèmes rencontrés par le soudeur ou l'opérateur, lors de l'exécution du joint par un procédé donné comme par exemple, la grande fluidité d'un bain de fusion dans le cas des aciers austénitiques pour le soudage en position.

**I.4.2. Soudabilité des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés [11] [13] :**

On désigne par soudabilité l'aptitude des métaux à être assemblés par fusion. Elle est inversement proportionnelle à sa teneur en carbone et en carbone équivalent  $C_{\text{eq}}$ , autrement dit, plus la teneur en carbone est élevée et plus l'acier est difficile à souder et nécessite des précautions spécifiques (refroidissement lent sous calorifuge, préchauffage, post chauffage...). Cependant, les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants :

- Trempabilité : c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- Carbone équivalent : le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent.

Les aciers faiblement alliés sont des aciers dont une partie de leur carbone est remplacée par des éléments comme le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo). Cette classe d'aciers est caractérisée par des propriétés mécaniques remarquables obtenues par :

- des traitements et cycles thermiques appropriés comme la normalisation ou la trempe suivis d'un revenu.
- Pour certaines catégories bien particulières d'aciers, un traitement thermomécanique approprié (conjonction des effets de la température et de la déformation plastique pendant le laminage de l'acier).

Les aciers faiblement alliés ne présentent pas les difficultés de soudage liées à la présence du carbone mais doivent faire l'objet de précautions particulières pendant le soudage afin que les propriétés mécaniques ainsi obtenues soient maintenues après soudage (soudabilité métallurgique). En règle générale, les précautions pour le soudage sont déterminées dans un mode opératoire de soudage. Dans certains cas, le ou les modes opératoires de soudage doivent être validés par une qualification.

**I.4.3. Carbone équivalent  $C_{\text{eq}}$  d'après l'IIS [12] :**

Le carbone équivalent détermine le pouvoir trempant d'un acier. L'Institut International de Soudure a mis au point une formule permettant de calculer le carbone équivalent :



$$C_{\text{éq}} = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15 \dots \text{I.1}$$

Ainsi que le carbone équivalent compensé  $C_{\text{éc}}$  qui tient compte de l'épaisseur à souder :

$$C_{\text{éc}} = C_{\text{éq}} + 0.0254.e \dots \text{I.2}$$

#### I.4.4. Coefficient de soudabilité (S) [12] :

Si l'on représente la soudabilité par un coefficient :  $S$  variant de 0 à 10, la courbe Figure (I.07) représente la variation de  $S$  en fonction de la teneur en carbone de l'acier.

Pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

**Parfaitement soudable :**  $C = 0$  à  $0,25\%$   $S$  9 à 10

**Moyennement soudable :**  $C = 0,25$  à  $0,45\%$   $S$  7 à 9

**Soudable avec préchauffage :**  $C = 0,45$  à  $0,65\%$   $S$  5 à 7

**Soudage difficile :** Soudage sous conditions (préchauffage) indispensable  $S < 5$

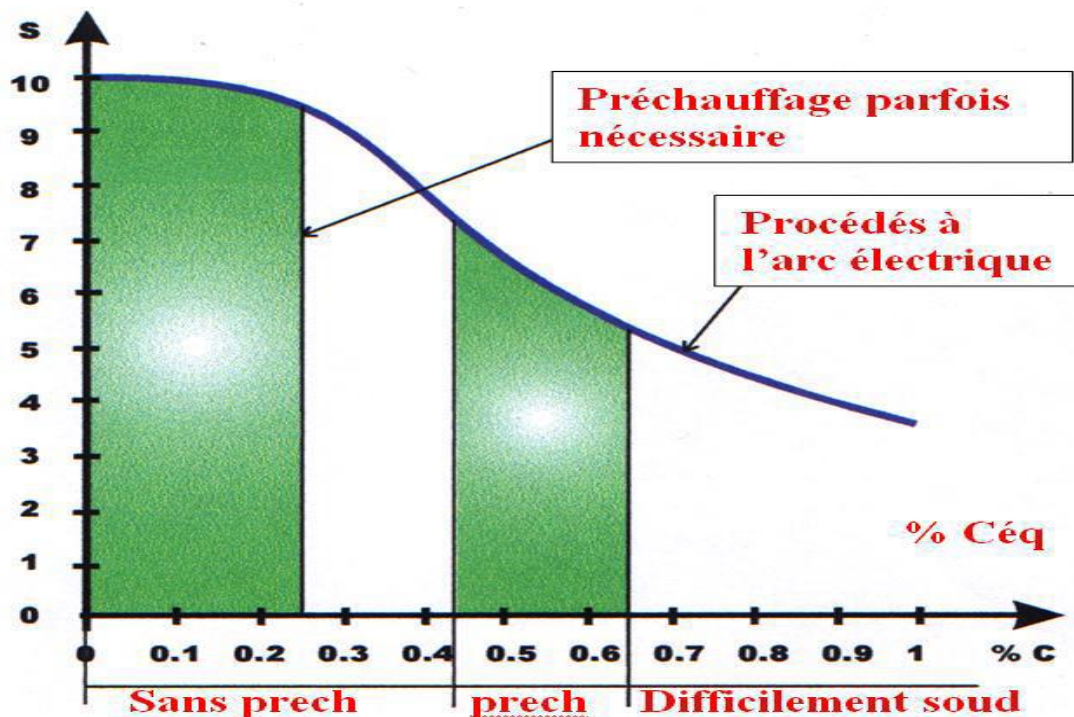


Figure (I.07) : courbe de coefficient de soudabilité  $S$  en fonction du  $\%$  de carbone [12]

- **Température de préchauffage [12]**

Elle est calculée en fonction du  $C_{\text{éq}}$ ,  $C$  par l'expression suivante :

$$T_{\circ} = 350\sqrt{(C_{\text{éq}} \cdot C - 0.25)}$$

Cette relation intervient uniquement quand le Carbone équivalent dépasse 0.42%.

**Tableau (I.01) :** influence du  $C_{\text{éq}}$  sur l'indice de soudabilité [13].

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	préchauffage
<0.40	Excellent	Aucun
0.40 à 0.50	Bon	De 100 à 300°C
0.50 à 0.60	moyen	De 100 à 300°C De 200 à 400°C
0.60 à 0.70	médiocre	De 300 a 400°C
>0.70	Mauvais	Non soudable

#### I.4.5. Influence des éléments d'additions [11] :

La métallurgie actuelle fait de plus en plus appel à des aciers ayant des caractéristiques de plus en plus complexes. Si l'ajout de certains éléments confère à ces aciers des propriétés intéressantes, ceux-ci vont modifier les réactions au soudage(ZAT). Quant aux impuretés, elles jouent toujours un rôle important sur les résultats mécaniques. Les principaux éléments d'addition utilisés dans ce genre d'application sont :

- **Carbone (C) :** C'est l'élément prépondérant lors du soudage. Quoique nécessaire pour augmenter la résistance à la rupture, son rôle sera à la fois actif et défavorable. Son influence sur l'effet de trempe du métal de base et dans la ZAT est importante. Il peut agir seul, mais très souvent en relation avec d'autres éléments trempant tels que le Mn; Cr et Mo par exemple.
- **Manganèse (Mn) :** Comme pour le carbone, il augmente la résistance à la traction mais ne diminue pas l'allongement. Par son rôle désoxydant, les caractéristiques sont donc améliorées. Il confère à l'acier une forte résistance aux chocs et à l'usure (acier Hadfield). Dans le cas des aciers ordinaires, sa teneur varie de 0,3 à 0,9% et pour les aciers à haute limite élastique (HLE) de 1 à 1,8%.
- **Chrome (Cr) :** Le chrome est un élément dont on doit tenir compte lors du soudage. Élément trempant très actif, c'est la raison pour laquelle sa teneur reste inférieure à 1% dans les aciers au carbone, de la classe des soudables. A forte teneur en (C) et de (Cr), les aciers sont durs et résistent à l'usure.
- **Nickel (Ni) :** Sans conférer un rôle trempant aux aciers, il améliore les propriétés générales. Allié au chrome, il constitue les aciers inoxydables. Il est utilisé dans les aciers autotrepant allié au (Cr) et au (C) et surtout dans les aciers travaillant à basse température (3 à 9% et  $t^{\circ} \approx -190^{\circ}\text{C}$ ).

- **Molybdène (Mo)** : Très actif au point de vue trempe, élément noble. Dans les aciers de construction, la teneur est en générale de 0,5 à 1%, dans ce cas, il augmente la résistance à chaud (fluage) et diminue les risques de fragilité. Il améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables (ex. tuyauterie véhiculant de l'UREE dans l'industrie chimique).
- **Cuivre (Cu)** : Toujours à faible teneur (0,5%), il améliore la résistance à la corrosion à l'eau de mer (ex. palplanches). Il provoque néanmoins des porosités lors du soudage avec des électrodes de qualité médiocre.
- **Silicium (Si)** : Agent désoxydant, se retrouve en faible pourcentage ( $\leq 0,2$  %) sans influence néfaste. Au-delà, il augmente la résistance à la traction, mais diminue l'allongement.
- **Aluminium (Al)** : Affine le grain, il est retenu dans la composition du métal d'apport pour le soudage oxyacétylénique des aciers. C'est un désoxydant efficace.
- **Titane (Ti)** : Il s'oppose à la trempabilité à l'air des aciers au chrome courants. C'est un élément puissant de résistance à la surchauffe. Il combat la précipitation du (C) et réduit la corrosion inter granulaire. Il donne une meilleure résistance à chaud à l'oxydation (soudures). C'est un agent stabilisant dans les aciers inoxydables.
- **Niobium (Nb)** : Même avantage que le titane mais beaucoup moins volatile, il le remplace donc dans les métaux d'apport lors du soudage.
- **Phosphore (K)** : augmente fortement la trempabilité et la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu des soudures.
- En général tous ces éléments influent sur la position des courbes de transformation des TRC.

#### I.4.6. Soudabilité des aciers inoxydables [13] :

Les propriétés physiques qui influent sur la soudabilité des aciers inoxydables, comparativement aux aciers carbonés, sont les suivantes :

- Un point de fusion inférieur : la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal est moins élevée; par conséquent, l'énergie nécessaire pour le soudage sera moindre.
- Une conductibilité thermique plus faible : ce facteur accroît encore l'importance de prévoir une moins grande énergie pour le soudage, car une conductibilité thermique élevée indique que la chaleur sera plus dispersée dans le métal et qu'il y aura des pertes.
- Une résistance électrique élevée : plus la résistance électrique est élevée, plus le bain de fusion est facile à créer. En revanche, l'amorçage de l'arc est plus difficile.
- Pour toutes ces raisons, la taille de la ZAT d'un acier inox sera de +/- 50% plus importante que celle d'un acier au carbone, dans les mêmes conditions.

**I.5. Paramètres de soudage [14] :****I.5.1. Energie de soudage (E) :**

On appelle énergie de soudage (où énergie nominale  $E_n$ ) celle qui est fournie par l'arc lors de l'exécution d'une soudure. Elle est fonction directe de la différence de potentielle  $U$  entre les deux électrodes, de l'intensité du courant  $I_s$  de soudage et de la vitesse ( $v$ ) de l'opérateur. L'énergie de soudage s'exprime par la relation suivante :

$$E_n = \frac{U_s \cdot I_s}{v_s} \cdot 60 \quad \text{J/cm} \dots \text{I.3}$$

Avec :

- $E_n = E_s$  : Energie de soudage [J/cm]
- $U_s$ : Tension de soudage [V]
- $I_s$  : Intensité de courant [A]
- $v_s$  : Vitesse de soudage [cm/mn]

**I.5.2. Relation entre énergie dissipée et énergie équivalente :**

Pratiquement l'énergie fournie au niveau de l'arc n'est jamais transmise dans sa totalité aux pièces à souder d'où la relation suivante donne le rendement du procédé :

$$\eta = \frac{E_d}{E_n} \dots \text{I.4}$$

$E_d = E$  : Energie effective de soudage :

$$E = \eta E_n = \eta \frac{U_s \cdot I_s}{v_s} \cdot 60 \text{ J / cm } (\eta < 1) \dots \text{I.5}$$

**Tableau (I.02) :** Rendements effectifs thermiques des procédés  $\eta$  [15].

Procédés	Métaux	Rendement de l'arc $\eta$
Automatique sous flux solide	Aciers	0,90 à 0,99
A l'arc avec électrodes enrobées	Aciers	0,70 à 0,85
MIG	Aciers doux	0,65 à 0,85
MIG	Aluminium	0,70 à 0,85

**I.5.3. Choix des paramètres :**

Pour déterminer certains paramètres, les plus optimaux possibles, nécessaires pour le choix de l'énergie de soudage, on fait usage de certaines relations empiriques établies. Ces dernières tiennent compte d'abord du type d'écoulement de la chaleur, de la vitesse ou du temps de refroidissement entre 850°C et 500 °C (**tr 850/500**) et, bien entendu des caractéristiques dimensionnelles des pièces à assembler.

**a. Temps de refroidissement tr 850/500 :**

Le temps de refroidissement entre 850 et 500° C est influencé par la température initiale T<sub>0</sub> c'est-à-dire la température de la pièce au moment de l'exécution de la soudure de l'épaisseur de la pièce δ, l'énergie de soudage E et les propriétés physiques des pièces à souder jouent un rôle prépondérant dans le temps tr écoulé lors du passage de la température de 850 à 500 C°.

**a.1. Détermination du temps de refroidissement tr850/500 :****Transfert à deux dimensions (2d)**

L'écoulement de chaleur se fait à deux dimensions, le temps de refroidissement se calcule par la formule suivante :

$$\mathbf{tr_{2d} = (1/4 \pi \lambda \rho c_p) [(1/500 - T_0)^2 - (1/850 - T)^2] F_2 (E/\delta)^2 \dots \mathbf{I.6}}$$

Dont :

- ρ : Masse volumique [kg /cm<sup>3</sup>]
- C<sub>p</sub> : Capacité calorifique [j /g °C]
- T<sub>0</sub> : température de préchauffage
- F<sub>2</sub> : facteur de forme
- δ : épaisseur (cm)

**Transfert à trois dimensions (3d)**

$$\mathbf{tr_{3d} = E/2 \pi \lambda [1/(500- T_0) - 1/(850- T_0)] F_3 \dots \mathbf{I.7}}$$

De cette relation précédente on constate que le temps tr que met une transformation allotropique pour passer de 850 °C à 500 °C est indépendant de l'épaisseur des pièces à souder δ.

- **F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> = 1** : Facteurs de forme

**b. Epaisseur critique  $\delta_c$  :**

Pratiquement, c'est l'épaisseur critique  $\delta_c$  qui permet de situer avec plus au moins de précision si l'écoulement de la chaleur est bidimensionnel ou bien à trois dimensions. Ainsi, ce paramètre dimensionnel se calcule comme suit :

$$\delta_c = \sqrt{\frac{E}{2\rho c_p} \left( \frac{1}{500-T_0} + \frac{1}{850-T_0} \right)} \quad (\text{cm}) \dots \text{I.8}$$

Pour déterminer le type d'écoulement de la chaleur il suffit de comparer l'épaisseur réelle  $\delta$  avec l'épaisseur critique  $\delta_c$ . Si :

- $\delta < \delta_c$  le transfert de chaleur est bidimensionnel
- $\delta > \delta_c$  le transfert est tridimensionnel

**I.6. Cycle thermique de soudage [16] :**

L'interprétation métallurgique de tous les phénomènes qui prennent naissance durant l'opération de soudage et les modifications de structure ou transformations résultantes d'un effet thermique requiert comme condition nécessaire la connaissance du cycle thermique de soudage ; c'est-à-dire la variation de la température  $T$  en fonction du temps  $t$ . La courbe correspondante  $T=f(t)$  tracée en un point voisin d'une soudure nous renseigne sur les grandeurs dont nous avons besoin cela dit :

- La température maximale atteinte  $T_{\max}$  qui peut être calculé avec la relation suivante :
- Le temps  $t$  de séjour au-dessus d'une température  $T$
- La loi de refroidissement traduite par le temps de refroidissement  $t_r$  entre deux températures  $T_1$  et  $T_2$  ou par la vitesse de refroidissement  $V_r$  à une température  $T_r$ .

Le cycle thermique est divisé en deux périodes :

**a. Période de chauffage**

Elle est caractérisée par la vitesse de chauffage ( $V_c$ ) et par la température maximale atteinte ( $\theta_m$ ). Les phénomènes qui apparaissent lors de cette étape sont les suivants :

- Austénitisation.
- Recristallisation.
- Grossissement du grain.
- Dissolution des carbures.

### b. Période de refroidissement

Elle est caractérisée par la vitesse de refroidissement  $V_r$  ou le temps de refroidissement entre  $850^\circ\text{C}$  et  $550^\circ\text{C}$  ( $tr_{850/550}$ ).

