

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PAR :

**AMIRA MOHAMED EL AMINE**

**&**

**MEDJOU DJ LYES**

## Thème

---

**Caractérisation mécanique d'un joint de soudure obtenu par procédé  
TIG**

---

Soutenu le 06/07/2021 devant le jury composé de :

Mr. YOUNES RASSIM	Rapporteur
Mr. BRADAI	Président
Mr. AMARI	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2020-2021

# Remerciements

# *Remerciements*

Nos vifs remerciements sont destinés à Mr R. YOUNES, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements aussi sont destinés à Mr I. AGGOUNE, pour son aide, au sein de la section Gaz au niveau de NAFTAL et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier le personnel du hall de technologie de l'université de Bejaia, et les travailleurs de l'ENMTP où nous avons effectué nos tests.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

# *Dédicace*

# Dédicace

*On dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :*

*À ma chère mère, comme expression de ma profonde reconnaissance, à la femme la plus belle de ma vie*

*À mon père, tu étais toujours présent à mes côtés pour me soutenir, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection*

- *À mes frères, Ayman et Sohaib*
- *À ma sœur, wafa*
- *À mes grands-parents, en particulier mon grand-père paternel El Aid qu'il repose en paix*
- *À mes tantes.*
- *À tous les membres de ma famille*
- *À mes meilleures amies*
- *À tous les camarades de ma section.*

*Mr Medjoudj Lyes*

## Remerciements

---

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents Noureddine et Fadia qui m'ont soutenue durant ce stage*

*A ma sœur Amina*

*A mon petit frère Samy*

*En particulier à mon neveu : Iyad Zazoua*

*A la mémoire de mon oncle : Amira Abd Errahim, qu'il repose en paix*

*A la mémoire de mes grands-parents paternel : Amira Amar et Boumhed Zahia, qu'ils reposent en paix*

*A la mémoire de mon grand-père maternel : Zazoua Abd Errahmane, qu'il repose en paix*

*A ma grand-mère Boumhed Fatima que dieu la bénisse*

*A toute ma famille*

*A mes meilleurs amis et à mes camarades de la section et à tous mes amis sans exception*

*Mr Amira Mohamed El Amine*

# Sommaire

# Sommaire

---

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : généralité sur Le soudage</b>	
I-Introduction.....	3
I.2 Les procédés de soudage.....	3
I.2.1 soudage a l'électrode enrobée.....	3
I.2.2 Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG.....	4
I.3 Éléments sur les phénomènes physiques du soudage.....	6
I.3.1 Effet thermique.....	6
I.3.1.1 Les déformations en soudage.....	7
I.4 Les contraintes résiduelles.....	7
I.4.1 Contraintes et déformations dans le sens longitudinal.....	8
I.4.2 Contraintes et déformations transversales.....	8
I.4.3 Effet métallurgique.....	9
I.4.3.1 Introduction à la métallurgie du soudage.....	9
I.5 Modifications microstructurales en zone affectée par la chaleur et les conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage.....	10
I.5.1 Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur.....	11
I.5.2 Transformations en ZAC lors du chauffage.....	12
I.5.3 Transformations en ZAC lors du refroidissement.....	12
I.5.4 Transfert du métal dans l'arc soudage.....	13
I.5.4.1 Transfert par court-circuit.....	13
I.6 Transfert globulaire.....	14
I.7 Transfert par pulvérisation axiale (spray).....	14
I.2 Les défauts des soudages.....	15
I .2.1 Introduction.....	15
I .2.2 Principaux Défauts de soudage.....	15
I.2.3 Les Fissures.....	16
I.2.3.1 orientations des fissures.....	16
I.2.3.2 Les fissures longitudinales.....	17
I.2.3.3 Les fissures transversales.....	17
I.2.4 Types des fissures.....	18
I.2.4.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks).....	19

## Sommaire

---

I.2.4.2 Fissures de Racine.....	19
I.2.4.3 Fissures de Cratère.....	20
II.2.4.4 Fissures au raccordement.....	20
I.2.4.5 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	21
I.2.4.6 Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	22
I.2.5 Fissure à chaud (ou de solidification).....	23
I.2.6. Fissures à froid.....	24
I.2.7 Manque de pénétration.....	25
I.2.8 Manque de fusion.....	26
I.2.8.1 Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	26
I.2. 8.2 Manque de fusion entre passes.....	27
I.2.8.3 Manque de fusion à la racine de la soudure.....	28
I.2.9 Les inclusions gazeuses.....	28
I.2.9.1 Porosités vermiculaires .....	28
I.2.9.2 Porosités de reprise.....	29
I.2.9.3 Porosités uniformes.....	29
I.2.10 Surépaisseur ou convexité excessive.....	29
I.2.11 Effondrements ou concavité excessive.....	30
I.2.12 Débordement du cordon.....	31

### **Chapitre II : Matériaux et Méthodes expérimentale**

II. Introduction.....	32
II.1 Matériaux utilisés.....	32
II.1.1 Acier S335.....	32
II.1.2 Inox 18.8 (acier inoxydable).....	33
II.1.3 Procédé TIG usité.....	33
II.1.4 Baguette de soudure utilisée (Rutile) : W c est tungstène.....	34
II.2 Paramètre de soudage.....	35
II.3 Présentation des échantillons.....	36
II.3.1.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques.....	36
II.3.1.1.1 Fraisage des maquettes.....	36
II.3.1.1.2 Découpage de plaquettes.....	36
II.3.1.1.3 Polissage.....	36

## Sommaire

---

II.4 Observation Métallographique.....	37
II.5 Caractérisation mécanique.....	38
II.5.1 Essais de dureté par pénétration.....	38
II.5.1.2 Principe de l'essai.....	38
II.5.1.3 Machine d'essais.....	39
II.6 Essai de résilience (Charpy).....	39
II.6.1 But de l'essai.....	39
II.6.2 Mouton Charpy.....	40

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1 Introduction.....	42
III.2 Images microscopiques.....	42
III.3 La taille des grains.....	44
III.4 Résultats de la résilience.....	45
III.4.1 Justification des résultats.....	46
III.5 Les résultats de la dureté.....	47

Conclusion générale  
Références bibliographiques

# Sommaire

---

# Sommaire

---

# Liste des figures et des tableaux

## Liste des figures et liste des tableaux

---

<b>Figure I.1</b> : Structure du système de soudage à l'électrode.....	4
<b>Figure I.2</b> : Structure du système de soudage MIG MAG.....	6
<b>Figure I.3</b> : Effet de cintrage.....	8
<b>Figure I.4</b> : Effet de flambage.....	8
<b>Figure I.5</b> : Contraintes et déformations transversales.....	9
<b>Figure I.6</b> : Les différentes zones de soudure.....	15
<b>Figure I.7</b> : La fissure longitudinale.....	17
<b>Figure I.8</b> : la fissure transversale.....	17
<b>Figure I.9</b> : Les types de fissure.....	18
<b>Figure I.10</b> : Fissure de Gorge (Throat Cracks).....	19
<b>Figure I.11</b> : fissure de racine.....	19
<b>Figure I.12</b> : Fissure de Cratère.....	20
<b>Figure I.13</b> : Fissure au raccordement.....	21
<b>Figure I.14</b> : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement.....	22
<b>Figure I.15</b> : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	23
<b>Figure I.16</b> : fissure à chaud.....	24
<b>Figure I.17</b> : Types de fissures à froid.....	25
<b>Figure I.18</b> : Manque de pénétration.....	25
<b>Figure I.19</b> : Localisations possibles des manques de fusion.....	26
<b>Figure I.20</b> : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	27
<b>Figure I.21</b> : Manque de fusion entre passes.....	27
<b>Figure I.22</b> : Manque de fusion à la racine de la soudure.....	28
<b>Figure I.23</b> : inclusions gazeuses porosités vermiculaires.....	29
<b>Figure I.24</b> : inclusions gazeuses porosités uniformes.....	29
<b>Figure I.25</b> : convexité excessive et surépaisseur excessive.....	30
<b>Figure I.26</b> : effondrement à la racine.....	30
<b>Figure I.27</b> : recouvrements non fusionnés (Débordements).....	31
<b>Figure II.1</b> : Poste à souder TIG.....	34
<b>Figure II.2</b> : schéma de principe TIG.....	35

## Liste des figures et liste des tableaux

---

<b>Figure II.3</b> : 3 éprouvettes en acier.....	36
<b>Figure II.4</b> : 3 éprouvettes en inox.....	36
<b>Figure II.5</b> : Microscope optique.....	38
<b>Figure II.6</b> : Machine d'essais de dureté.....	39
<b>Figure II.7</b> : Pendule de Charpy + schéma de fonctionnement.....	40
<b>Figure III.a.1</b> : Inox.....	42
<b>Figure III.b.2</b> : Inox (joint de soudure).....	42
<b>Figure III.c.3</b> : Inox.....	42
<b>Figure III.d.4</b> : Inox (joint de soudure).....	42
<b>Figure III.a.5</b> : acier.....	43
<b>Figure III.b.6</b> : Acier (joint de soudure).....	43
<b>Figure III.c.7</b> : Acier.....	43
<b>Figure III.d.8</b> : Acier (joint de soudure).....	43
<b>Figure III.9</b> : Histogramme des résultats de la résilience.....	46
<b>Figure III.10</b> : Dureté HRC Acier A60.....	48
<b>Figure III.11</b> : Histogramme des valeurs moyennes HRC.....	48
<b>Figure III.12</b> : Dureté HRC Inox 18.8.....	49
<b>Figure III.13</b> . Histogramme des valeurs moyennes HRC.....	50
<b>Figure III.14</b> . : Dureté HRC Acier et Inox.....	51

### Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Certificat d'analyse chimique et mécanique d'acier A60.....	32
<b>Tableau II.2</b> : Certificat d'analyse chimique et mécanique de l'Inox 18.8.....	33
<b>Tableau II.3</b> : Paramètres de soudage TIG.....	35
<b>Tableau III.1</b> : diamètre des grains.....	44
<b>Tableau III.2</b> : les valeurs de la résilience en J/Cm <sup>2</sup> des deux éprouvettes.....	45
<b>Tableau III.3</b> : Justification des résultats de résilience.....	46
<b>Tableau III.4</b> : Les valeurs de l'essai de dureté HRC (Rockwell).....	47

## Liste des figures et liste des tableaux

---

## Liste des figures et liste des tableaux

---

## Liste d'abréviation

---

MIG : Métal Inerte Gaz.

MAG : Métal Active gaz.

ZAC : la Zone Affectée par la Chaleur (ZAC).

ZAT : Zone affectée thermiquement.

MB : Métal de base.

MF : Métal fondu.

ZL : Zone de liaison.

TIG : tungstèn Inerte Gaz

HRC : dureté Rockwell

ISO : organisation internationale de normalisation

ENMTP : Entreprise Nationale des Matériels de Travaux Publics

# Introduction générale

# Introduction générale

---

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante Dans toutes les branches d'industrie et la construction des bateaux, trains, automobiles, ponts, réservoir, grues et tant d'autres machines qui ne seraient être construites sans le recours au 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, soit par intervention de pression, soit 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.

Il existe un très grand nombre de procédés de soudage dont les principes sont différents. (Soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électrons, soudage au plasma, soudage par laser,...).

Dans notre cas d'étude nous avons utilisé le soudage à l'arc électrique TIG.

Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin. TIG est un acronyme de Tungstène Inert Gas, ou Tungstène. (Tungstène) désigne l'électrode et Inert Gas (Gaz inerte) le type de plasmagène utilisé.

L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de gaz rares tels que l'argon et hélium. De fait, l'arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l'arc s'appuie sur l'élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d'un courant électrique alternatif.

Le but de ce mémoire de master est d'étudier les caractérisations mécaniques d'un joint de soudure obtenu parprocédé TIG sur deux éprouvettes en acier A60 et acier inoxydable 18.8 entaillé en V

## Introduction générale

---

Notre travail se compose d'une introduction générale et de trois chapitres successifs :

- ❖ Le premier chapitre fera l'œuvre d'une étude bibliographique sur les types de soudage.
- ❖ Le deuxième chapitre portera sur, la présentation des matériaux utilisés, la préparation des échantillons, les techniques d'analyse utilisées.
- ❖ Le troisième chapitre rassemble les résultats obtenus et leurs discussions enfin, en terminera par une conclusion générale.

# Chapitre I :

## Généralité sur Le soudage

## **I. LE SOUDAGE**

### **I.1 Introduction**

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. L'évolution de la technique est intervenue à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés, la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder.

Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder.

Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la Première Guerre mondiale.

### **I.2 Les procédés de soudage**

#### **I.2.1 Soudage à l'électrode enrobée**

Le soudage à l'électrode (également soudage manuel à l'arc électrique, soudage à l'électrode enrobée ou soudage MMA) est généralement le premier procès de soudage que les soudeurs découvrent lors de leur formation.

Il est facile à apprendre et fournit déjà un aperçu du mode de fonctionnement des systèmes de soudage et du comportement des métaux soumis à une tension électrique.

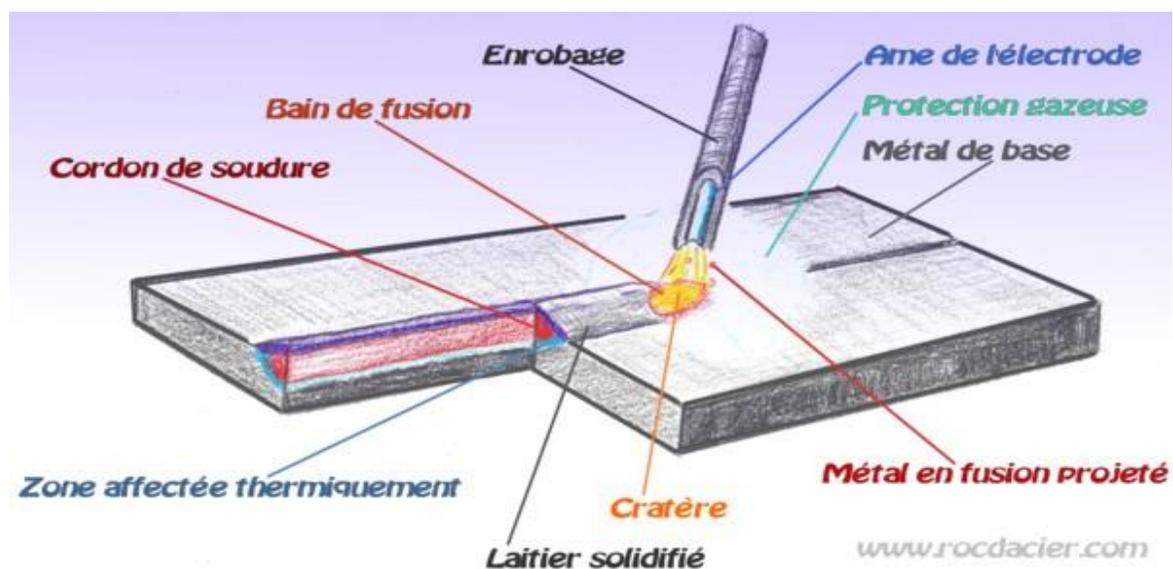
En principe, presque tous les matériaux peuvent être soudés à l'électrode, ce mode opératoire est principalement utilisé dans la construction métallique et la construction de canalisations, mais également dans l'artisanat et l'industrie métallurgique.

Le soudage à l'électrode enrobée permet de réaliser tous les types de soudures, dans toutes les positions : positions contraignantes, au-dessus de la tête, soudures ascendantes ou descendantes.

En outre, le soudeur ne dépend pas des gaz de protection et peut facilement travailler en plein air, même en cas de conditions météorologiques défavorables, comme le vent ou la pluie.

Le soudage manuel à l'arc électrique requiert une tension faible et une intensité de courant élevée. Le système de soudage transforme la tension du secteur existante en une tension de soudage nettement plus faible. En parallèle, il délivre l'intensité de courant nécessaire, qui permet également de paramétrer et de réguler la source de courant.