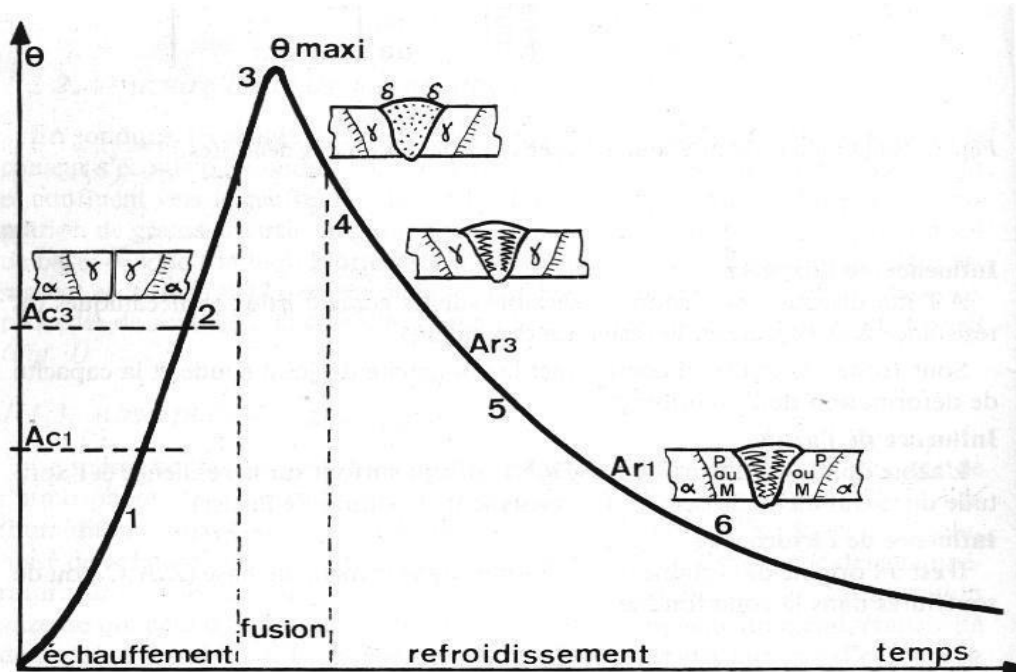


Figure (I.08) : -cycle thermique : courbe (température – temps  $T=f(t)$ ) [15]

- 1 – Dilatation  $Ac_1$  :
- 2 –  $Ac_3$  : austénitisation (changement de maille).
- 3 – Zone fondue : fusion et dilution du MA et du MB.
- 4 – Solidification  $Ar_3$  : formation de dendrites, retrait, contraintes.
- 5 – Transformations allotropiques  $Ar_1$ : trempe (martensite), recuit (perlite).
- 6 – Fin de transformation : contraintes résiduelles, déformations, rupture.

### I.7. Répartition thermique [16] :

En plus du cycle thermique qui nous renseigne sur la nature des phénomènes engendrés par une opération de soudage, il est aussi nécessaire et important de connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique en particulier la courbe  $T=f(y_0)$  pour pouvoir accéder à la répartition topographique et aux modifications ayant lieu aux alentours du cordon de soudure. La courbe  $T=f(y_0)$  permet de bien situer les limites extérieures des zones où chaque transformation bien précise est susceptible de se produire mais aussi l'étendue de cette dernière; ainsi se trouve définie d'une manière générale la zone affectée thermiquement (ZAT).

La relation qui caractérise cette répartition thermique et qui grâce à elle on peut tracer sa courbe représentative en un point donné à une distance  $y_0$  de l'axe du cordon est définie comme suit :



$$T_m = (0,484 \cdot E/2 \cdot c\rho \cdot y_0 \cdot \delta) + T_0 \dots I.9$$

( $T_m = \theta_m$ ), représente la température maximale atteinte en fonction de  $y_0$ .

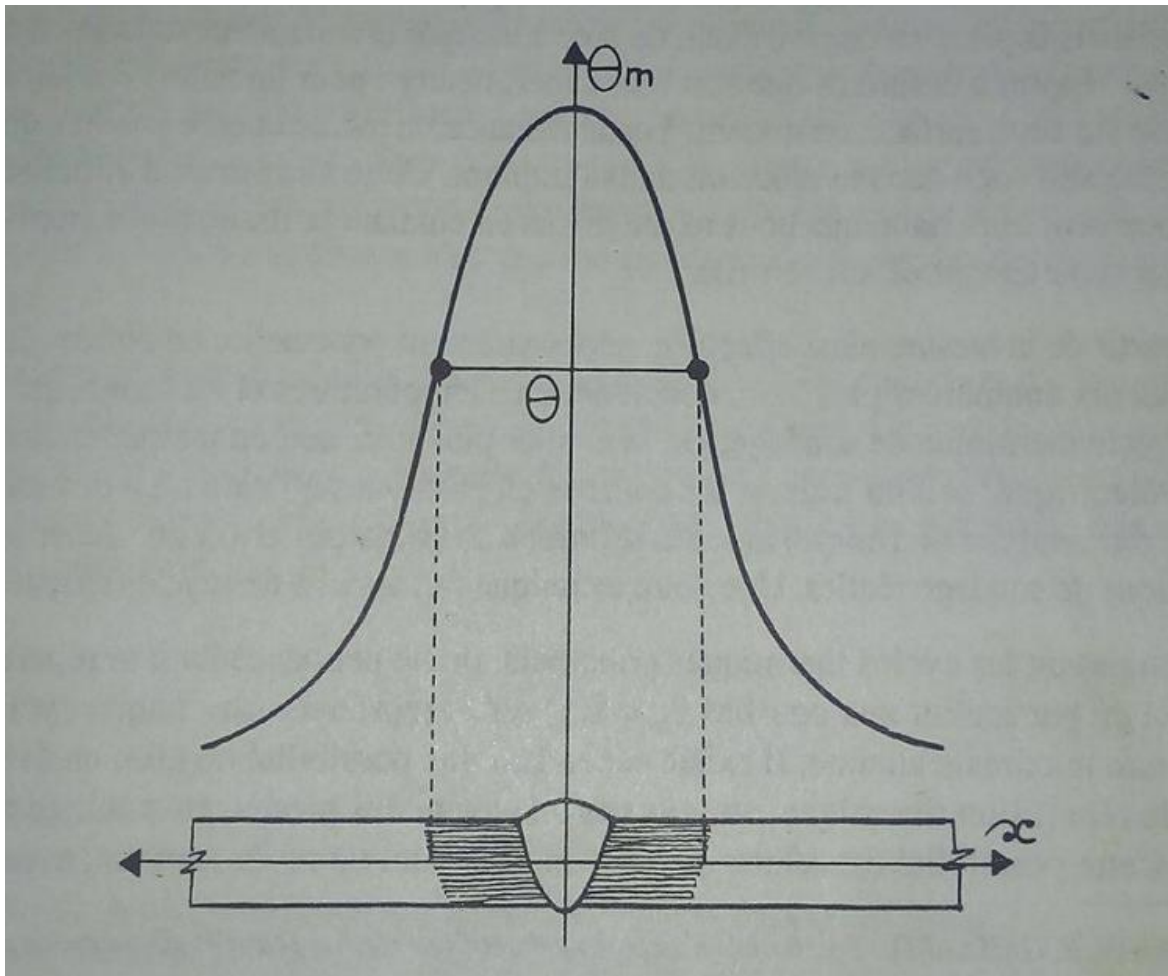


Figure (I.09) : Répartition thermique : courbe (température – distance) [16]

- Soudage multi passe : [16]

#### Définition :

Le soudage multi passe est un procédé qui consiste à faire intervenir plusieurs passages successifs de la source de chaleur en un point bien précis. Dans l'étude des cycles thermiques, il nous sera possible de montrer thermiquement que l'évolution de la température dépend essentiellement de :

- La température initiale ;
- Le nombre, la disposition des passes et leurs conditions d'exécution ;
- La température d'inter passe ;



- La position par rapport à la soudure du point dont on suit la variation de température.

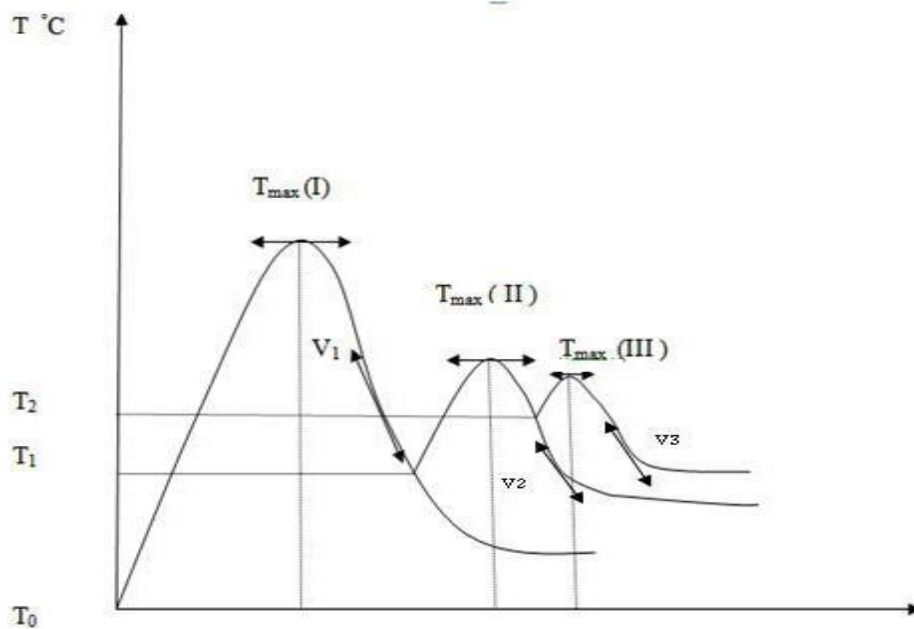


Figure (I.10) : Cycle thermique du soudage multi passe [16]

L'exécution de la 1<sup>ère</sup> passe se traduit par une première montée en température à partir d'une température initiale  $T_0$  jusqu'à la valeur maximale  $T_{max(I)}$ , suivie d'un refroidissement caractérisé par une vitesse  $V_1$ .

Une seconde passe est générée avant que la température n'ait rejoint  $T_0$ , donc à une température  $T_1 > T_0$  un nouveau cycle thermique intervient du fait de cette 2<sup>ème</sup> passe, cycle caractérisé par une température maximale  $T_{max(II)}$  inférieure à  $T_{max(I)}$  et une vitesse de refroidissement  $V_2 < V_1$ , se fait résulter de l'éloignement de la source de chaleur du point de mesure et de l'effet de préchauffage vu que ce cycle s'amorce est parti de  $T_1$ .

Il en est ainsi de la 3<sup>ème</sup> passe qui s'amorce à partir de la température  $T_2$  à laquelle s'est arrêté la 2<sup>ème</sup> passe, et pour les mêmes raisons, on voit une température maximale atteinte  $T_{max(III)}$  et une vitesse de refroidissement  $V_3$  être inférieure aux 2 précédentes.

Du point de vue structural, le cycle thermique répété a un effet analogue à celui du revenu, il réduit le taux de Martensite fragilisant la structure au profit de la Bainite qui est une structure souhaitée (traitement local influant positivement sur la microstructure). [16]

## **I.8. Les Aciers :**

L'acier est un alliage à base de fer qui contient jusqu'à 2% de carbone. Suivant la

destination on distingue les aciers de construction contenant de 0.02 à 0.85% de carbone et les aciers à outils. La teneur en carbone varie entre 0.65 et 1.4%. Les aciers de construction, utilisés pour les éléments de construction et l'armature de béton armé, ainsi que dans les constructions mécaniques ont une bonne plasticité et une basse fragilité.

L'augmentation de la teneur en carbone dans les aciers à outils leur communique une haute dureté, mais en même temps les rend plus fragiles (Résistance à la chaleur, à l'usure par abrasion et à la corrosion) sont améliorées par l'addition du nickel, du chrome, du wolfram, du molybdène, du cobalt, du cuivre, de l'aluminium, etc., que l'on appelle éléments d'alliages et l'acier eux-mêmes, aciers alliés. Suivant les quantités d'additions on distingue les aciers à faible alliage contenant jusqu'à 2% d'éléments d'alliages, les aciers moyennement alliés contenant de 2 à 10% d'éléments d'alliages et les aciers hautement alliés qui en contiennent plus de 10%. Dans la construction on utilise largement les aciers à faible alliage. L'acier inoxydable est un acier hautement allié [17].

➤ **Type des aciers :**

Les aciers ont été classés en fonction de deux critères; la composition et le niveau de qualité. Ainsi on distingue les aciers non alliés (<1% d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage < 5 %) ou très alliés  $\geq 5$  %. Sont en fonction de la garantie donnée aux propriétés d'usage, les aciers de base, de qualité ou les aciers spéciaux. Ces derniers sont placés dans trois familles :

- les aciers de construction mécanique (peu ou non alliés)
- les aciers à outils (peu ou très alliés)
- les aciers inoxydables.

L'industrie gazo-pétrolière qui représente le moteur d'économie mondiale, exige du métallurgiste des aciers possédant une bonne combinaison de résistance, ténacité et soudabilité pour les besoins de transport de leurs produits.

Ces critères ont conduit au développement d'aciers à bas carbone appelé HSLA (acier à haute limite élastique).

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre des limites d'élasticité supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé.

Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone laminés. D'ailleurs, parce que la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA

est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [18].

### **I.9. Aciers HSLA :**

Les aciers HSLA, ont été développés dans une large gamme de limite d'élasticité, de niveau 315 à 700 MPa en laminé à chaud et de niveau 240 à 355 MPa en laminé à froid. Ce sont des aciers doux et extra doux auxquelles on ajoute de faibles quantités des éléments notamment (Nb, Ti, V, Al) afin de piéger le Carbone et l'Azote sous formes de carbures et nitrures, et pour cela sont dénommés les aciers micro-allié [19].

Les aciers H.S.L.A peuvent être divisés en six catégories :

#### **❖ Aciers résistants à la corrosion :**

Contenant du cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement est obtenu par solution solide et l'affinement du grain ; ils sont les premiers à être développés.

#### **❖ Aciers laminés à structure perlitique :**

L'addition de quantités modérées d'un ou plusieurs éléments autres que le carbone augmente les propriétés mécaniques ainsi que la soudabilité de ces aciers.

#### **❖ Aciers à ferrite aciculaire :**

À la différence de la structure ferritique polygonale, la ferrite aciculaire est caractérisée par une haute densité de dislocation et des grains fins très déformés, ce qui confère à l'acier une limite d'élasticité très élevée, est une très bonne ténacité combinée à une bonne soudabilité.

#### **❖ Aciers dual-phase :**

Ils ont une microstructure composée de (80 à 90%) de ferrite et (10 à 20%) de martensite. Les aciers Dual-phase peuvent être produits à partir des aciers à faible teneur en carbone de trois manières:

- L'austénitisation inter critique des aciers de carbone-manganèse a suivi du refroidissement rapide.
- un laminage à chaud avec des éléments favorisant la formation de ferrite tels que le silicium et les éléments qui retardent la transformation tels que le chrome, le manganèse, et/ou le molybdène.
- Le recuit continu de l'acier laminé à froid de carbone-manganèse a suivi de trempage et adoucissement.

Actuellement ils sont de plus en plus délaissés au profit d'autres types d'aciers HSLA [19].

❖ **Aciers a forme d'inclusion contrôle :**

Le contrôle de la forme des inclusions qui détermine la plasticité de ces derniers, s'exécute par des petites additions d'éléments de terre rare (Or, Ce.), de Zr, de Ca ou du Ti [20].

❖ **Aciers ferrito-perlitique :**

Ce sont des aciers types C-Mn qui contiennent de faibles quantités d'éléments susceptibles de former des carbures et carbonitrures tels que le V et Nb.

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

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

## **I.10. Défauts de soudures [13] :**

### **I.10.1 Fissurations :**

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait empêché peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport (MA), un préchauffage approprié TP, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc éluder les fissures. Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent de ce fait on observera :

- Les fissures qui peuvent être localisées dans le métal fondu, elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure et notamment du degré de pureté du métal de base (MB).
- Les fissures qui peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de Liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On distingue alors deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite

d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

#### **a. Fissuration à chaud**

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 le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure.

On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal.

On rencontre généralement ce type de fissuration dans les aciers austénitiques.

#### **b. Fissuration à froid**

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure combiné aux tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.

Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

- la trempabilité liée au carbone équivalent.
- la présence d'hydrogène due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine.
- l'humidité dans l'air.
- le refroidissement rapide de la pièce.
- la présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.) .
- les contraintes résiduelles du fait d'un retrait empêché.

- le mode opératoire

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures.

### **I.10.2. Soufflures :**

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface). 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 prévenir les soufflures, 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.

### **I.10.3. Retassures et criques de solidification :**

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. 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.

### **I.10.4. Morsures et caniveaux :**

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base. Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

**Chapitre II**  
**Conception des joints**  
**soudure**

### **II.1. Introduction :**

Les joints de soudure sont des bords autrement des points où différentes pièces métalliques ou plastiques sont reliées entre elles. Ceux-ci peuvent être formés en reliant divers métaux sinon des pièces en plastique basées sur une géométrie exacte.

Il existe différents types de joints disponibles sur le marché, mais selon Société de soudage en Amérique a classé certains d'entre eux comme bout, bord, coin, tee et recouvrement...ect

Ces joints peuvent avoir des conceptions différentes au niveau du joint partout où le soudage réel peut avoir lieu.