Lors d'un soudage à l'électrode enrobée, l'intensité de courant est le paramètre le plus important pour la qualité des assemblages. Elle doit donc rester constante au maximum, même lorsque la longueur de l'arc change. [1]



**Figure I.1 :** Structure du système de soudage à l'électrode.

### I.2.2 Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG

Les acronymes MIG et MAG signifient respectivement Métal inerte gaz et Métal active gaz.

La différence entre les deux procédés tient à la composition du gaz. Le procédé MIG utilise un gaz neutre qui ne réagit pas avec le métal fondu (argon ou argon + hélium), contrairement au procédé MAG (mélange d'argon et de dioxyde de carbone ou dioxygène en proportions variables selon les métaux à souder). Le gaz est injecté en continu sur l'arc afin d'isoler complètement le métal en fusion de l'air ambiant.

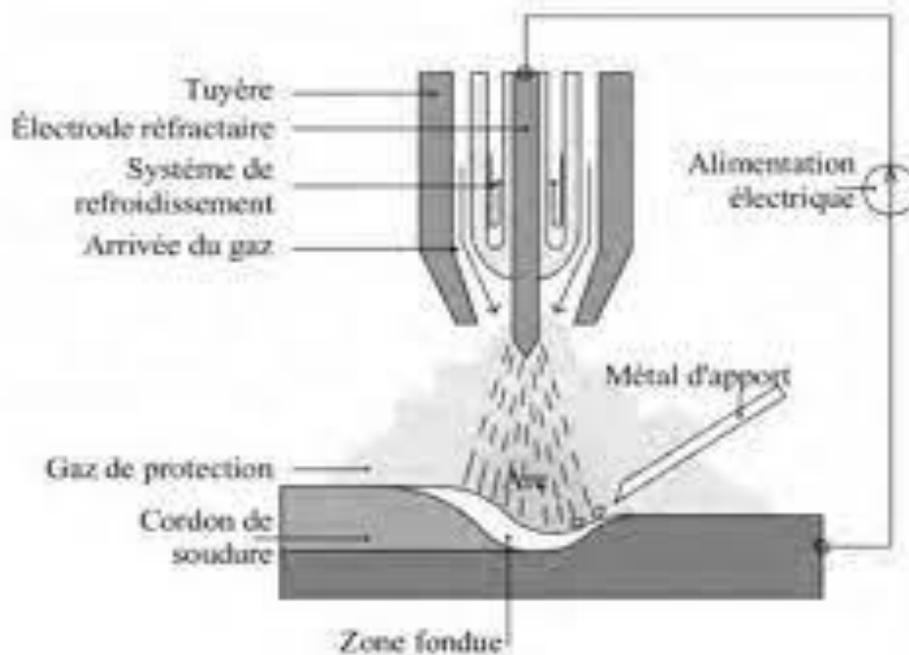
Mises à part de récentes exceptions, le soudage MIG/MAG s'effectue normalement à l'aide de courant continu, le pôle positif de la source de courant se situe sur l'électrode et le pôle négatif sur la pièce. Pour certains fils fourrés, on utilise quelque fois le soudage en polarité inversée. Dans les derniers temps, on utilise également le courant alternatif pour certaines applications spéciales, par exemple le soudage MIG sur des tôles d'aluminium très minces.

Le soudeur MIG ou MAG doit disposer d'une formation solide, non seulement en termes d'expériences pratiques mais également au regard des spécificités théoriques du procédé. Fort de ces connaissances, il peut éviter certains pièges.

Le gaz de protection s'écoule en provenance de la buse de gaz de protection qui recouvre de manière concentrique le fil à souder.

Le métal fondu est ainsi protégé contre la pénétration des gaz atmosphériques tels que l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. Outre la fonction de protection, le gaz de protection offre d'autres usages. Comme il détermine la composition de l'atmosphère de l'arc, il agit également sur la conductivité électrique et donc sur les caractéristiques de soudage.

Il influence en outre la composition chimique du métal fondu produit par des processus de carburation et décarburation, en d'autres termes, il présente également un effet métallurgique. [2]



**Figure I.2 :** Structure du système de soudage MIG MAG.

## I.3 Éléments sur les phénomènes physiques du soudage

### I.3.1 Effet thermique

Une des conséquences de l'application de cycles thermiques à un assemblage réside dans les déformations et les tensions internes qui en résultent (quand la température augmente =>  $R_e$  (Limite d'élasticité) diminue ;  $E$  (Module de Young) diminue et  $A$  (Allongement) augmente).

Ces déformations sont dues à la différence de dilatation entre le métal chaud et ce même métal lorsqu'il est refroidi. Cette dilatation négative est le retrait. Il est d'autant plus important que le coefficient de dilatation est plus grand (ex. aciers austénitiques).

L'austénite est une solution solide de carbone dans l'allotrope  $\gamma$  du fer, qui est stable entre 911 et 1 392 °C à la pression atmosphérique. Cet allotrope a une structure cristallographique cubique à faces centrées.

Toute tentative pour le limiter, que ce soit volontairement ou non, donne naissance à des tensions internes qui, si elles sont trop élevées, peuvent provoquer des fissurations. Cet empêchement du

retrait constitue le bridage. Il peut être créé artificiellement ou résulter de l'action des autres parties de la structure c'est l'anti-bridage. [3]

### **I.3.1.1 Les déformations en soudage**

La déformation en soudage est un phénomène complexe et inévitable qui peut avoir des conséquences économiques importantes durant la production de composants, d'ensembles et d'ouvrages mécano-soudés. En effet, si elles ne sont ni anticipées ni maîtrisées, ces déformations engendrent des coûts de fabrication qui deviennent très vite trop importants.

Afin d'optimiser la rentabilité de leurs opérations de soudage, les industriels qui utilisent ce procédé de fabrication doivent connaître et comprendre ces phénomènes ainsi que les moyens de les corriger.

De nombreux types de déformations existent (longitudinale, angulaire, transversale, torsions ...) et tous peuvent se combiner et donc complexifier le phénomène. Les paramètres qui ont une influence sur l'ampleur d'une déformation sont multiples, ils peuvent découler des caractéristiques des composants tout comme des spécificités du procédé de soudage choisi : [4]

- 1) Conception de l'ensemble mécano-soudé
- 2) Propriétés du matériau
- 3) Procédés métallurgiques antérieurs (laminage, formage, pliage...)
- 4) Procédé de soudage utilisé
- 5) Nombre et séquence des soudures
- 6) Symétrie du cordon de soudure
- 7) Degré de bridage
- 8) Préchauffage ...

## **I.4 Les contraintes résiduelles**

Les contraintes résiduelles sont des tensions internes présentes dans une pièce ou une structure en l'absence de sollicitations extérieures. La plupart des procédés de fabrication dont le soudage génèrent des contraintes résiduelles. [5]

Ces contraintes peuvent avoir plusieurs origines, mécanique, thermique ou encore métallurgique (structurale).

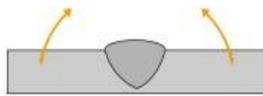
### **I.4.1 Contraintes et déformations dans le sens longitudinal**

C'est un raccourcissement de la zone soudée suivant une direction parallèle à celle du cordon de soudure.

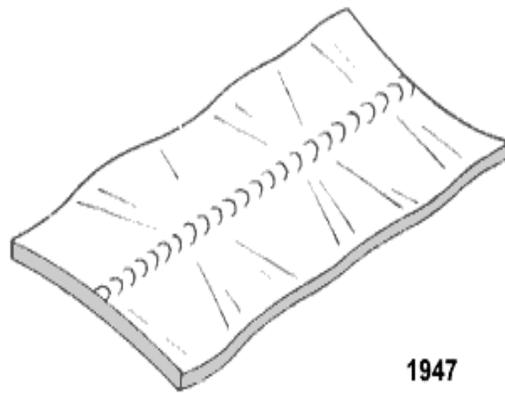
Il témoigne de la présence de contractions maximales au milieu du joint et minimales à ses extrémités.

Il est important de savoir que les contractions du métal d'apport priment sur le reste des contraintes ce qui a pour effet de faire fléchir la construction soudée sur sa longueur.