Avant que la procédure de soudage ne se produise, la préparation des joints est nécessaire. Il y a différents types de techniques d'articulation sont disponibles et comprennent le fraisage, l'estampage, le cisaillement, la coulée, l'usinage de forgeage, le limage, la découpe à l'arc plasma, la découpe à l'oxyacétylène et le meulage.[21]

### **II.2. Différents types de joints de soudure :**

Les joints de soudure sont classés en sept types pour souder deux pièces en une seule. Les joints de soudure sont bout à bout, coin, recouvrement, en T, bord, cruciforme et Joint conique évasé.

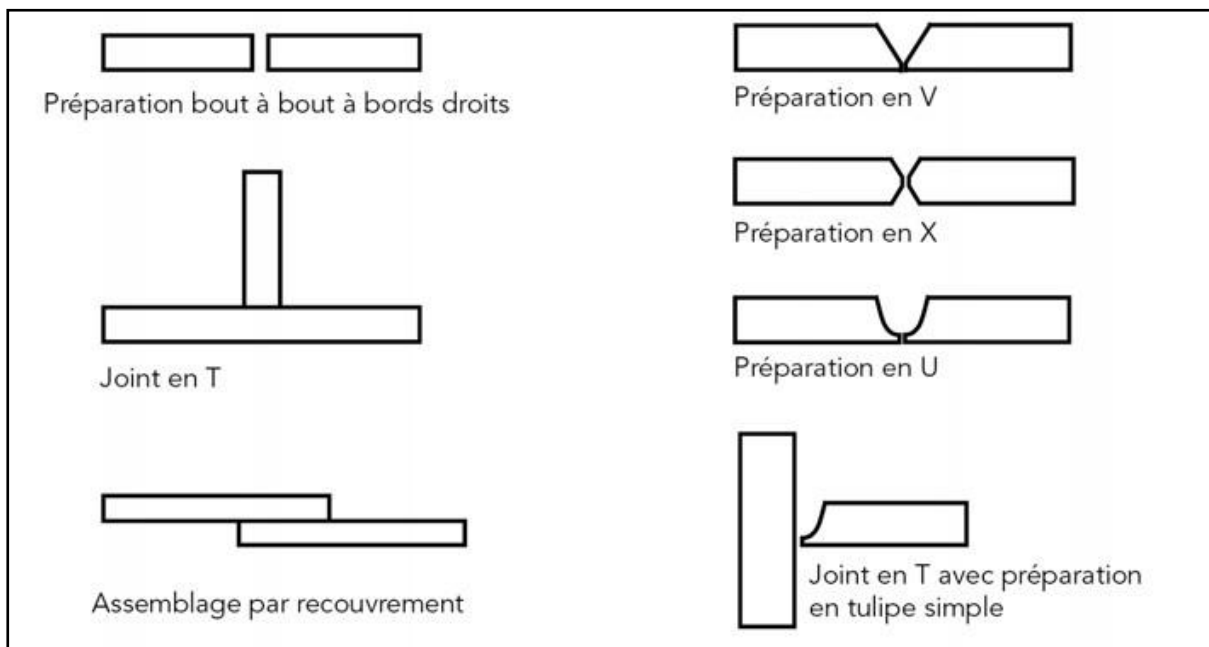


Figure (II.01): les différents joints de soudure [22].



### II.2.1 Joint bout à bout :

Le joint bout à bout peut être formé en agencant les deux extrémités métalliques ensemble, appelées joint bout à bout. Dans ce type de joint, les deux extrémités se trouvent au-dessus du plan similaire sinon côte à côte. Ce joint est très utile pour combiner le métal ou des pièces en plastique conjointement. Le joint bout à bout comprend différents types de soudage, à savoir le soudage bout à bout carré, soudure à rainure en V, rainure en J, rainure en U, rainure en V évasée, soudage bout à bout à rainure en biseau évasé. [21]

Les applications de joint bout à bout inclure les robinets, les brides et les raccords de tuyaux.

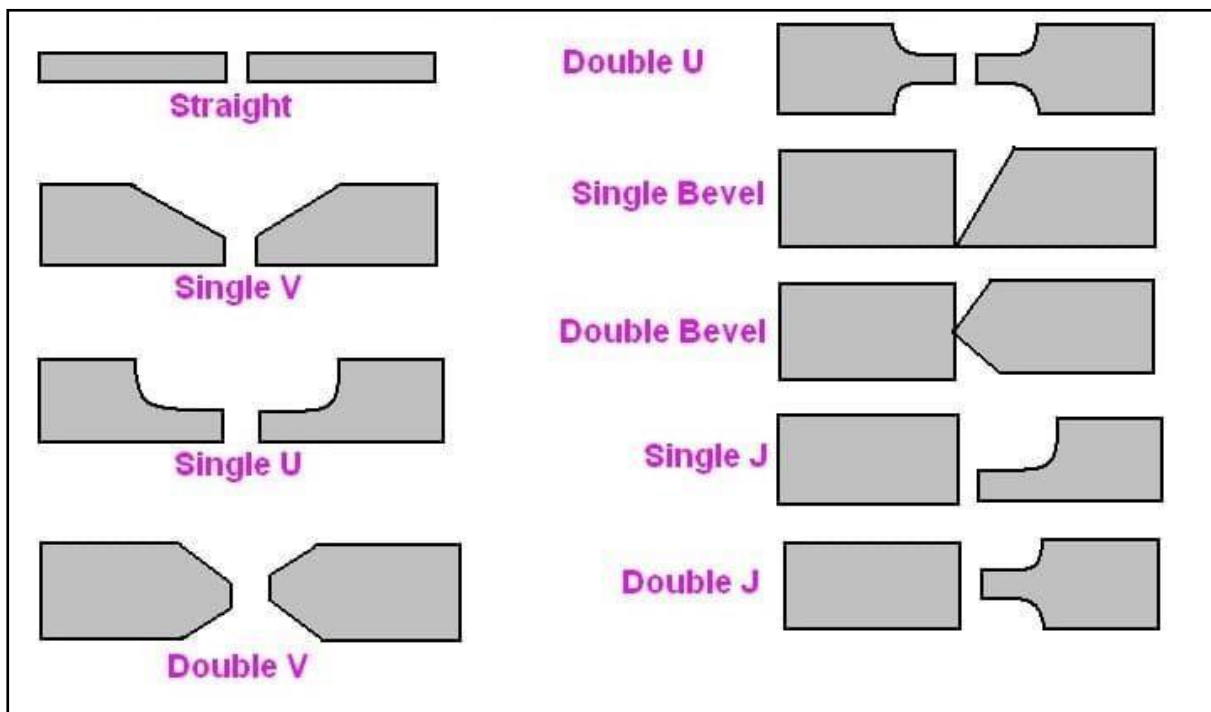


Figure (II.02) : Types de configuration de joint bout à bout. [21]

### II.2.2. Joint d'angle : [21]

Le joint d'angle peut être formé en disposant le coin de deux extrémités métalliques à l'angle droit est appelé joint d'angle. La forme en L peut être formée en soudant deux pièces avec un joint d'angle. Le joint d'angle comprend différents types de soudage, à savoir les soudures d'angle, par points, à rainure carrée, à rainure en V, à rainure en biseau, à rainure en U, à rainure en J, à rainure évasée en V et à bride de coin de bord. [21]

Les applications du joint d'angle inclure la tôle, les feuilles légères, les feuilles de métal plus lourdes, et ce joint est également utilisé dans la conception de boîtes, cadres et autre type de fabrication.

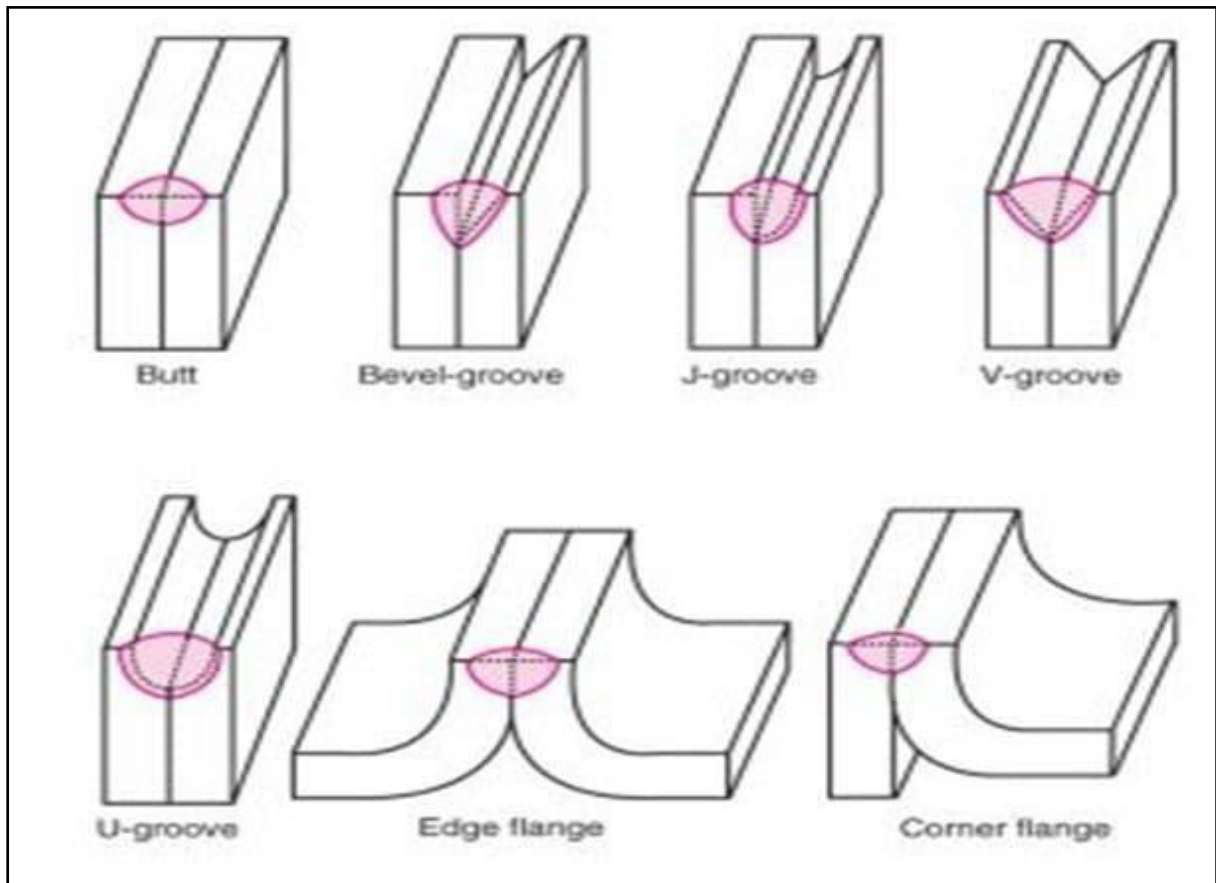


Figure (II.03) : Types de joints d'angle. [21]

### II.2.3. Joint en T : [21]

Le joint en T peut être arrangé en interconnectant deux extrémités à un angle de 90 degrés et un élément se trouve au milieu de l'autre. Les deux extrémités sont soudées comme une lettre T, il est donc appelé joint en T. Le joint en T comprend différents types de soudage, à savoir les soudures d'angle, de bouchon, de fente, de rainure en biseau, de rainure en J, de rainure en biseau évasé et de soudure par fusion.

Les applications du joint en T comprennent principalement lorsqu'une pièce métallique est connectée à un type de base, la fixation de plaques minces, structurelles et applications de la machine

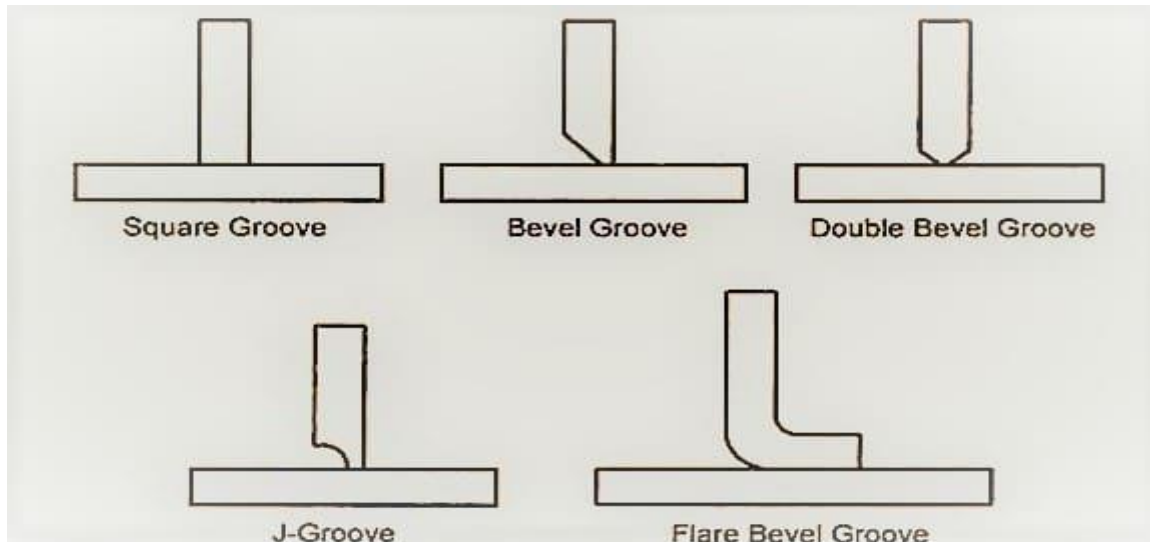


Figure (II.04) : différents types de configurations de joint en T sont illustrés. [21]

#### II.2.4. Joint à recouvrement : [21]

Le joint à recouvrement peut être formé à chaque fois que les deux extrémités en métal ou en plastique sont placées l'une au-dessus de l'autre puis jointes par le processus de soudage. Ce type de joint peut être unilatéral ou double. Les joints à recouvrement sont fréquemment utilisés pour souder deux pièces métalliques de largeur différente. Le joint à recouvrement comprend différents types de soudage, à savoir un filet, une rainure en biseau, une rainure en J, un bouchon, une fente, un point, une rainure en biseau évasé.

Les applications de joint à recouvrement comprennent principalement le soudage à l'arc au tungstène au gaz, le soudage par points par résistance, ainsi que le soudage à l'arc au gaz métal. Ceux-ci sont également utilisés dans le plastique, le bois, les tables, l'encadrement temporaire, l'assemblage du cadre en ébénisterie et en automatisation processus relatifs.

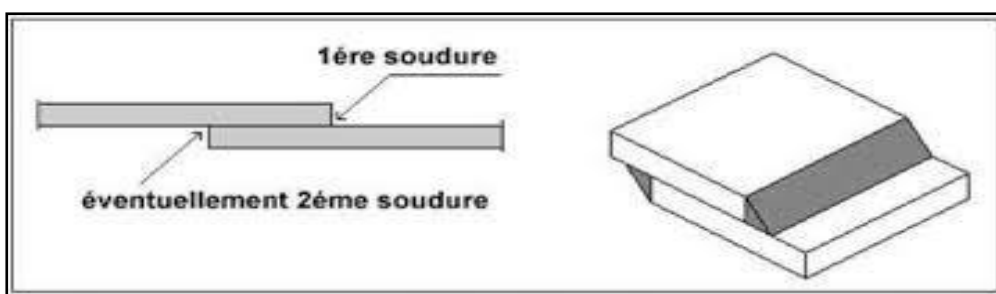


Figure (II.05) : Exemple de joint à recouvrement. [21]

#### II.2.5. Joint de bord : [21]

Le joint de bord peut être formé en reliant les deux bords de pièces métalliques conjointement appelés joint de bord. Le joint de bord est principalement utilisé partout où les

deux bords de la feuille sont à proximité et c'est-à-dire des plans parallèles estimés par l'extrémité de soudage.

Dans ce type de joint, le joint ne pénètre pas complètement en raison de la largeur du joint, il ne peut pas être utilisé dans des applications telles que la contrainte ou la pression. Le joint de bord comprend différents types de soudage, à savoir la soudure à rainure carrée, à rainure en biseau, à rainure en V, à rainure en J, à rainure en U, à soudure de bord-bride et de bride d'angle.

Les applications de joint de bord incluent principalement les endroits où les bords des feuilles sont proches et qui sont des plans à peu près parallèles à l'extrémité de soudage. Ces joints sont applicables là où la jonction est essentielle pour souder conjointement deux pièces voisines, et où l'épaisseur des tôles est inférieure à 3 mm.

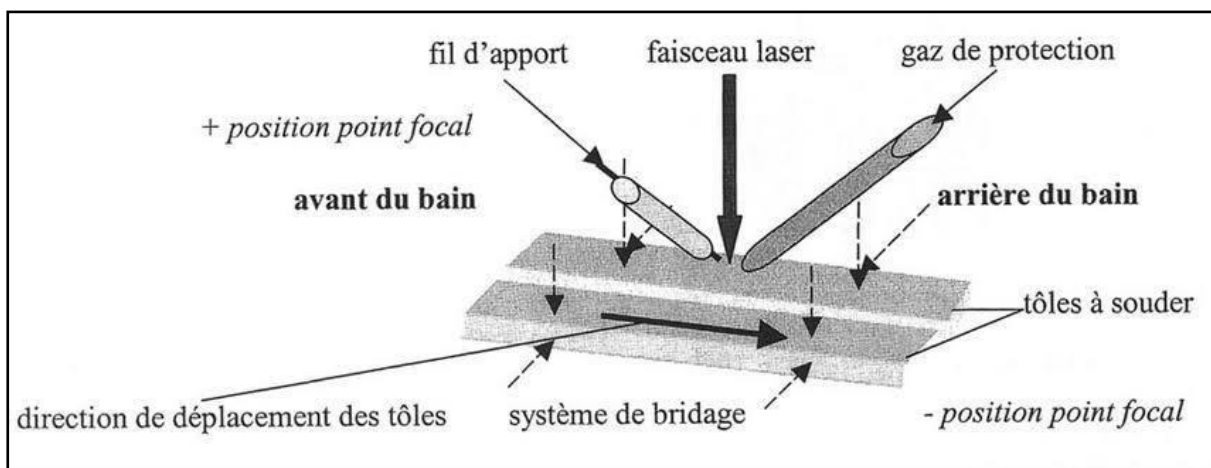


Figure (II.06) : Exemple de joint de bord. [21]

### II.2.6. Joint cruciforme : [21]

Le Joint cruciforme est un joint spécifique dans lequel quatre espaces sont créés par la soudure de trois plaques de métal à angle droit comme indiqué ici. Dans (l'American Bureau of Shipping Rules for Steel Vessels), les joints cruciformes peuvent être considérés comme une double barrière si les deux substances nécessitant une double barrière se trouvent dans des coins opposés en diagonale. [21]

On applique ce type des joints pour séparer le pétrole et l'eau de mer, les produits chimiques et l'eau potable, etc.

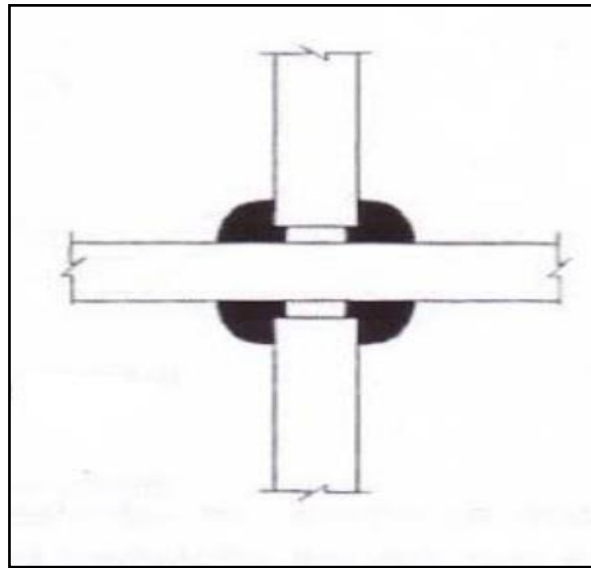


Figure (II.07) : Exemple de joint cruciforme. [21]

### II.2.7. Joint conique évasé : [21]

Les joints coniques évasés sont formés entre un élément rond ou au moins un élément en plaque. Un simple joint à rainure évasée est illustré dans la figure ci-dessous.



Figure (II.08) : Exemple de joint conique évasé. [21]

### II.3. Préparation des joints : [18]

L'application permet de souder tous les types de joints. Toutefois, il est important de savoir que généralement, on n'utilise pas de baguette d'apport pour le soudage des plaques minces. Dans ce cas, on privilégie un joint à bords relevés pour permettre un assemblage par fusion des bords seulement.

Le type de préparation du joint pour un travail donné dépend principalement des facteurs suivants:

- propriétés requises pour le cordon de soudure;
- coût de préparation du joint et du dépôt de la soudure;
- nature du métal de base;
- dimensions, forme et apparence de l'assemblage à souder.

Il faut aussi tenir compte des considérations suivantes pour le choix du type de joint:

- nombre de points de soudage et dimensions de ces points.
- possibilité de réaliser une purge.
- distance entre les plaques, profondeur et angle du chanfrein, s'il y a lieu.
- nombre de passes requises.
- diamètre de la baguette d'apport.
- méthode d'amorçage de l'arc.
- position de soudage.
- possibilité de renforcement du joint (bridage).
- type d'électrode employée.
- type de poste de soudage.
- Tolérances de l'assemblage.

#### **II.4. Méthodes de réalisation d'un joint soudé : [18]**

Comme on peut le voir sur la figure (II.09), un joint soudé s'obtient en faisant fondre des plats en acier ou des profilés (métal de base) le long de la ligne du joint. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal fondu qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base, comme on le voit sur la figure (II.10). Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint.

Deux types de soudure sont d'usage commun : les soudures bout à bout et les cordons d'angle. Dans le premier cas, le métal fondu est généralement celui du profilé des éléments à souder ; dans le second le métal fondu déposé est extérieur aux éléments à souder.

Bien évidemment, on ne peut pas faire en même temps toute la longueur du joint. En pratique, la source de chaleur utilisée pour fondre une petite surface est ensuite déplacée le long de la ligne du joint, faisant fondre progressivement le métal de base sur le bord avant du bain de fusion, comme on le voit sur la Figure (II.11).

Au même moment, le métal du bord arrière du bain de fusion se solidifie. La source de chaleur la plus souvent utilisée, pour des travaux sur des structures est constituée d'un arc de faible voltage (15 à 35 V), d'intensité élevée (50 à 1 000 A). Comme on le voit sur le schéma de la Figure (II.12), l'arc se développe entre le bout de l'électrode en acier (barreau) et la pièce à souder ; il fait fondre à la fois le métal de base et l'électrode ; le métal fondu provenant de l'électrode est ainsi ajouté au bain de fusion.

L'acier fondu du bain de fusion absorbe volontiers l'oxygène et l'azote de l'air, ce qui peut rendre poreuse la soudure solidifiée et conduire éventuellement à des problèmes métallurgiques.

La Figure (II.13) montre comment on peut éviter ceci en couvrant le bain avec un flux en fusion, comme dans le soudage à l'arc manuel et le soudage à l'arc sous flux en poudre ou en remplaçant l'air autour de l'arc par un gaz inerte, comme dans le soudage MAG ou le soudage par électrode enrobée.

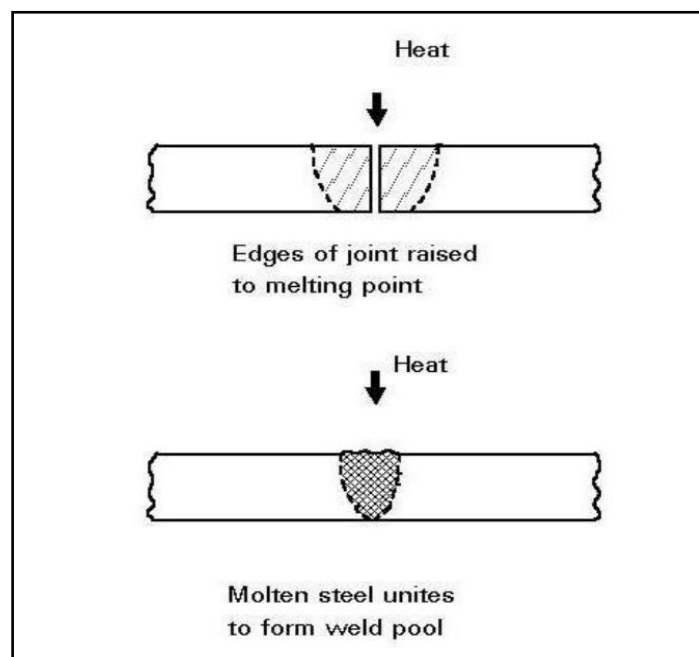


Figure (II.09) : Formation d'une piscine de la soudure

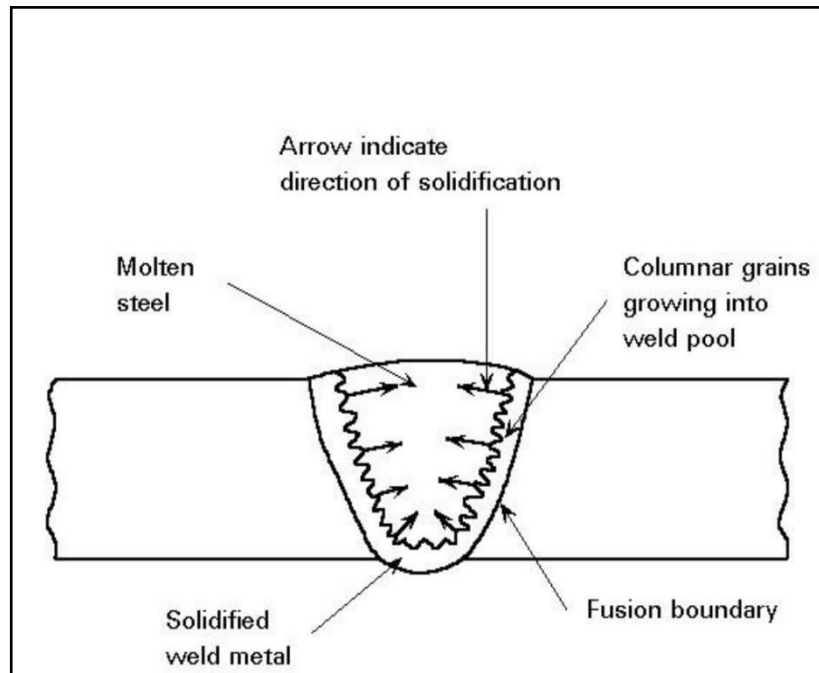


Figure (II.10) : Solidification de métal de la soudure

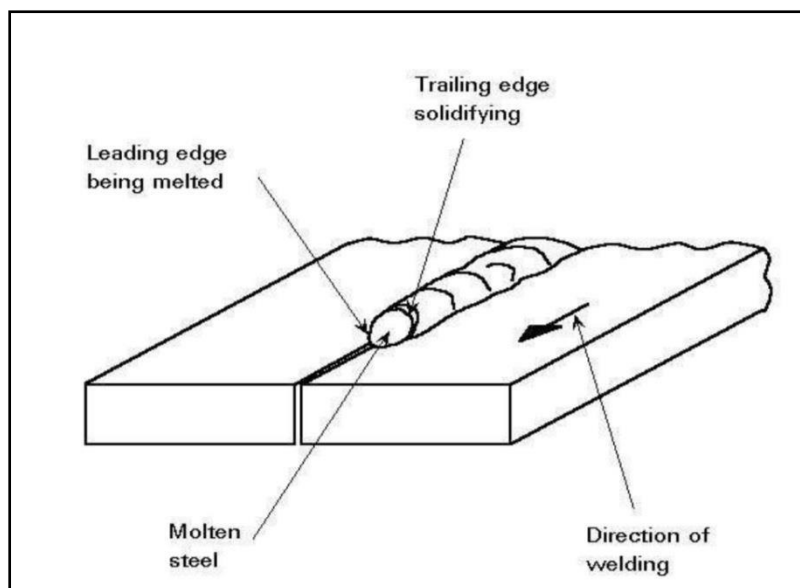


Figure (II.11) : Fusion progressive et solidification



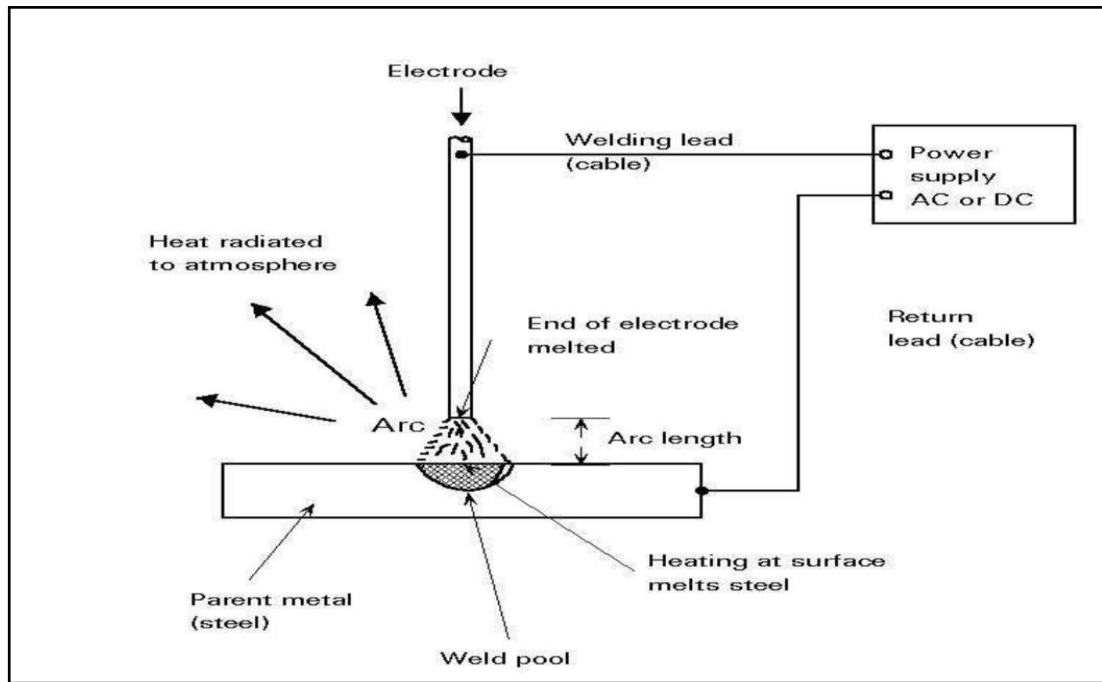


Figure (II.12) : Soudure par arc

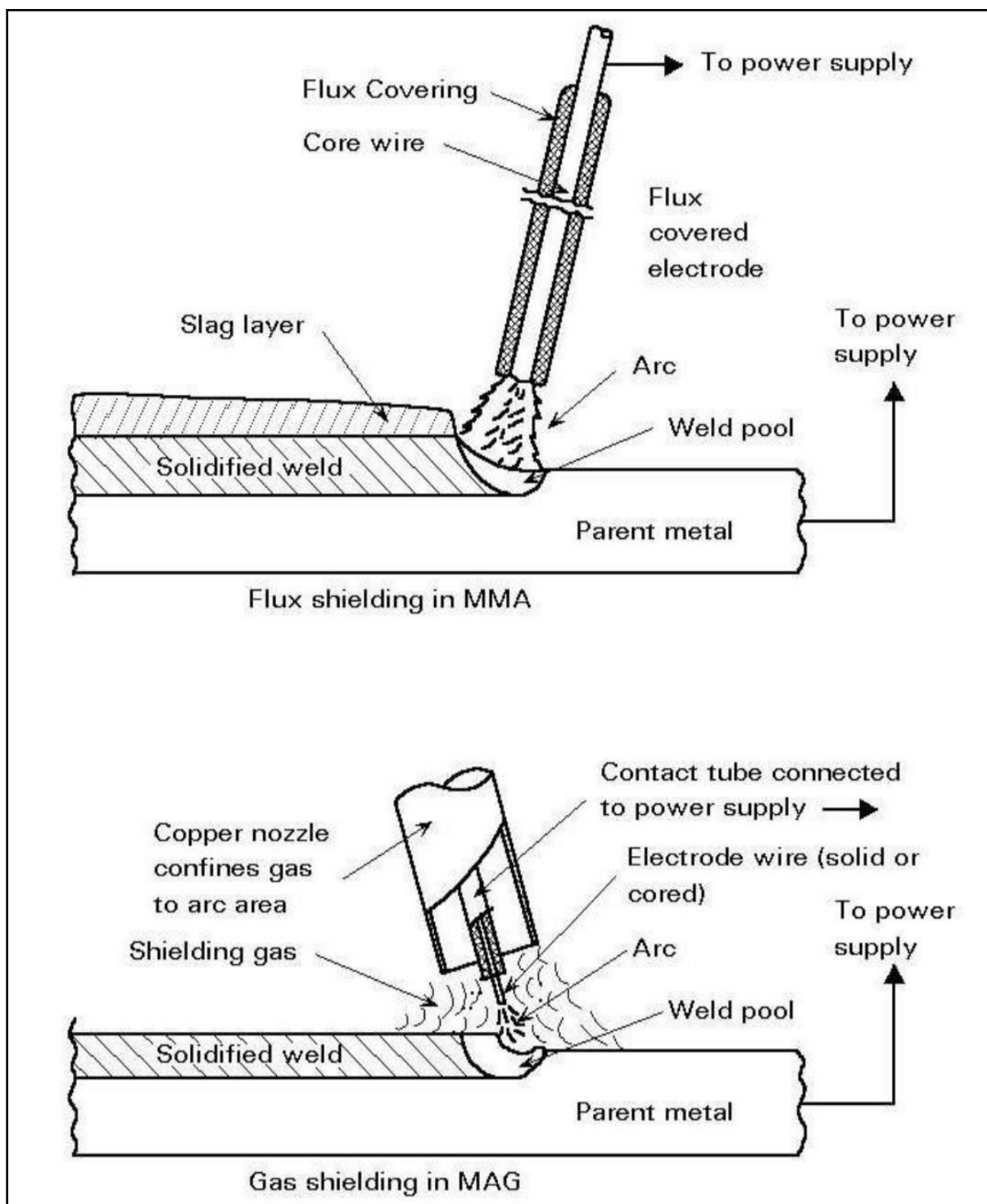


Figure (II.13) : méthode de protection

**II.5. Positions de soudage :** [18]

Le soudage peut se faire à plat, en corniche, au plafond ou en position verticale. Pour le soudage en position verticale ; il peut se faire de bas en haut (en montant), comme il peut aussi se faire de haut en bas (en descendant), quant aux soudures d'angles elles se font en corniche ou à plat.