Les effets de cintrage et de flambage sont les manifestations d'un retrait longitudinal. S'ils sont trop importants les risques de fissures deviennent réels. [4]



**Figure I.3 :** Effet de cintrage.

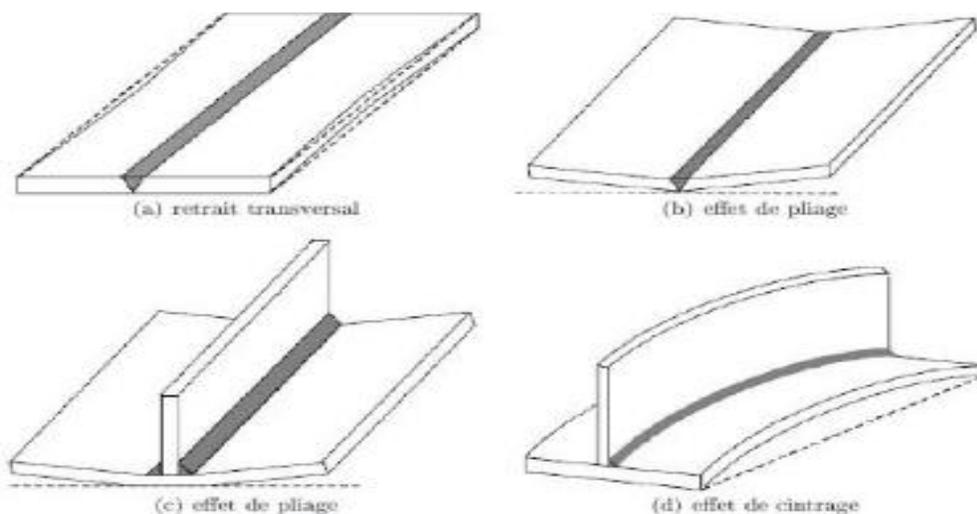


**Figure I.4 :** Effet de flambage.

### I.4.2 Contraintes et déformations transversales

C'est un raccourcissement de la zone soudée suivant une direction perpendiculaire à celle du joint.

Il est lié à la largeur du cordon de soudure et non à la longueur des composants à assembler. La façon dont le joint a été soudé (forme, nombre de passes, ...) est donc à considérer puisque c'est elle qui déterminera l'ampleur des déformations angulaires ainsi que celles des effets de pliage et de serrage. [4]



**Figure I.5 :** Contraintes et déformations transversales.

### **I.4.3 Effet métallurgique**

Les contraintes résiduelles et les retraits sont grandement influencés par les transformations métallurgiques. Particulièrement, trois phénomènes reflètent cette influence :

La déformation plastique, en particulier, contribue grandement à la diminution des retraits longitudinaux des zones surchauffées des pièces soudées.

Ceci a pour effet de réduire les contraintes résiduelles de traction longitudinale qui agissent sur ces zones. [6]

#### **I.4.3.1 Introduction à la métallurgie du soudage**

Lors d'une opération de soudage, en terme métallurgique, tout est remis en question, les structures des pièces à assembler tendent à évoluer lors du soudage.

En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage :

Les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique.

De plus, s'il s'agit de soudage par fusion :

D'une part, les matériaux assemblés peuvent prendre une nouvelle composition chimique s'ils sont mélangés à une composition chimique différente : celle du métal d'apport

Le succès d'un procédé soudage implique la notion fondamentale de continuité métallique des éléments à assembler. [7]

La mise en jeu de forces de liaison interatomiques de type métallique, hors présence de corps étranger, est donc fondamentale. Outre cet aspect, l'article traite des procédés permettant de créer cette liaison, des phénomènes intervenant dans ce mécanisme et des essais disponibles pour évaluer au final la soudabilité métallurgique.

## **I.5 Modifications microstructurales en zone affectée par la chaleur et les conséquences métallurgiques des cycles thermiques de soudage**

Les opérations de soudage engendrent des cycles thermiques qui conduisent à des transformations de phase à l'état solide dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et à l'état liquide dans la zone fondue (ZF).

Ces modifications métallurgiques dépendent de la composition chimique locale du matériau de base et des conditions de soudage telles que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la torche et les conditions de refroidissement. Réciproquement, ces transformations modifient les propriétés thermiques du matériau et s'accompagnent d'absorption ou de dégagement de chaleur, nommées chaleurs latentes de transformation.

L'influence de l'histoire thermique sur la mécanique est caractérisée par la variation des propriétés mécaniques en fonction de la température et par la dilatation thermique du matériau. L'influence de l'état mécanique sur le champ de température est caractérisée par la dissipation intrinsèque générée par les déformations plastiques. Cependant, dans le cadre de la simulation d'une opération de soudage par fusion, la dissipation mécanique est négligeable devant la puissance énergétique du procédé de soudage.

L'histoire thermique et les modifications microstructurales provoquées par le soudage engendrent à leur tour des contraintes et des déformations résiduelles. Plusieurs phénomènes en sont à l'origine :

Des dilatations différentielles dues au gradient thermique, les variations des propriétés mécaniques en fonction de la température et de la microstructure ainsi que les conditions de bridage de la pièce

Réciproquement, si une transformation de phase se produit sous contrainte, elle peut induire une déformation plastique orientée par la contrainte appliquée. Ce phénomène peut se produire même pour des niveaux de contraintes faibles (inférieures à la limite d'élasticité du matériau). Il s'agit du phénomène de plasticité de transformation. La simulation du soudage requiert donc un grand nombre de données nécessitant des essais spécifiques. [8]

### **I.5.1 Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur**

Afin d'anticiper et de maîtriser les évènements métallurgiques en soudage, il est important d'établir les conditions thermiques produites par une source de chaleur concentrée telle qu'utilisée en soudage au sein et aux abords des soudures telles que :

Les températures maximums atteintes tout au long de la Zone Affectée par la Chaleur (ZAC) ou Zone Affectée Thermiquement (ZAT), les vitesses de refroidissement en métal fondu et en ZAT, ainsi que l'ordre de grandeur des vitesses de solidification du bain de fusion.

L'étude et la connaissance de l'écoulement thermique sont prépondérantes quant au développement et à la mise au point des modes opératoires établis pour satisfaire les exigences d'un cahier des charges et compte tenu du comportement métallurgique d'un matériau donné.

La puissance d'un arc peut être exprimée en unités électriques comme le produit de la tension aux bornes de l'arc par le courant passant à travers l'arc. Pour des valeurs données de 23 V de tension d'arc et de 200 A d'intensité, la puissance calculée de l'arc électrique est de 4 600 W. [9]

La température de l'arc peut atteindre 3 000 °C. Toute cette puissance brute générée par l'arc électrique n'est pas utilisée de manière effective dans les procédés de soudage.

### **I.5.2 Transformations à la ZAC lors du chauffage**

Les diagrammes d'équilibre Fe-C sont conçus, à priori, afin de prévoir les transformations de phases qui se font par diffusion lors des traitements thermiques très lents, dits classiques.

Ceci n'est pas le cas du soudage pour lequel ces transformations se déroulent hors équilibre thermodynamique et donc différemment des précédentes et à des températures de début et de fin de transformation beaucoup plus élevées. La raison est que les vitesses très rapides d'échauffement dues à ce procédé ne permettent pas d'avoir suffisamment de temps pour que s'achèvent les modifications de phases à chaque valeur de température.

Entre la ZF et la ZAT existe une zone très mince appelée : zone de transition.

Dans cette zone se déroule la transformation de phase à l'état liquide (Gama ----> téta) et elle correspond aussi à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu débute. [10]

### **I.5.3 Transformations à la ZAC lors du refroidissement**

Les conditions de refroidissement influent considérablement sur les transformations métallurgiques que va subir l'acier depuis son état austénitique. Lors des traitements thermiques classiques, où les températures maximales sont relativement basses et où les temps de maintien et de refroidissement sont assez longs, la nature des phases qui naissent suite à ces transformations est totalement décrite par les diagrammes.

Lors du soudage l'austénite se transforme en perlite ou en bainite pour des taux de refroidissement bas ou moyen respectivement. La perlite est un agrégat de ferrite et de cémentite.

La bainite est aussi un agrégat de ferrite et de cémentite par contre sa structure (en aiguilles) est plus fine que celle de la perlite.

Pour des taux de refroidissement élevés, la diffusion des atomes de carbones à travers le réseau cristallin ne peut se dérouler convenablement. Ces atomes se voient alors piégés à l'intérieur de la maille ferritique. Une fois sursaturée en carbone la maille ferritique se déforme pour donner naissance à une nouvelle phase : la martensite. [11]

### **I.5.4 Transfert du métal dans l'arc soudage**

#### **I.5.4.1 Transfert par court-circuit**

En transfert par court-circuit, le fil électrode touche la pièce et provoque un court-circuit qui pince la goutte de fil fondu et transfère le métal fondu.

Ce court-circuit est généré de 20 à 200 fois par seconde. L'avantage du transfert par court-circuit ou short-arc est sa faible énergie de soudage.

Ce transfert d'arc est normalement utilisé sur des matériaux de faible épaisseur inférieure à 5 mm et pour les passes de pénétration ou passe de racine sur les tôles et les tubes sans support.

Il peut être utilisé pour souder dans toutes les positions de soudage. Le transfert par court-circuit est utilisé pour les faibles diamètres de fil-électrodes comme le  $\varnothing$  0,6mm,  $\varnothing$  0,8 mm et  $\varnothing$  1,0mm.

Le courant de soudage doit être suffisant pour faire fondre le fil électrode.

Mais si l'intensité est excessive, elle peut provoquer une séparation violente du fil électrode en court-circuit, entraînant des projections excessives sur la pièce. Utiliser les contrôles de pente et d'inductance réglables peuvent faciliter le transfert d'arc afin de minimiser les éclaboussures et d'assurer un profil plat de la soudure. Un ajustement de la pente limite l'ampérage en court-circuit, tandis que les ajustements d'inductance permettent de contrôler le temps nécessaire pour atteindre l'ampérage maximal du court-circuit.

Un réglage correct de ces deux paramètres améliore l'aspect du cordon et il est essentiel pour contrôler le transfert par court-circuit des fils en acier inoxydable. [12]

Le gaz le plus utilisé pour le mode de transfert en court-circuit pour les fils en acier au carbone est de 75% d'argon et 25% de CO.

## **I.6 Transfert globulaire**

Le transfert globulaire (aussi appelé « grosse goutte » ou globular) s'établit pour des densités de courant supérieures.

Dans ce mode, les grosses gouttes de métal liquide se forment au bout du fil et se détachent par gravité ou par court-circuit. Ce régime est instable et produit beaucoup de projections. Il est favorisé par la présence de CO<sub>2</sub> dans le gaz de protection. Il est d'une manière générale à éviter mais peut-être utilisé pour faire des passes de remplissage. [13]

## **I.7 Transfert par pulvérisation axiale (spray)**

Le métal est transféré dans l'arc sous forme de fines gouttelettes. C'est un régime très régulier, mais nécessitant de fortes intensités ce qui le rend applicable seulement aux pièces métalliques ayant une épaisseur supérieure à 5 mm. [14]

Le transfert par pulvérisation génère une pulvérisation de minuscules gouttelettes de métal liquide dans l'arc, semblable à un jet sortant d'un tuyau d'arrosage lorsque l'ouverture est imitée. Le transfert par pulvérisation est généralement plus petit que le diamètre du fil et utilise la tension relativement élevée, une vitesse d'alimentation du fil importante et un ampérage élevé.

Cette méthode de transfert produit très peu de projections métalliques.

Ce transfert est le plus souvent utilisé sur les matériaux épais dans les positions à plat et horizontale.

Les taux de dépôt sont élevés par rapport aux autres modes de transfert.

## I.2 Les défauts des soudages

### I.2.1 Introduction

La majeure partie des discontinuités se produit dans les joints ou dans la ZAT, les soudures comportent des porosités, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures. Parmi ces trois défauts, les fissures sont de loin les plus déterminantes. S'il y a des limites acceptables pour les inclusions et les porosités, les fissures restent inadmissibles. Pour les propos de ce paragraphe, la Fissure se distingue d'un autre défaut comme la cassure ; Les soudures cassent à cause des contraintes, mauvaise conception du joint, ou fatigue, la fissure en cause ici est due à la solidification, le refroidissement les tensions dues au retrait du joint.

### I.2.2 Principaux Défauts de soudage

Il existe une grande variété de défauts caractérisés par leur nature (solide, gazeuse) leur forme et par leur origine. Lors du contrôle, la distinction entre différents types de défauts se relève cruciale car elle permet souvent d'estimer les risques de fracture de matériau. Un défaut ou une anomalie de la matière risquent de provoquer la ruine de l'ensemble soudé. En soudage « un défaut » : discontinuité dans la soudure ou écart par rapport à la géométrie (volume).

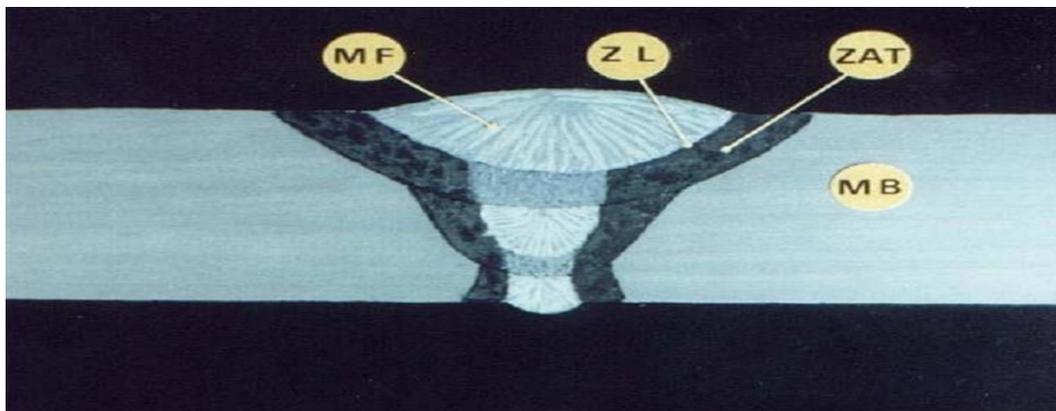


Figure I.6 : Les différentes zones de soudure.

**MB** : Métal de base, **MF** : Métal fondu, **ZL** : Zone de liaison, **ZAT** : Zone affectée thermiquement.

Les différents types de défauts sont classifiés par la norme EN ISO 6520-1 en 5 groupes :

- 1) Fissure.
- 2) Cavités.
- 3) Inclusion solide ou gazeuse.
- 4) Manque de fusion.
- 5) Manque de pénétration.

**La norme EN ISO 6520-1** : ISO (organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organisme qui sert de base à une classification et à une description précise des défauts de soudure. De manière à éviter des confusions, les types de défauts sont définis avec des commentaires et des illustrations au besoin.

### **I.2.3 Les Fissures**

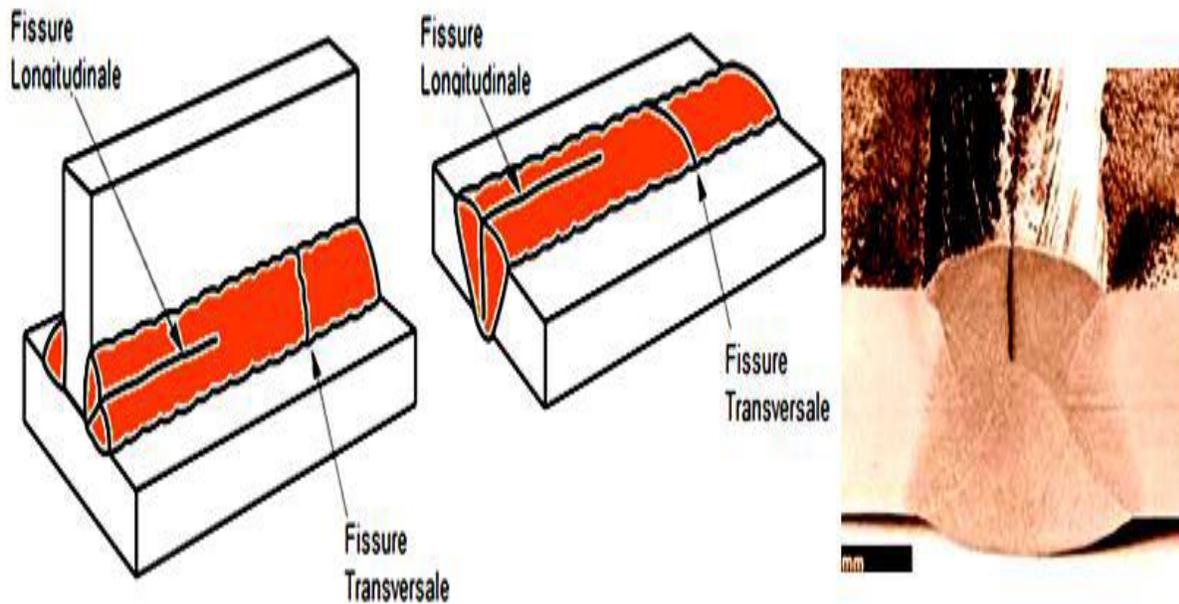
Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. [15]

#### **I.2.3.1 orientations des fissures**

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur.