- **A plat :** La soudure à plat est réalisée par un accès horizontal au-dessus de l'articulation. Cette position est la plus simple en soudage.
- **En corniche :** Le soudage en corniche est fait sur une surface horizontale. Ce type de soudage est souvent utilisé pour effectuer des soudures en angle.
- **Verticale :** Pour cette position de soudage, l'axe de la soudure est majoritairement dans une position verticale. Le soudage vertical est généralement plus compliqué à réaliser que la soudure à plat ou en corniche.
- **Au plafond :** De toutes les quatre positions de soudage, c'est la plus complexe. Elle est réalisée par le dessous de l'articulation. La haute qualification du soudeur s'impose.

Les quatre positions de soudage varient dans leur complexité, mais le soudage de tuyauterie reste le type de soudage le plus difficile à exécuter. Indépendamment de la position ou du type de soudage, une articulation correctement créée par ce processus sera plus forte que le métal de base.

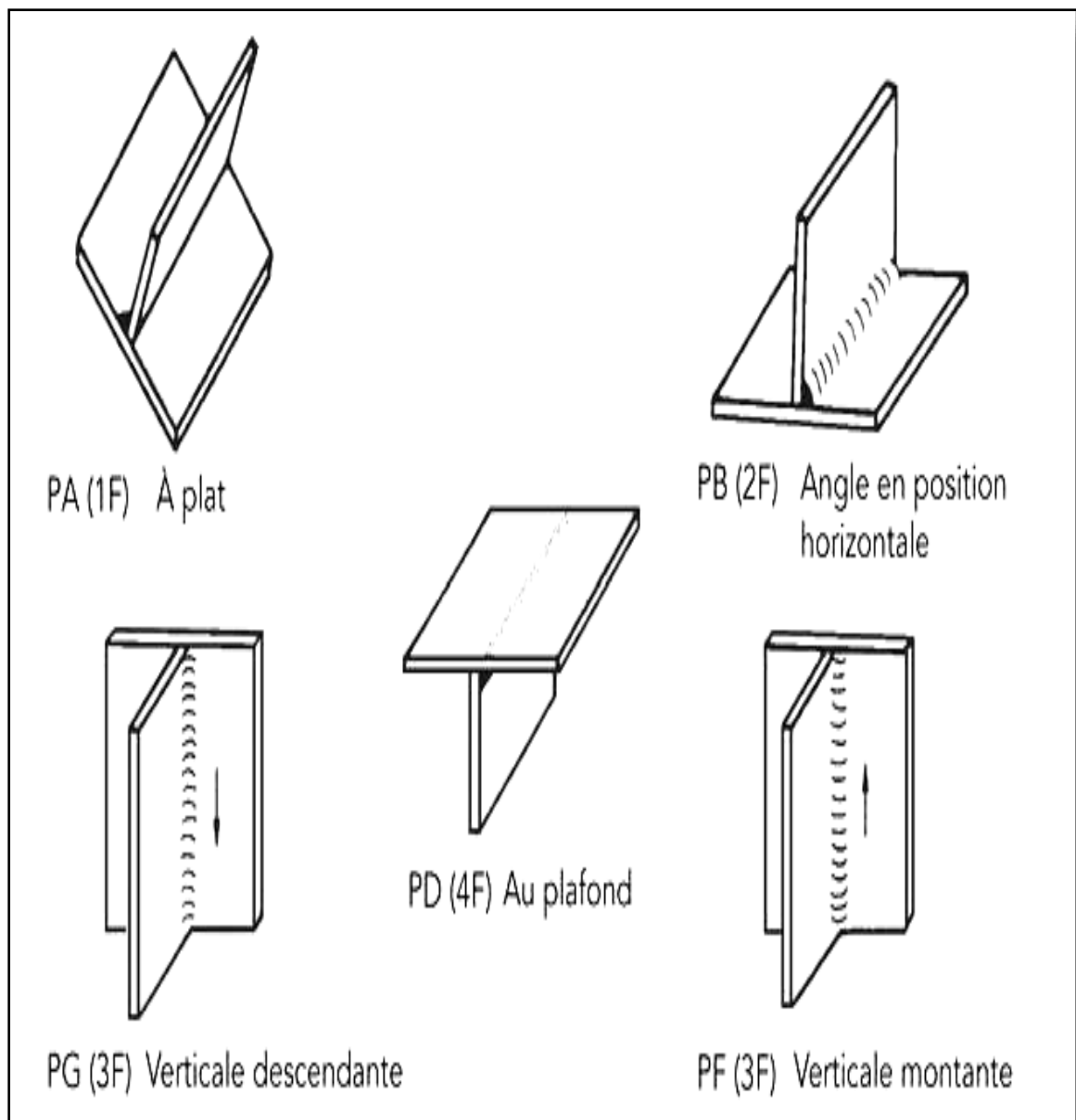


Figure (II.14) : Positions de soudage

# **Chapitre III**

## **Partie expérimentale**

### **III.1. Introduction :**

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure afin de mettre en évidence l'influence de la forme des cordons de soudure sur les caractéristiques mécaniques des structures soudées (acier S235 JR).

### **III.2. Matériaux utilisés :**

#### **III.2.1. Métal de base :**

Le choix de métal de base S235 JR est fait suivant :

- Sa bonne soudabilité.
- Sa limite d'élasticité intéressante.
- Sa disponibilité sur le marché nationale.

#### **Composition chimique**

**Tableau (III.01) :** Composition chimique de l'acier S235JR.

Matériau	Composition chimique %				
	C	Mn	P	S	N
Acier S235 JR	Max 0.2	Max 1.4	Max 0.045	Max 0.045	Max 0.009

#### **Caractéristiques mécaniques**

**Tableau (III.02) :** caractéristiques mécaniques de l'acier S235JR.

Matériau	Limite Elastique Re	Résistance à l'attraction Rm	Densité	Point de fusion
Acier S235 JR	235 MPa	360 à 370 MPa	7,80	1370 à 1400 °C

#### **III.2.2. Métaux d'apport :**

Le matériau de base va être soudé à l'arc électrique avec deux procédés de soudage EE et TIG.

Pour le procédé de soudage à l'arc électrode enrobé, nous avons choisi le métal d'apport rutile E6013 de diamètre de 3.5mm, et le ER70S-3 pour le procédé de soudage TIG

Ce qui permet d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique.

Le tableau ci-dessous montre les compositions chimiques de chaque métal d'apport.

Tableau (III.03) : composition chimique de matériaux d'apport.

%	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
E6013	0.09	0.70	0.50	-	-	-	-	-	-
ER70S-3	0.07	1.1	0.65	0.02	0.02	-	-	-	-

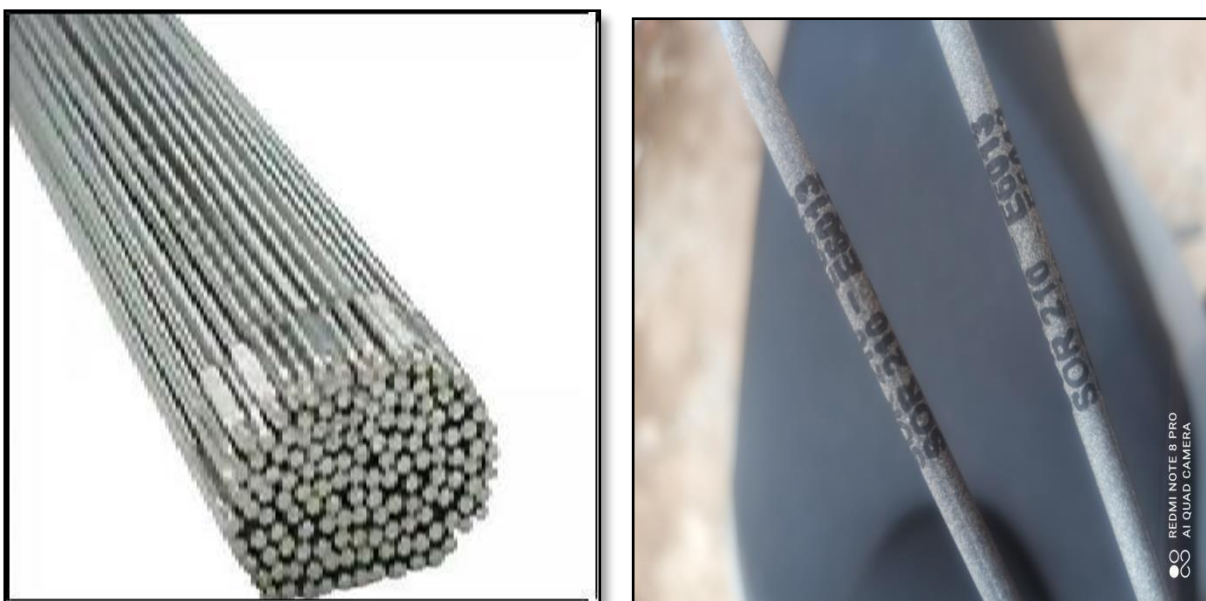


Figure (III.01) : métal d'apport utilisé (ER70S-3), (E6013).

### **III.3. Préparation des éprouvettes :**

#### **III.3.1. Découpage des pièces à souder :**

Chaque éprouvette est composée de deux pièces de longueur 130mm et de largeur 30mm, avec une épaisseur qui varie entre (5 mm et 8 mm).

Le découpage a été réalisé au niveau de l'atelier du faculté de technologie de l'université de Tlemcen

- La première étape c'est le traçage des barres à découper.
- Ensuite ajuster les barres sur la table de machine de découpage (Figure (III.02)).
- Découper les barres pour obtenir des pièces de types suivant :

- tôles de 130mm×30mm de 8 mm d'épaisseur.
- tôles de 130mm×30mm de 5 mm d'épaisseur.



Figure (III.02) : machine de découpage

### III.3.2. Chanfreinage des pièces :

Avant d'entamer la procédure de soudage, il faut passer par l'étape de chanfreinée. Nous avons choisis cinq motifs différents de type de joint bout à bout :

- Chanfrein en V
- Chanfrein en U
- Chanfrein en O
- Chanfrein en X
- Bord droit

Ces cinq motifs sont représentés sur les figures suivants (III.03,04,05,06,07) :





Figure (III.03) : Bords droits

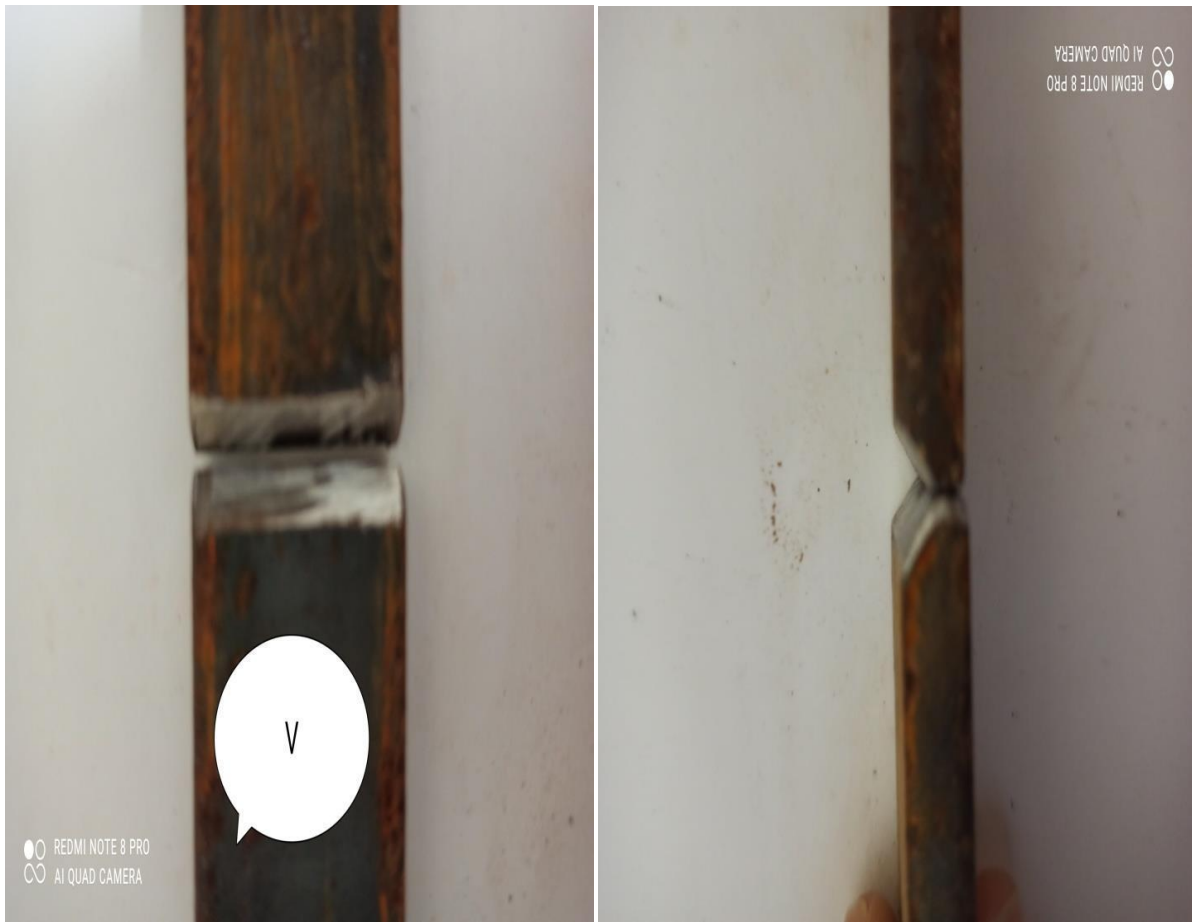


Figure (III.04) : Bords en V



Figure (III.05) : Bords en X



Figure (III.06) : Bords en O



Figure (III.07) : Bords en U

#### **III.4. Paramètres de soudage :**

Les opérations de soudage ont été réalisées dans l'atelier de soudage, au niveau de la société algérienne de zinc (ALZINC-Ghazaouet), par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant représente les principaux paramètres d'électrodes utilisés et les techniques d'exécution du joint de soudure.

- Intensité de soudage :
  - E6013 : (Diamètre d'électrode -1)  $\times 50 = (3.5-1) \times 50 = 110$  A  
Polarité directe pour assurer la pénétration.
  - ER70S-3 : En bout à bout : 20 à 25 Ampères par mm d'épaisseur. (20 $\times$ 8=160 A),(20 $\times$ 5=100 A) Courant continu, polarité directe, électrode en tungstène thorié (rouge).

**Tableau (III.04) :** paramètres de soudage.

Procédé de soudage	MB	MA	I(A)	Polarité
TIG	S235JR	ER70S-3	160	CC, Directe -
TIG	S235JR	ER70S-3	100	CC, Directe -
EE	S235JR	EE rutile E6013	110	Directe -



Figure (III.08) : soudage par TIG



### **III.5. Exécution des joints soudés :**

Il est à noter qu'ont laissé un jeu de l'ordre de 2,5mm entre les deux pièces à assembler, pour cette opération on doit utiliser les valeurs indiquées dans le tableau (III.04).

Après l'exécution de l'opération de soudage on obtient des pièces assemblées comme indiqué sur les figures (III.09) et (III.10).



Figure (III.09) : des pièces soudées par électrode enrobée



Figure (III.10) : photo des pièces soudées par TIG

### **III.6. Essai de traction :**

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique.





Figure (III.11) : Machine de traction utilisée.

- **Courbe de traction :**

Les essais de traction sont effectués au niveau du laboratoire **SDM** (science des matériaux) de l'université Abou bekr Belkaid de Tlemcen.

Afin de pouvoir utiliser les courbes de traction brutes, on doit les modifier de façon que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette,

On définit ainsi :

**La Contrainte** :  $\sigma = F / S_0$  unité : Pascal

**La Déformation** :  $\varepsilon = \Delta l / l_0$

$S_0$  et  $l_0$  sont les caractéristiques initiales de l'éprouvette,  $\Delta l$  est son allongement

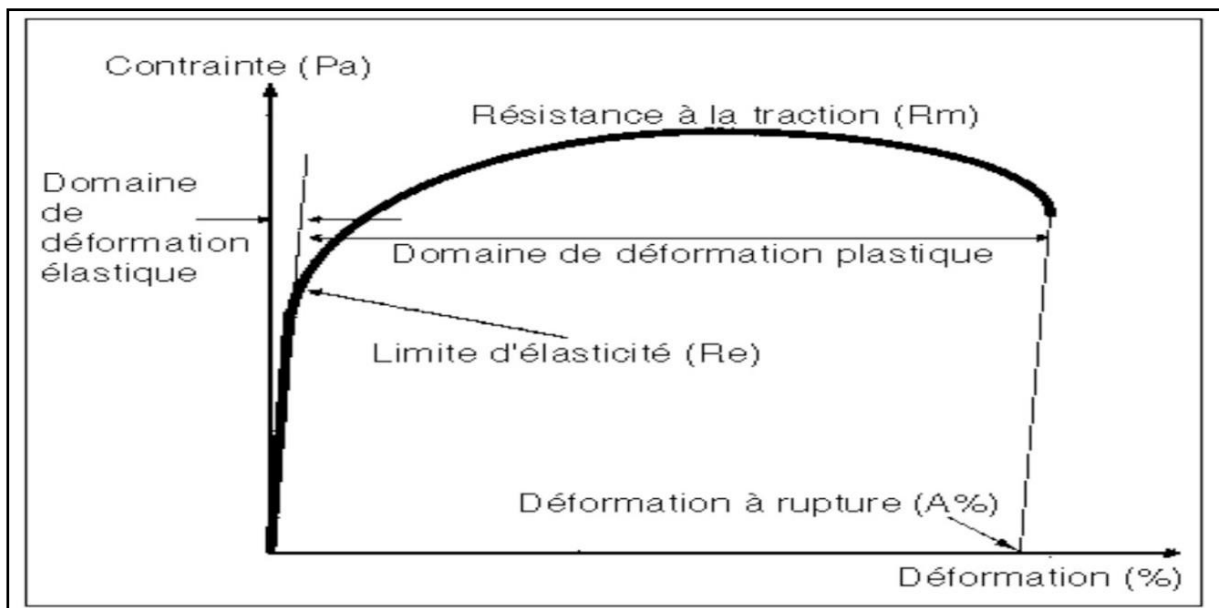


Figure (III.12): Courbe de traction.

- Le domaine de déformation élastique :

L'éprouvette a un comportement élastique linéaire et suit la loi de HOOKE:

$$\zeta = E \cdot \varepsilon$$

-E : est le module d'Young ou module d'élasticité.

- Le domaine de déformation plastique :

Dans ce domaine la déformation est irréversible : si l'on supprime la charge le matériau garde une déformation permanente. La courbe de traction passe par un maximum au-delà duquel la contrainte diminue bien que l'allongement continue de croître.

### III.7. Exécution de l'essai :

La machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande hydraulique.

Pour démarrer l'essai on clique sur :

- **mise à zéro** ► charge
- **mise à zéro** ► déplacement
- **démarrer**

S'il y'avait un problème, quel que soit. On peut stopper l'essai par une clique sur l'indice **STOP**.



Figure (III.13) : ordinateur pilote de la machine.



Figure (III.14) : logiciel utilisé.



Figure (III.15) : l'éprouvette placée dans la machine.

### **III.8. Conclusion :**

La partie expérimentale va nous permettre de définir et vérifier les différentes caractéristiques mécaniques des assemblages soudés par différents procédés de soudage ainsi que les différents types de joints de soudure, afin de pouvoir définir le meilleur type de joint de soudure et le meilleur procédé de soudage.

Dans le chapitre suivant nous présentons une analyse des différents résultats obtenus

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussions**

### **IV.1. Introduction :**

Nous présentons dans ce chapitre les différents résultats relatifs aux essais mécaniques appliqués sur la nuance du métal S235JR, Comme nous l'avons mentionné dans le troisième chapitre. Le but recherché est de déterminer l'influence du type de cordon sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées.

Nous avons choisi d'analyser des paramètres tel que :

- Influence de l'épaisseur des pièces soudées.
- Influence du type de soudage.
- Influence du type de cordon.

Avant d'entamer ces différents paramètres nous avons choisi de faire un essai de vérification des résultats. Pour cela nous avons appliqué l'essai de traction sur :

- deux éprouvettes (procédé de soudage :E.E ,épaisseur : 8mm, type de cordon : bord droit).
- deux éprouvettes (procédé de soudage :E.E ,épaisseur : 8mm, type de cordon : O).

**Tableau (IV.01) : résultat d'essai de validation.**

Type de cordon	Epaisseur (mm)	<b>Rm</b> N/mm <sup>2</sup>	<b>Fm</b> KN
Bord droit	N1- 8mm	391.185	93.884
	N3- 8mm	397.351	94.156
O	N1- 8mm	306.704	73.609
	N3- 8mm	318.404	73.810

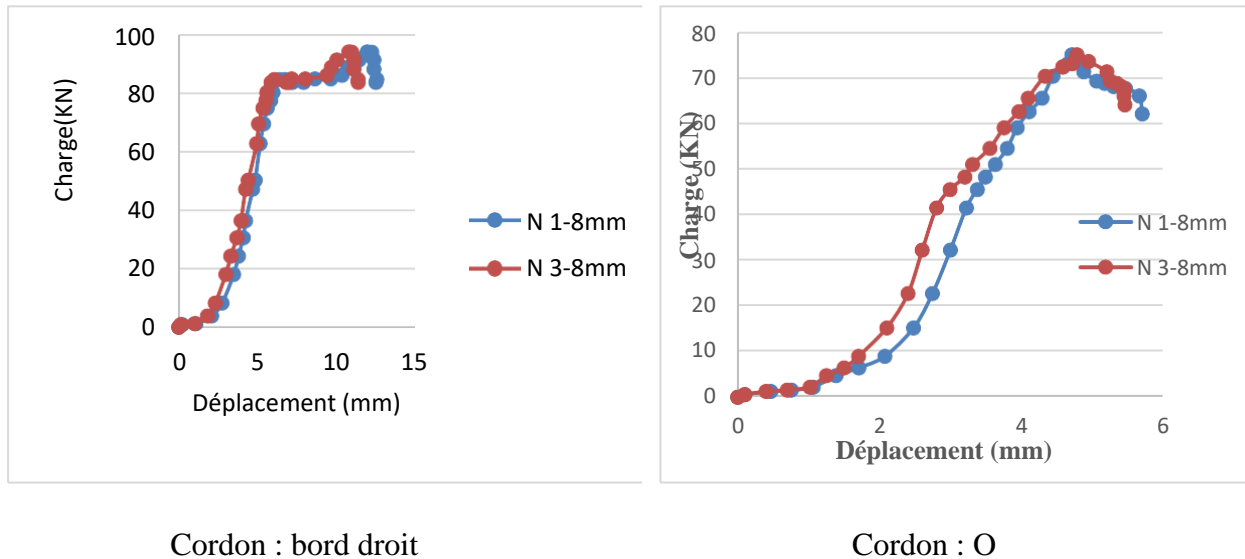


Figure (IV.01): Courbe de résultat des essais de vérification.

Après analyse des courbes de traction obtenues ainsi que les valeurs de  $F_m$  et  $R_m$ , on peut dire qu'il y a une convergence des résultats.

### IV.2. Caractérisation des soudures :

Pour caractériser les joints de soudure nous effectuons des essais de traction aux éprouvettes soudées, avec les paramètres mentionnés sur le tableau 5.2.

**Tableau (IV.02) :** Les paramètres de soudage des éprouvettes de caractérisation.

Procédé de soudage	MB	MA	Ep (mm)	I(A)	Polarité
TIG	S235JR	ER70S-3	8 et 5	120	CC, Directe
EE	S235JR	EE rutile E6013	8 et 5	110	Directe

### IV.3. Résultats d'essais de traction :

#### IV.3.1 Effet de l'épaisseur d'éprouvettes :

Afin de déterminer l'influence de l'épaisseur des éprouvettes sur le comportement mécanique des assemblages soudés, on possède à une comparaison des essais de traction des éprouvettes de 5mm et 8 mm d'épaisseur (tableau (IV.01)).



A) Soudage par E.E

**Tableau (IV.03):** résultat de l’essai de traction d’éprouvettes soudées par E.E pour différents épaisseurs.

Type de soudage	Type de joint	Epaisseur (mm)	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
N1: EE	Bord droit	5	444.934	66.760	56.015	373.431	56.198	374.656
N1: EE	Bord droit	8	391.185	93.884	84.077	350.322	84.885	353.689

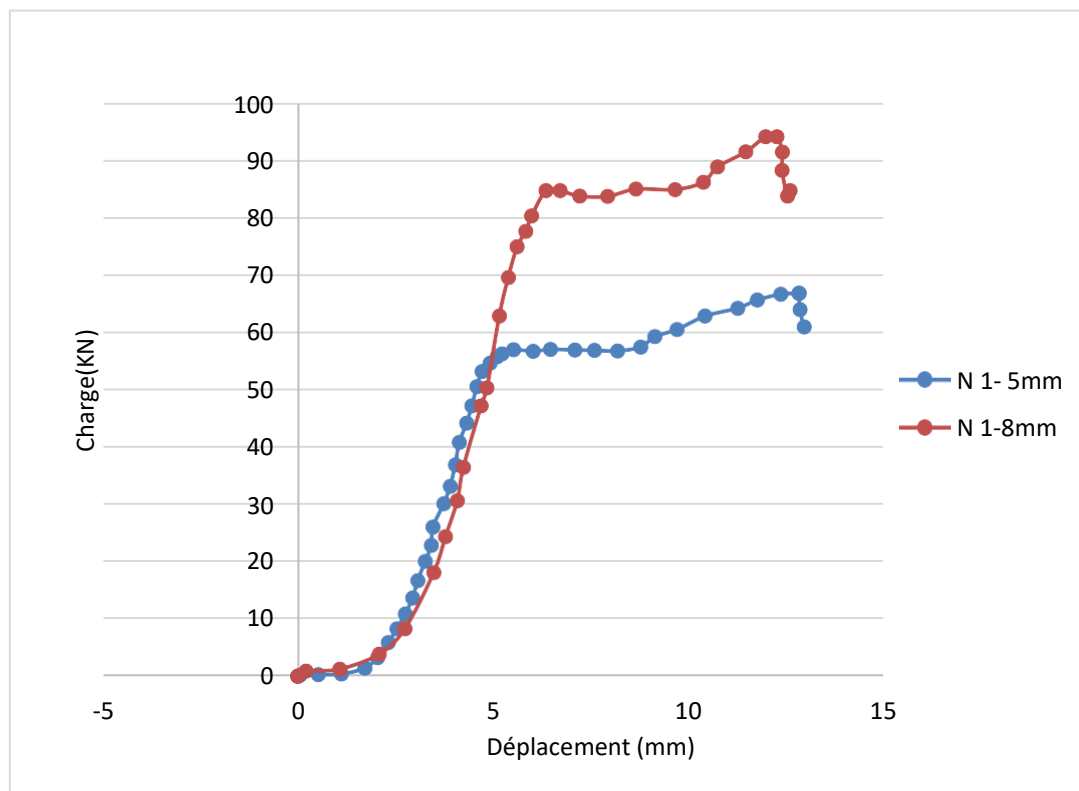


Figure (IV.02) : courbe de traction d’éprouvettes soudées par E.E (Epaisseur : 5mm et 8mm)

On remarque que pour une épaisseur de 8mm, l’éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=444.934 \text{ N/mm}^2$ , un déplacement maximal de 12 mm et une force maximale  $F_m=93.884 \text{ KN}$ , tandis que pour l’épaisseur de 5mm l’éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=391.185 \text{ N/mm}^2$ , un déplacement maximal de 13.5 mm et une force maximale  $F_m=66.760 \text{ KN}$ .

Dans le cas du soudage par EE On note une augmentation de 13.7 % de  $R_m$  et 40.6 % de  $F_m$  dans le cas de l’épaisseur de 8mm par rapport à 5mm





Figure (IV.03): Eprouvettes (5mm et 8mm) soudées par E.E après traction.

### B) Souder par TIG.

**Tableau (IV.04) :** Résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par TIG pour différents épaisseurs.

Type de soudage	Type de joint	Epaisseur (mm)	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
N2: TIG	B .d	5	379.308	56.896	54.656	364.371	54.913	366.085
N2: TIG	b.d	8	463.116	111.148	77.208	321.702	77.943	324.763

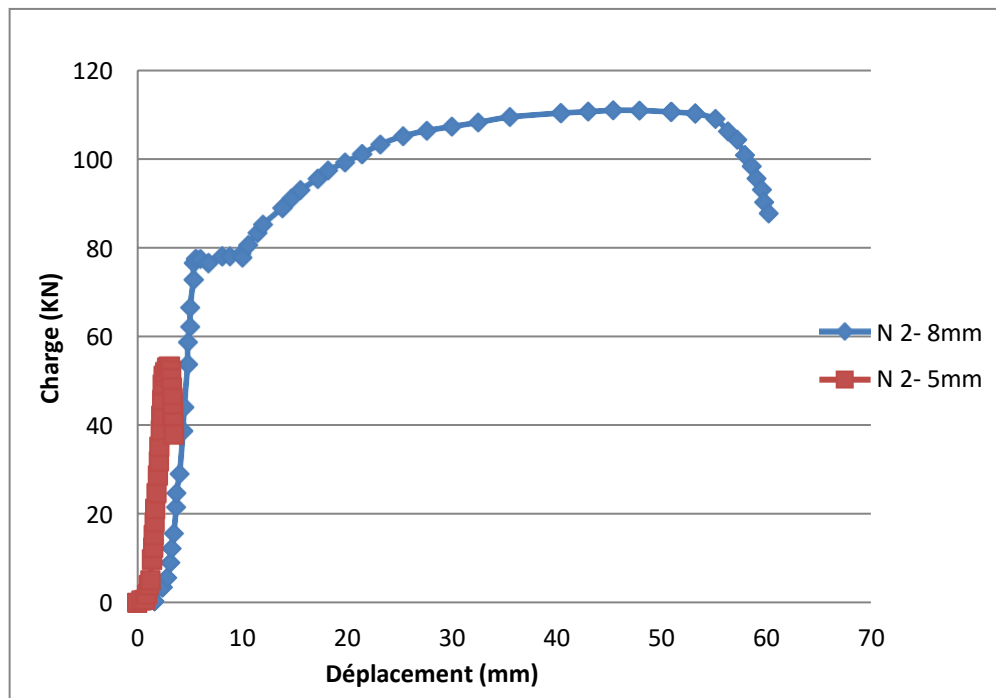


Figure (IV.04) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par TIG pour deux épaisseurs.

Dans le cas du soudage par TIG on remarque que pour une épaisseur de 8 mm, l'éprouvette a atteint une résistance maximale à la traction  $R_m=463.116 \text{ N/mm}^2$  et un déplacement maximal de 60 mm et une force maximale  $F_m=111.148 \text{ KN}$ , tandis que pour l'épaisseur de 5 mm l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=379.308 \text{ N/mm}^2$  et un déplacement maximal de 3.5 mm et  $F_m=56.896 \text{ KN}$ .

Dans le cas du soudage par TIG, On note une augmentation de 22 % de  $R_m$  et 95 % de  $F_m$  dans le cas de l'épaisseur de 8mm par rapport à 5mm



Figure (IV.05): Eprouvettes 5mm et 8mm souder par TIG après traction.

### IV.3.2 Effet de changement de procédé de soudage:

Afin de déterminer l'influence du type du procédé de soudage sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées, nous avons procédé à la comparaison des résultats des essais de traction des éprouvettes soudées par TIG et EE pour différents épaisseurs (5mm et 8mm).

#### A) Epaisseur de 5mm :

**Tableau (IV.05) :** résultat de l'essai de traction des éprouvettes d'épaisseur de 5mm soudées par TIG et EE.

Type de soudage	Type de joint	Epaisseur (mm)	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
N2 : TIG	Bord droit	5	379.308	56.896	54.656	364.371	54.913	366.085
N1 : E.E	Bord droit	5	444.934	66.760	56.015	373.431	56.198	374.656

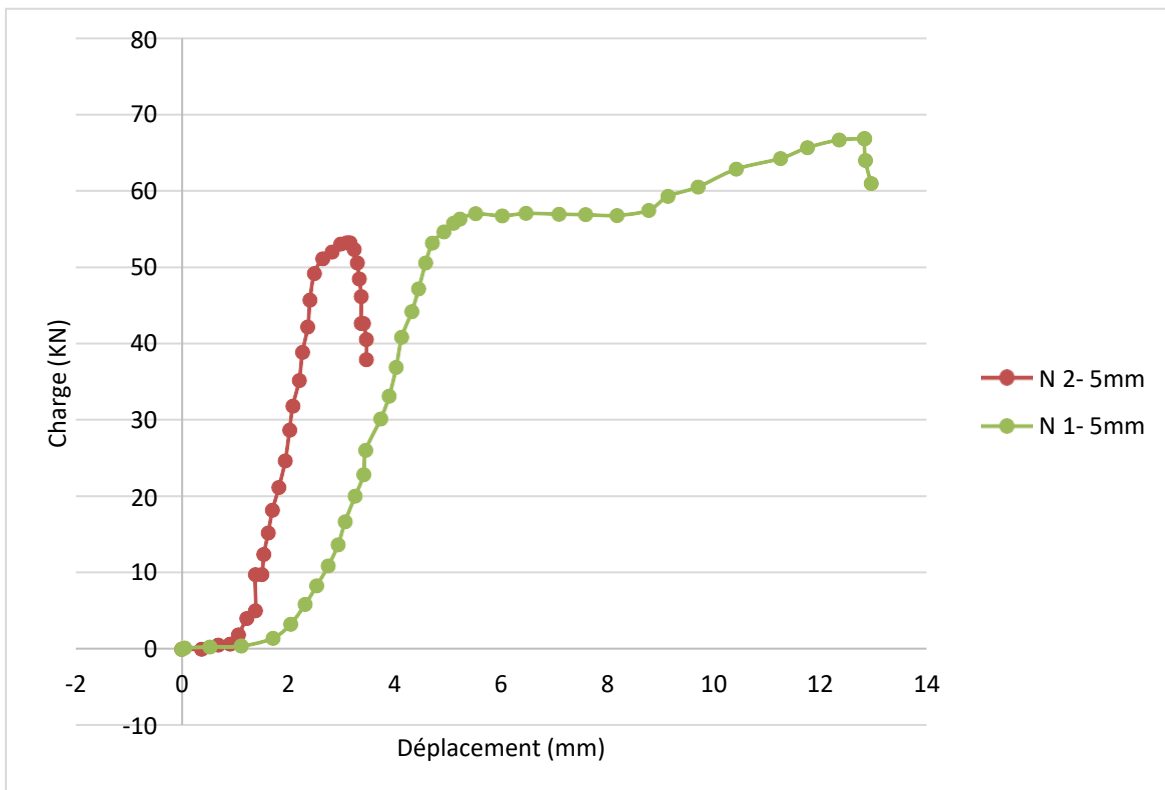


Figure (IV.06) : courbe de traction d'éprouvettes d'épaisseur de 5mm avec changement du procédé de soudage.