### I.2.3.2 Les fissures longitudinales

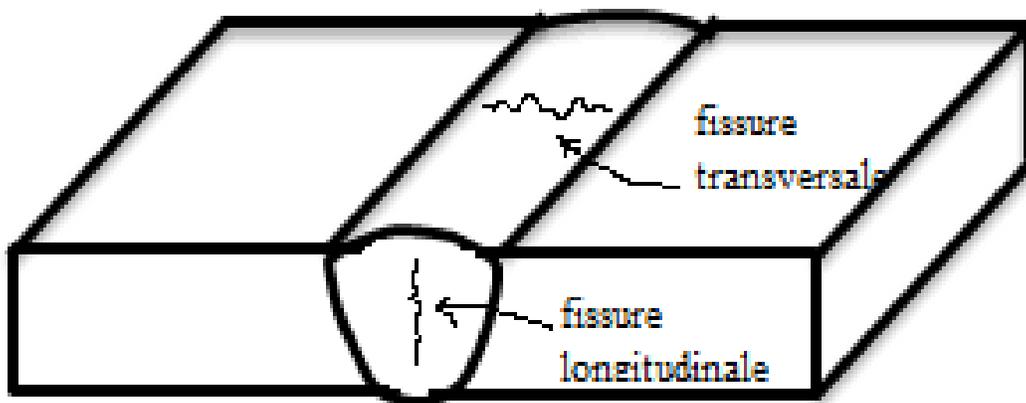
Fissures sensiblement parallèles à l'axe de la soudure. [15]



**Figure I.7:** La fissure longitudinale.

### I.2.3.3 Les fissures transversales

Fissure sensiblement transversale à l'axe de la soudure. [15]



**Figure I.8:** la fissure transversale.

### I.2.4 Types des fissures

La figure 9 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

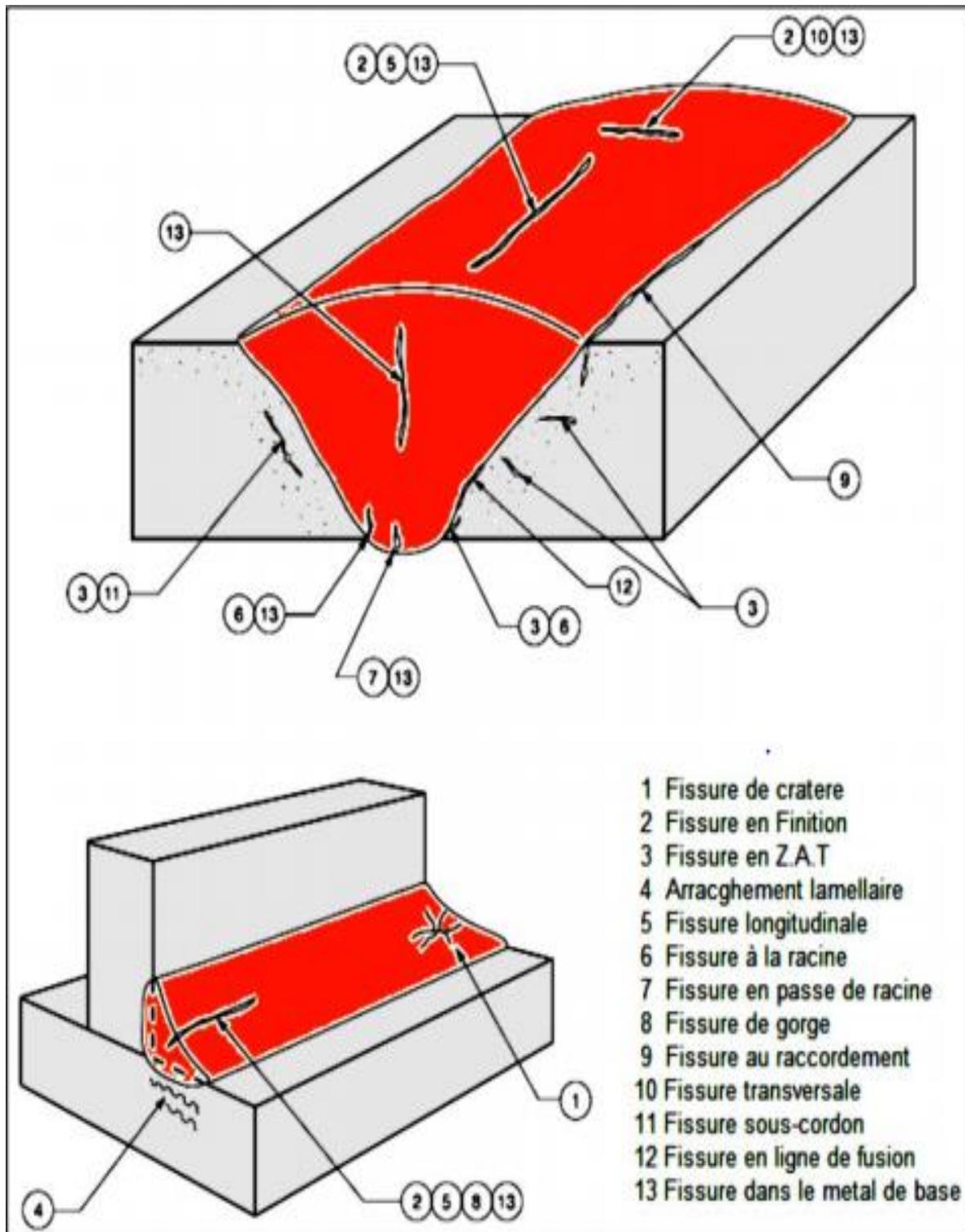
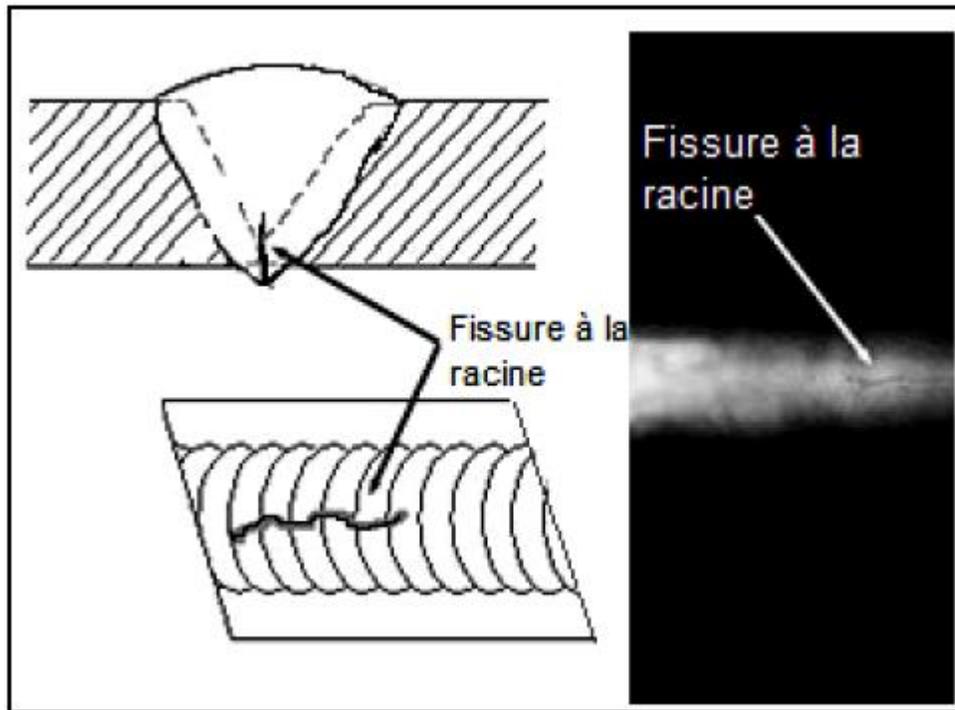


Figure I.9 : Les types de fissure. [15]

### I.2.4.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks)

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Fig.10).

Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud. [16]

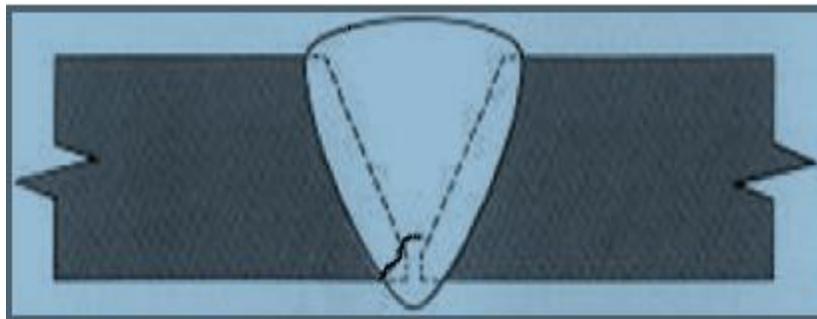


**Figure I.10:** Fissure de Gorge (Throat Cracks).

### I.2.4.2 Fissures de Racine

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Fig.11.).

Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.



**Figure I.11:** fissure de racine.

### I.2.4.3 Fissures de Cratère

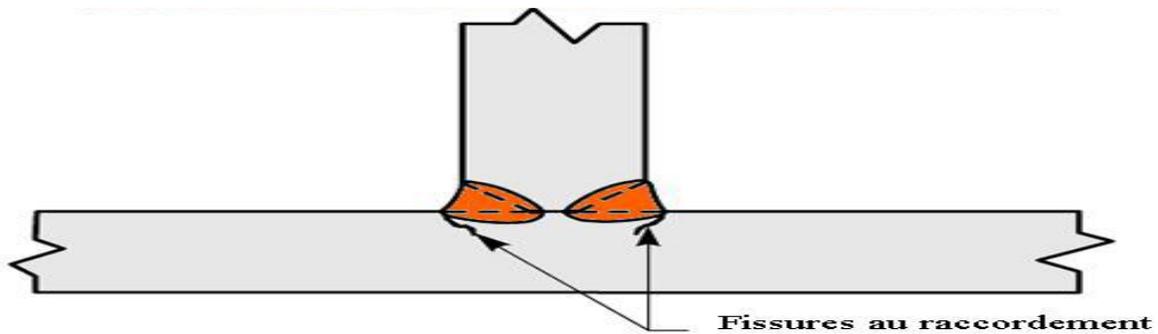
Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (Fig.12.). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère. [16]



**Figure I.12:** Fissure de Cratère.

### II.2.4.4 Fissures au raccordement

Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement. Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage. [16]



**Figure I.13:** Fissure au raccordement.

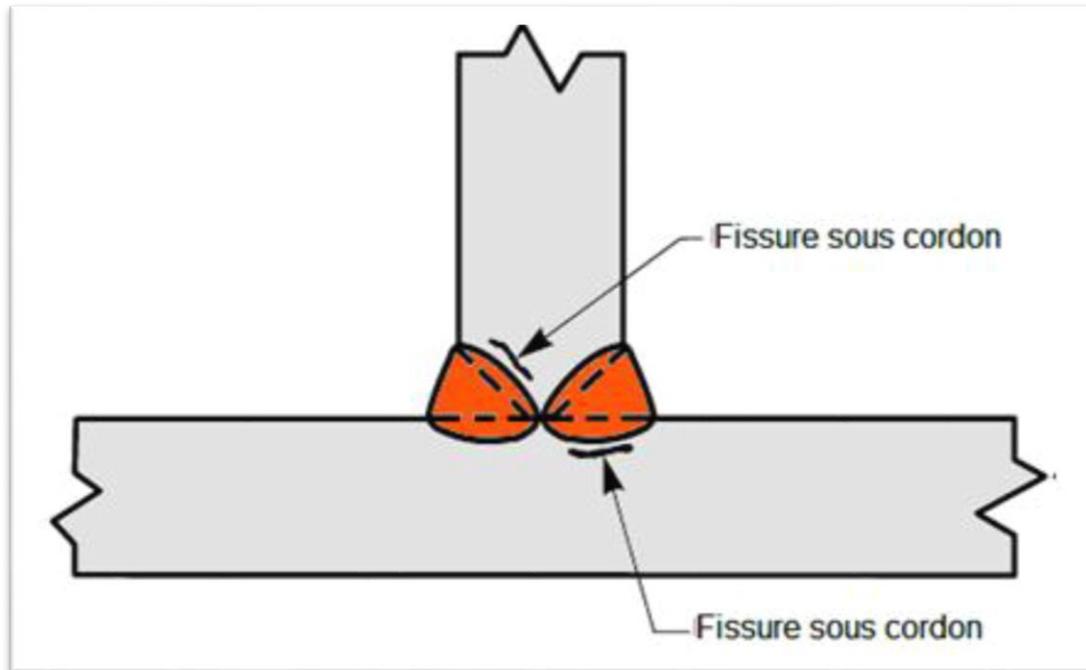
#### **I.2.4.5 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)**

Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon peuvent

Se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément :

- 1) Hydrogène.
- 2) Une microstructure de ductilité relativement faible.
- 3) De fortes contraintes résiduelles. [16]

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout.

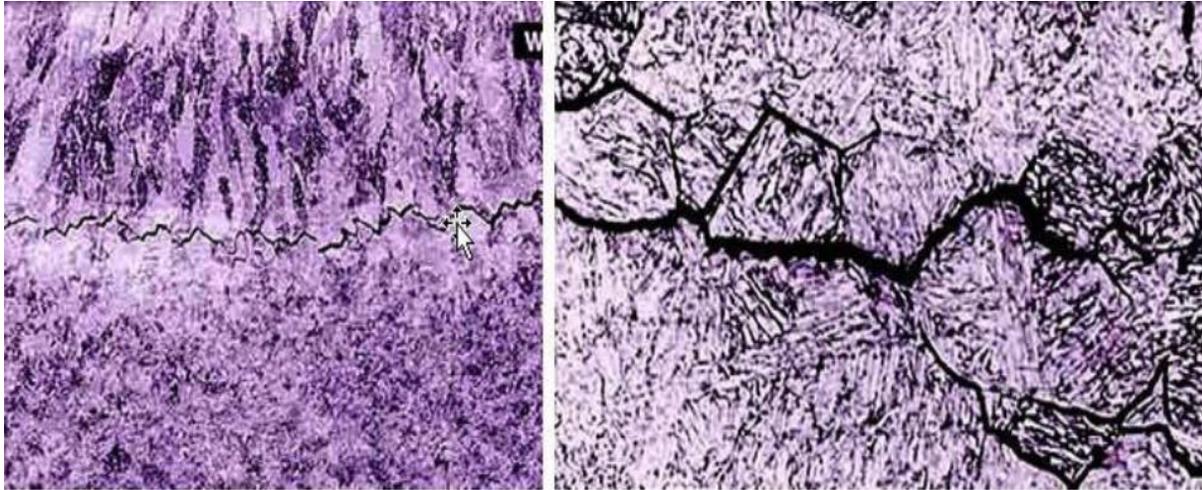


**Figure I.14:** Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

#### I.2.4.6 Fissures de réchauffages (Reheat cracking)

Une fissuration par réchauffage peut se produire dans les aciers faiblement alliés contenant des additions d'alliage de chrome et de molybdène ou de chrome, de molybdène et de vanadium lorsque le composant soudé est soumis à un traitement thermique après soudage, tel qu'un traitement thermique de détente, ou a été soumis à un service à haute température (typiquement dans la plage de 350 à 550 ° C).