Dans le cas du soudage par TIG. On remarque que l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=379.308\text{N/mm}^2$  et un déplacement de 3.5 mm et une force maximale  $F_m=56.896\text{KN}$ , tandis que pour soudage avec E.E l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=444.934\text{N/mm}^2$  et un déplacement de 13 mm et  $F_m=66.760\text{KN}$ .

Pour une épaisseur de 5 mm, On note une augmentation de 17 % de  $R_m$  et  $F_m$  dans le cas du procédé de soudage par EE par rapport au soudage par TIG



Figure (IV.07): éprouvettes 5mm soudé par déférente procédé après traction.

### B) Pièce de 8mm :

**Tableau (IV.06) :** résultat de l'essai de traction d'éprouvettes d'épaisseurs de 8mm avec différents procédés de soudage.

Type de soudage	Type de joint	Epaisseur (mm)	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
N2: TIG	Bord droit	8	463.116	111.148	77.208	321.702	77.943	324.763
N1: E.E	Bord droit	8	391.185	93.884	84.077	350.322	84.885	353.689

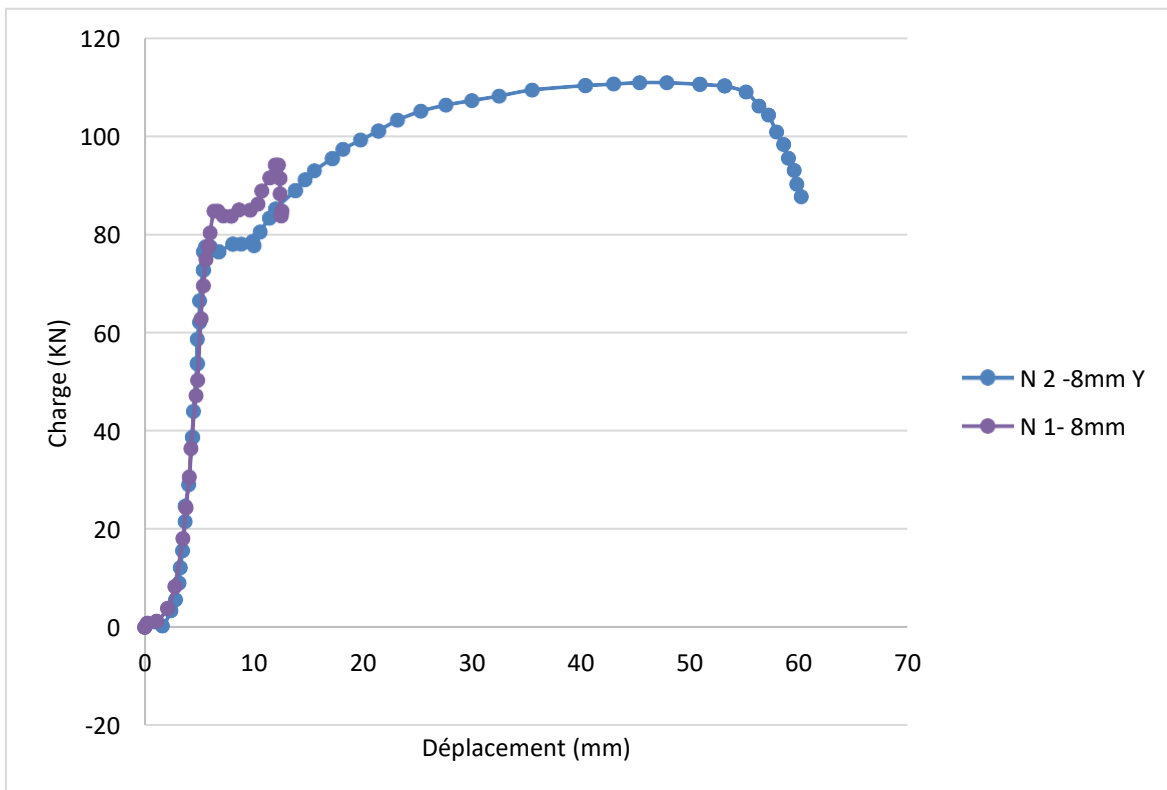


Figure (IV.08) : courbe de traction d'éprouvettes d'épaisseur de 8mm pour différents procédés de soudage

Dans le cas d'une épaisseur de 8 mm et en appliquant le procédé de soudage par TIG. On remarque que l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=463.116\text{N/mm}^2$  et un déplacement de 60 mm et une force maximale  $F_m=111.148\text{KN}$ , tandis que pour soudage avec E.E l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $391.185\text{N/mm}^2$  et un déplacement de 14 mm et  $F_m=93.884\text{KN}$ .

On note une augmentation de 18 % de  $R_m$  et  $F_m$  dans le cas du procédé de soudage par TIG par rapport au soudage par EE

A partir de là on peut dire que pour l'éprouvette d'épaisseur de 5 mm le procédé de soudage par EE est plus résistant au procédé par TIG, contrairement à l'éprouvette d'épaisseur de 8 mm, où le procédé de soudage par TIG est le plus résistant qu'au procédé de soudage par EE.

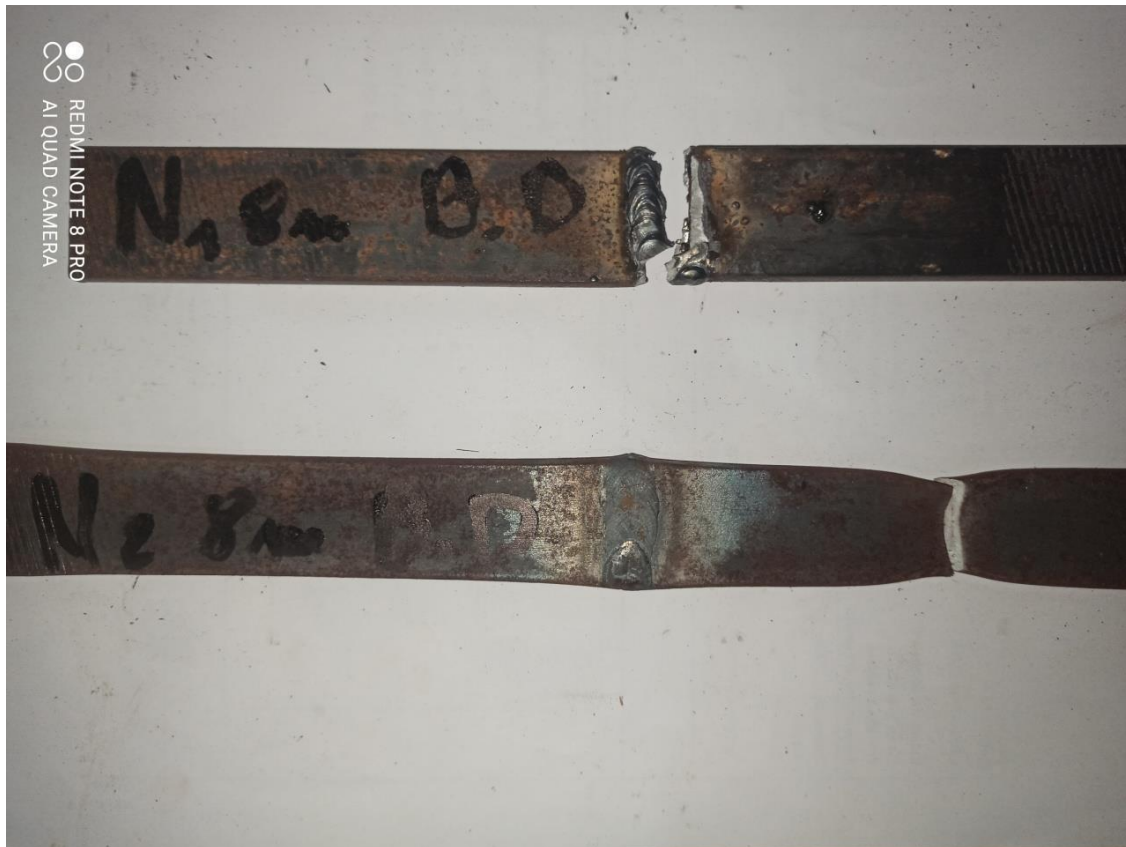


Figure (IV.09): éprouvettes 8mm soudées par différents procédés après traction.

### IV.3.3. Comparaison entre les différents procédés de soudage TIG et E.E pour différentes épaisseurs:

**Tableau (IV.07) :** résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par TIG et E.E, pour différentes épaisseurs

Type de soudage	Type de joint	Epaisseur (mm)	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
N1: E.E	Bord droit	5	444.934	66.760	56.015	373.431	56.198	374.656
N1: E.E	Bord droit	8	391.185	93.884	84.077	350.322	84.885	353.689
N2: TIG	Bord droit	5	379.308	56.896	54.656	364.371	54.913	366.085
N2: TIG	Bord droit	8	463.116	111.148	77.208	321.702	77.943	324.763

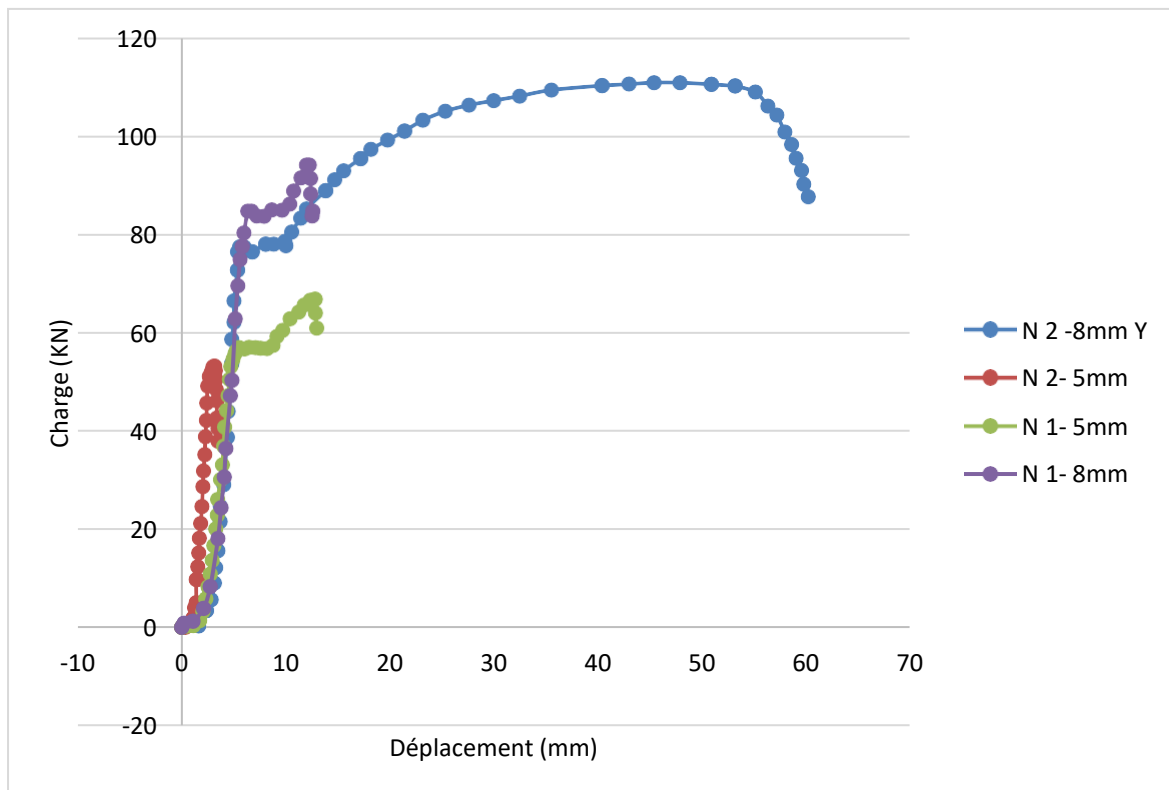


Figure (IV.10) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par TIG et E.E pour différentes épaisseurs

Dans ce cas on remarque que pour les talles minces le soudage par E.E mieux que le soudage par TIG, cependant dans grands épissure on utilise de préférence le soudage par TIG.

A partir des résultats précédents, on peut dire que pour des épaisseurs minces, le soudage par E.E est mieux résistant que le soudage par TIG, contrairement aux grandes épaisseurs ou le soudage par TIG est plus résistant au soudage par EE.





Figure (IV.11): éprouvettes 8mm et 5mm soudées par différents procédés de soudage après traction.

#### IV.3.4. L'effet du changement de type de joint :

Afin de déterminer l'influence du type du joint de soudure sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées, nous avons procédé à la comparaison des résultats des essais de traction des éprouvettes de 8 mm soudées par EE pour différents types de joints

Pour cela on a choisi d'appliquer des chanfreins en X, en V, en U, en O, et Bord droit.

**Tableau (IV.08) :** résultat de l'essai de traction d'éprouvettes souder par E.E pour différents type de joint (Bord droit, X, V)

Type de soudage	Type de joint	épaisseur	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
E.E	Bord droit	8	391.185	93.884	84.077	350.322	84.885	353.689
E.E	X	8	380.472	91.313	76.658	319.406	78.531	327.212
E.E	V	8	384.298	92.231	75.960	316.498	76.070	316.958

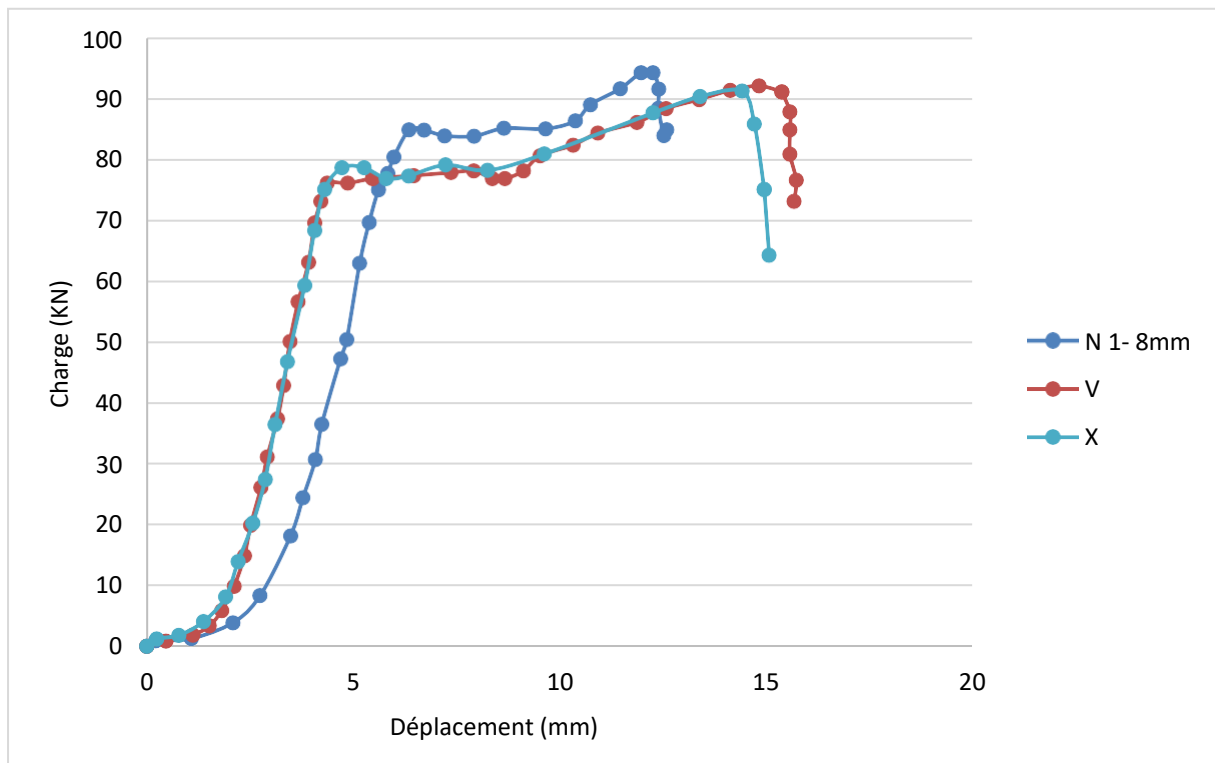


Figure (IV.12) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joint (B.d, X, V).

Après visualisation des résultats de l'essai de traction des différentes éprouvettes, on remarque que dans le cas d'un :

- Bord droit : l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m = 391.185 \text{ N/mm}^2$ , un déplacement de 14 mm et une force maximale  $F_m = 93.884 \text{ KN}$ .
- X : l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m = 380.472 \text{ N/mm}^2$  et un déplacement de 15 mm et une force maximale  $F_m = 91.313 \text{ KN}$
- V : l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m = 384.298 \text{ N/mm}^2$  et un déplacement de 16 mm et une force maximale  $F_m = 92.231 \text{ KN}$

Tableau (IV.09) : résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joint (B.d), O, U.

Type de soudage	Type de joint	épaisseur	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$F_m$ KN	$F_{el}$ KN	$R_{el}$ N/mm <sup>2</sup>	$F_{eh}$ KN	$R_{eh}$ N/mm <sup>2</sup>
E.E	Bord droit	8	391.185	93.884	84.077	350.322	84.885	353.689
E.E	O	8	306.704	73.609	73.609	306.703	73.609	306.703
E.E	U	8	356.902	85.657	75.445	314.356	75.923	316.345

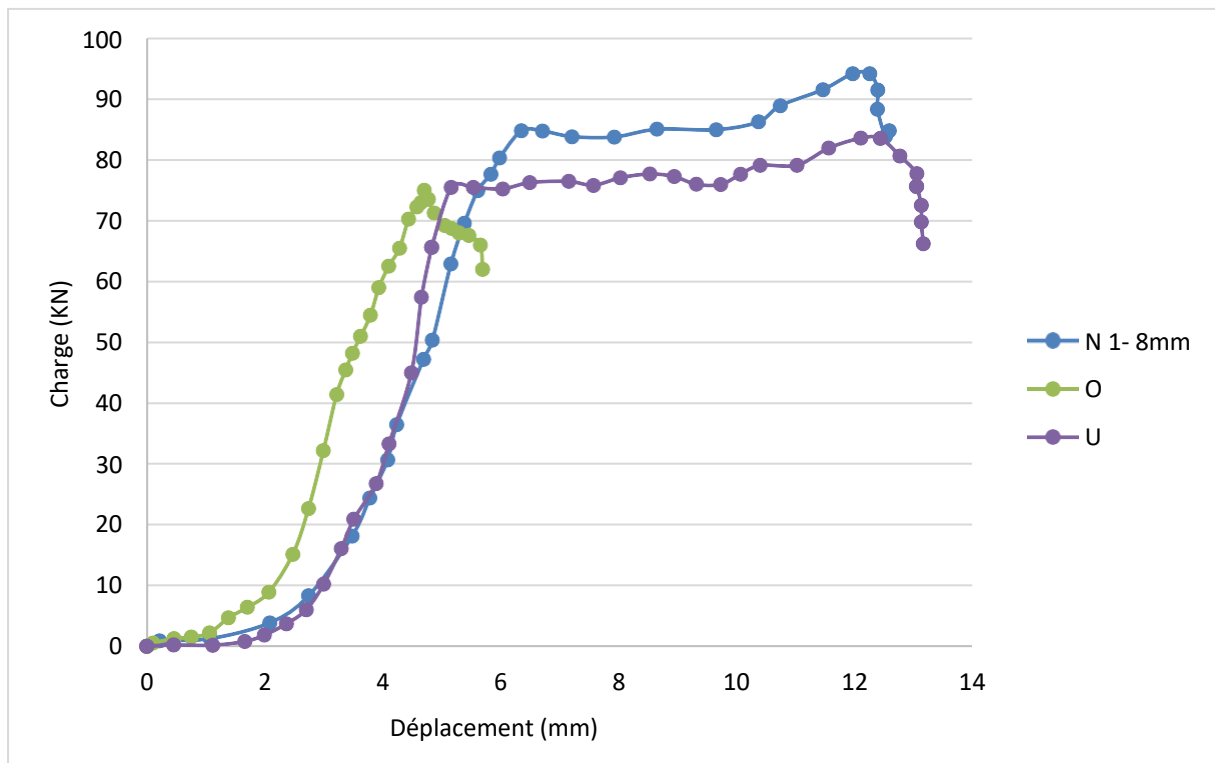


Figure (IV.13) : courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joints (B.d, O, U).

Après visualisation des résultats de l'essai de traction des différentes éprouvettes, on remarque que dans le cas d'un :

- Bord droit : l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=391.185\text{N/mm}^2$  , un déplacement de 14 mm et une force maximale  $F_m=93.884\text{KN}$
- U : l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=356.902\text{N/mm}^2$ , un déplacement de 13mm et une force maximale  $F_m=85.657\text{KN}$
- O : l'éprouvette a atteint une résistance à la traction  $R_m=306.704\text{N/mm}^2$ , un déplacement de 6mm et une force maximale  $F_m=73.609\text{KN}$

**Tableau (IV.10) :** résultat de l'essai de traction d'éprouvettes soudées pour différents types de joints (B.d, O, U, V, X).

Type de soudage	Type de joint	épaisseur	Rm N/mm <sup>2</sup>	Fm KN	Fel KN	Rel N/mm <sup>2</sup>	Feh KN	Reh N/mm <sup>2</sup>
E.E	Bord droit	8	391.185	93.884	84.077	350.322	84.885	353.689
E.E	X	8	380.472	91.313	76.658	319.406	78.531	327.212
E.E	V	8	384.298	92.231	75.960	316.498	76.070	316.958
E.E	O	8	306.704	73.609	73.609	306.703	73.609	306.703
E.E	U	8	356.902	85.657	75.445	314.356	75.923	316.345

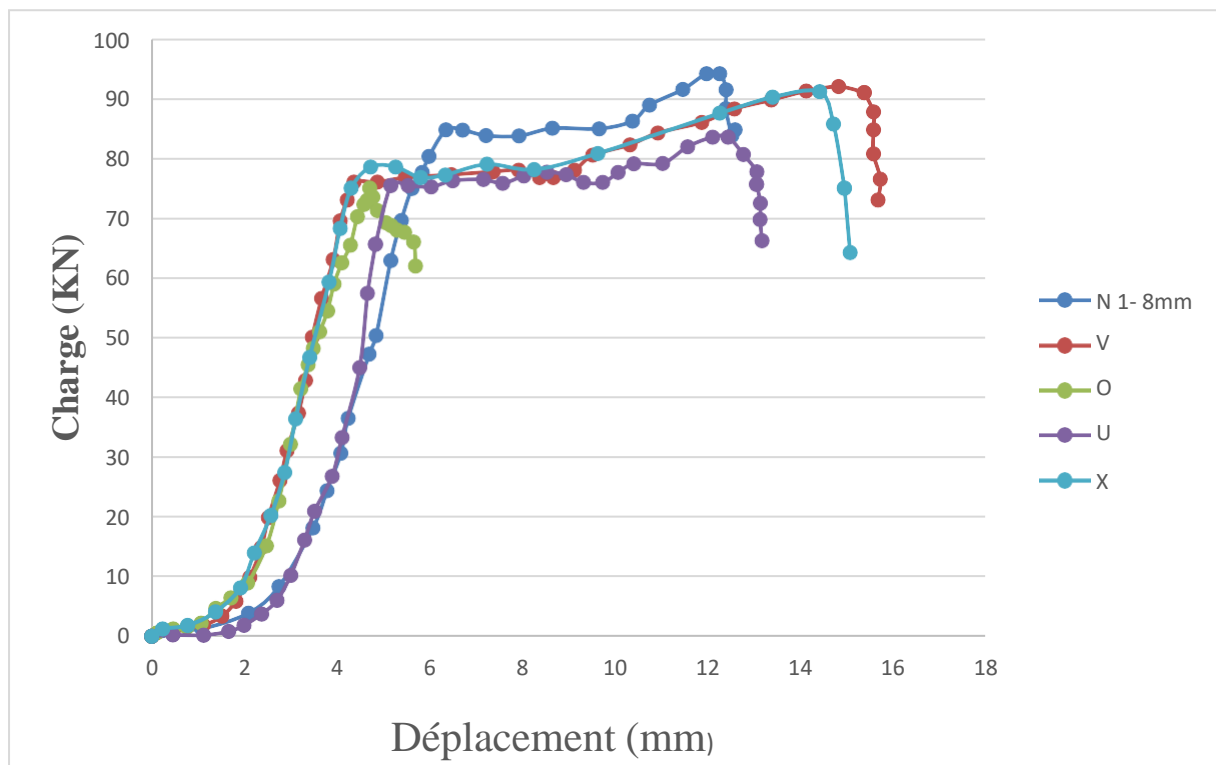


Figure (IV.14) : Courbe de traction d'éprouvettes soudées par E.E pour différents types de joints (B.d, O, U, V, X).

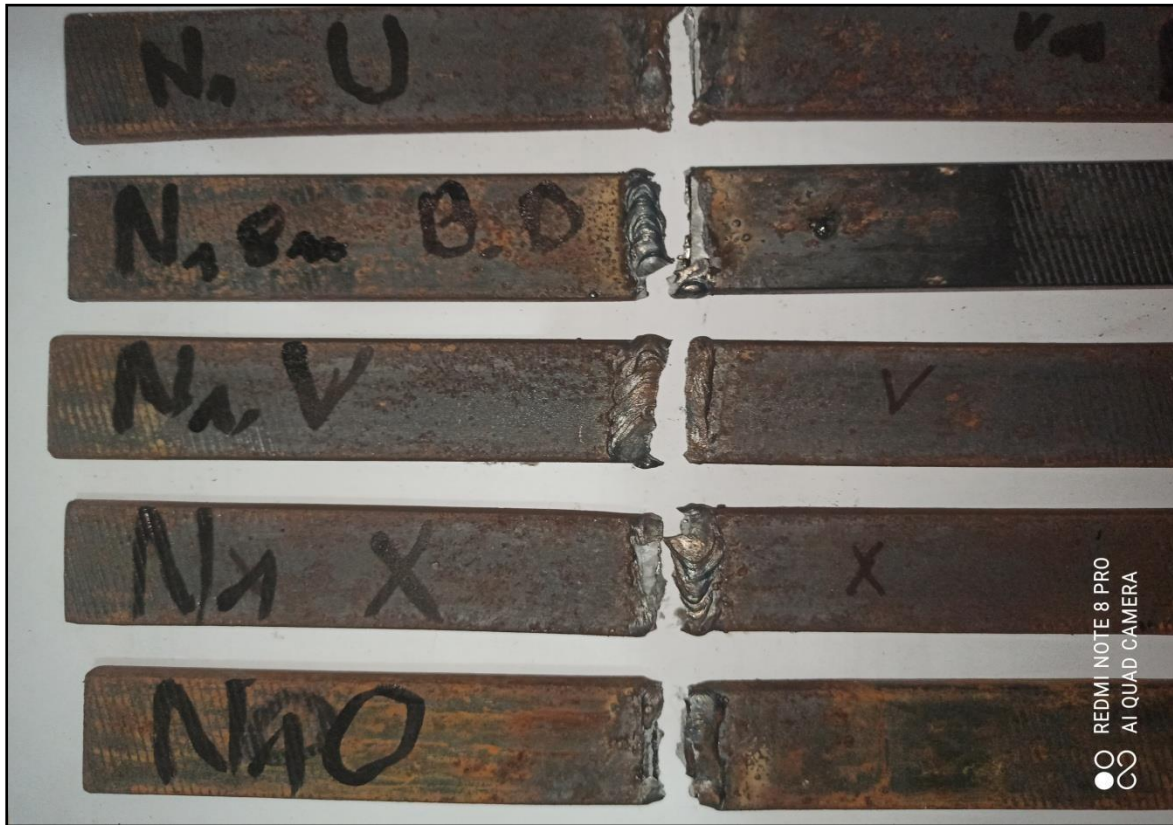


Figure (IV.15): éprouvettes 8mm soudées par E.E avec différents type de joint après traction.

Après analyse des différents résultats des essais de traction appliquée sur les éprouvettes avec différents types de joints, on peut dire que les éprouvettes avec les joints de type ( X, V et bord droit) sont plus résistantes que celles avec des joints type ( U et O).

### **Conclusion générale**

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension des différents phénomènes rencontrés lors du changement des types des cordons des soudures des pièces en acier S235JR. 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 par E.E, et TIG. Nous nous sommes proposé d'étudier le comportement mécanique des pièces soudées

Après la réalisation des pièces soudées par procédés de soudage à l'arc électrique EE, et TIG, en faisant varier les types de cordon, notre travail visait en premier lieu à la caractérisation mécanique des pièces soudées. L'objectif étant d'analyser l'influence de l'épaisseur des pièces, procédé du soudage et la forme du cordon sur les caractéristiques mécaniques des pièces soudées.

Pour ce faire, la mise en œuvre des techniques de caractérisation par essais de traction a été indispensable. Les essais menés consolidés par différentes analyses ont confirmé un certain nombre de résultats, à savoir :

- L'épaisseur de la pièce soudée influe sur les caractéristiques mécaniques de la structure.
- Le procédé de soudage influe sur les caractéristiques mécaniques de la pièce soudée.
- Pour des épaisseurs minces, le soudage par E.E est mieux résistant que le soudage par TIG, contrairement aux grandes épaisseurs ou le soudage par TIG est plus résistant au soudage par EE.
- Le type de cordon influe sur les caractéristiques mécaniques des pièces soudées
- Les pièces soudées avec des cordons de type (X, V et bord droit) sont plus résistantes que celles avec des joints type (U et O).

La fiabilité d'une structure soudée dépend de plusieurs facteurs :

- Le choix d'un métal de base avec des caractéristiques répondant aux exigences d'une telle construction, une limite élastique élevée et une bonne résistance à la rupture fragile.
- Un choix convenable de tous les paramètres de soudage.
- Une préparation judicieuse des pièces à assembler.
- Le choix d'un métal d'apport qui permet de donner au cordon la composition désirée, avec d'excellentes qualités mécaniques de résistance au choc et aux déformations.
- Le bon choix du type de cordon

### Références bibliographiques

- [1]-**MOUSSAI A. Toufik** "Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des cordons de soudure", Université de M'sila, Mémoire Magister **2004**.
- [2]-**P.GROSTABUSSIAT Sophie**, "Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux", INSA Lyon, **Décembre 2000**
- [3]- **H.Granjon**, "Bases métallurgiques de soudage", publications de soudage et de ses applications **1995**.
- [4]- **R.Baus. W, Chaprau**, "Application de soudage aux constructions" ,**1979**.
- [5]- [www.soudage.com](http://www.soudage.com)
- [6]- **R.Baus. W, Chaprau**, Application de soudage aux constructions ,**1979**.
- [7]- **V.RYBARCOV**, « le soudage et le coupage des métaux».2eme edition.**1983**.edition mir.moscou.
- [8]- **BENEDDEB Mostefa**, "Étude les défauts de soudage des pipelines", Mémoire deMaster, Université de Biskra 2012.
- [9]- **B. Hichem**, "Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers", **Juin 2013**
- [10] - Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; [www.angers.ensam.fr](http://www.angers.ensam.fr)
- [11] - **Jean.Maton**, "Technologie du soudage", édition 2014. Disponible sur : <https://www.rocdacier.com/definition-soudage-soudabilite-metaux/> >, consulté le **12/08/2017**.
- [12] - **M. Marc BENTI**. "Dossier professeur métallurgie de soudage ".Centre nationalde ressources Structures métalliques. St Denis.



## Références bibliographiques

---

- [13] - Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), "Soudage et assemblage-soudage, Guide auto apprentissage", Québec, Aout 2010.
- [14] - **Prof. Dr. Sc. Techn. Peter Seyffarth**: Warmeausbeetug brin Schweiben Wilhem – Pieck unversitat Rostock 2 LEHRBRIEF.Ed 1980.
- [15] - **R. Vzrisellaz** Soudage, Elément de conception et de réalisation .Dunode 1982.
- [16] - **H. GRANJON**. Bases métallurgiques du soudage .2eme édition fév. 1995
- [17] - **G.Beranger, G.Henry, G. Sanz**. « livre de l'acier »,ED.Sollac, 1996.
- [18] - **K. Hulka**, "HSLA large diameter pipe plate from standard production to X80/X100", Niobium Information 13/39, 1997
- [19] - "High strength structural and high-strength lowalloy steels", Metals Handbook, Tenth edition, 1990.
- [20] - **NOUREDDINE Mustapha**, "Évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques de l'acier HSLA- x70 lors des réparations par soudage".
- [21] - [www.materialwelding.com/types-de-joints-de-soudure-symboles-et-images](http://www.materialwelding.com/types-de-joints-de-soudure-symboles-et-images)
- [22] - **Klas.Weman**, "Aide mémoire de l'ingénieur, procédés de soudage ".1ére Edition DUNOD.2005.