La fissuration se trouve presque exclusivement dans les régions à gros grains de la zone affectée par la chaleur sous la soudure, ou la gaine, et dans les régions à gros grains à l'intérieur du métal de soudure. Les fissures peuvent souvent être vues visuellement, généralement associées à des zones de concentration de contraintes telles que le pied de soudure. [16]

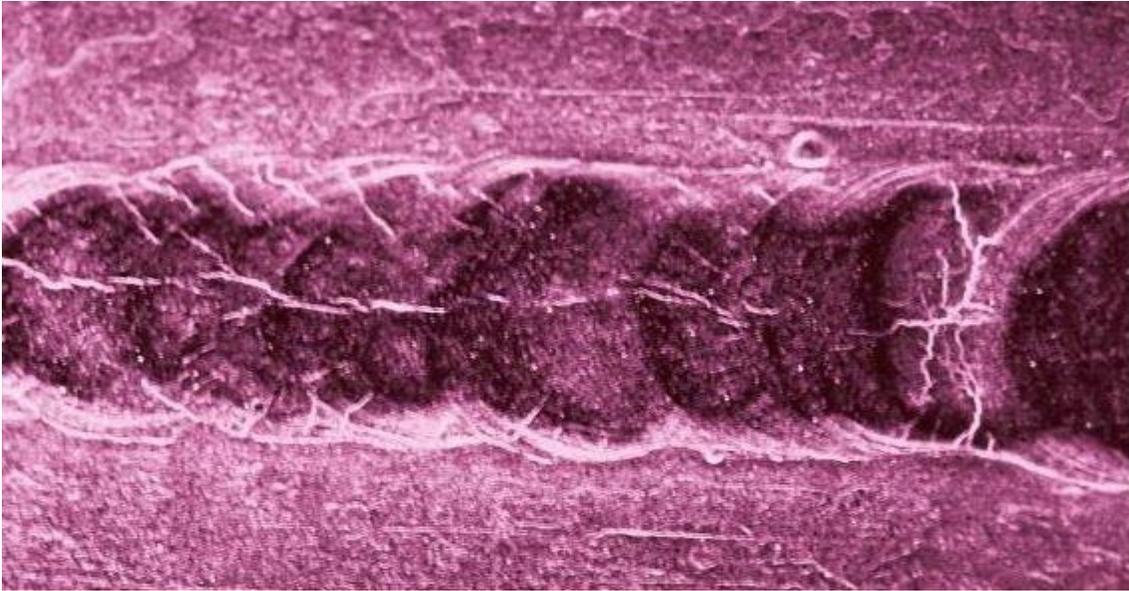


**Figure I.15:** Fissures de réchauffages (Reheat cracking).

### **I.2.5 Fissure à chaud (ou de solidification)**

La fissuration à la solidification (fissuration à chaud) se présente le plus souvent dans l'axe de la soudure. Ces fissures sont positionnées le plus souvent dans les passes de fond (pénétration) et bien qu'elles soient le plus souvent débouchantes et visibles, elles peuvent aussi parfois être recouvertes par une légère couche de métal (pouvant atteindre 0,5 mm). Ces fissures peuvent être profondes et réduire sensiblement la continuité métallurgique du cordon. C'est pendant le soudage des aciers carbone/manganèse soudé par procédé sous flux qu'on constate le plus souvent ce phénomène. Plus rarement en soudage manuel avec électrode enrobée et parfois en soudage avec fil (avec ou sans gaz). [16]

La fissuration à la solidification est liée à la présence d'impuretés, notamment soufre et phosphore. Le carbone provenant du métal de base, avec de fort taux de dilutions favorise aussi cette fissuration. Le manganèse réduit les risques de fissuration.

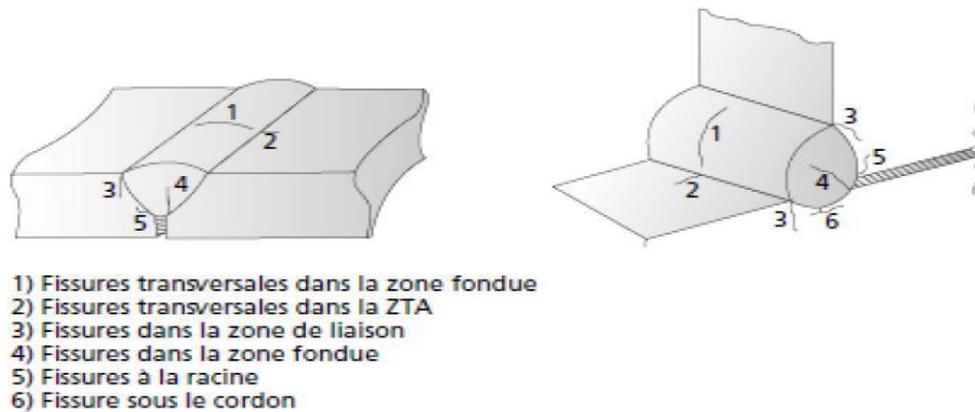


**Figure I.16** : fissure à chaud.

### **I.2.6. Fissures à froid**

C'est le défaut le plus redouté dans le soudage des aciers, les fissures à froid peuvent survenir dans la zone fondue ou dans la zone thermiquement affectée ou atteinte. L'apparition des fissures à froid est très souvent différée dans le temps, c'est à dire longtemps après soudage. Même après le refroidissement de la soudure à la température ambiante, un certain temps peut s'écouler avant que la fissuration n'arrive.

Il peut s'agir de quelques minutes à plusieurs heures. Dans certains cas extrêmes, on a même observé la formation des fissures de deux jours à plusieurs semaines après le soudage. Les fissures à froid dans la zone fondue peuvent se situer suivant une orientation quelconque par rapport à l'axe de la soudure, sont en général situées parallèlement à la ligne de fusion, c'est surtout lors de la première passe de soudage (passe de fond) que naissent les risques de fissuration et lors de la dernière passe pour les fissures au raccordement. [16]



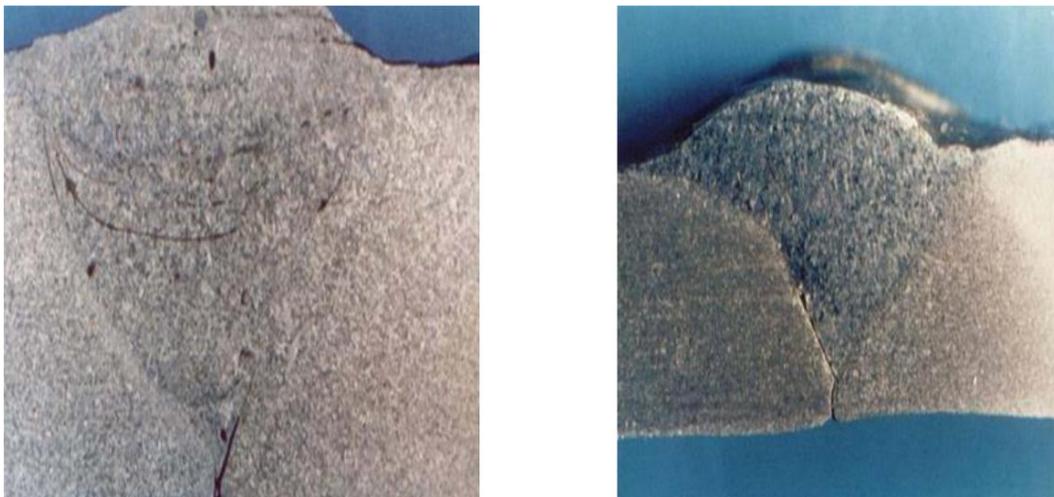
**Figure I.17:** Types de fissures à froid.

### I.2.7 Manque de pénétration

Le manque de pénétration se caractérise principalement par une zone non fondue à la racine de la soudure. L'excès correspond lui à un surplus de métal fondu à la base du joint soudé. Ces deux défauts sont causés par de mauvais paramètres de soudage (intensité, tension et vitesse d'avance) mais également par un jeu entre les pièces ou une épaisseur de talon mal maîtrisés. [16]

Le manque de pénétration peut être localisé :

- 1) A la racine de la soudure (soudure en « V »)
- 2) A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X »)

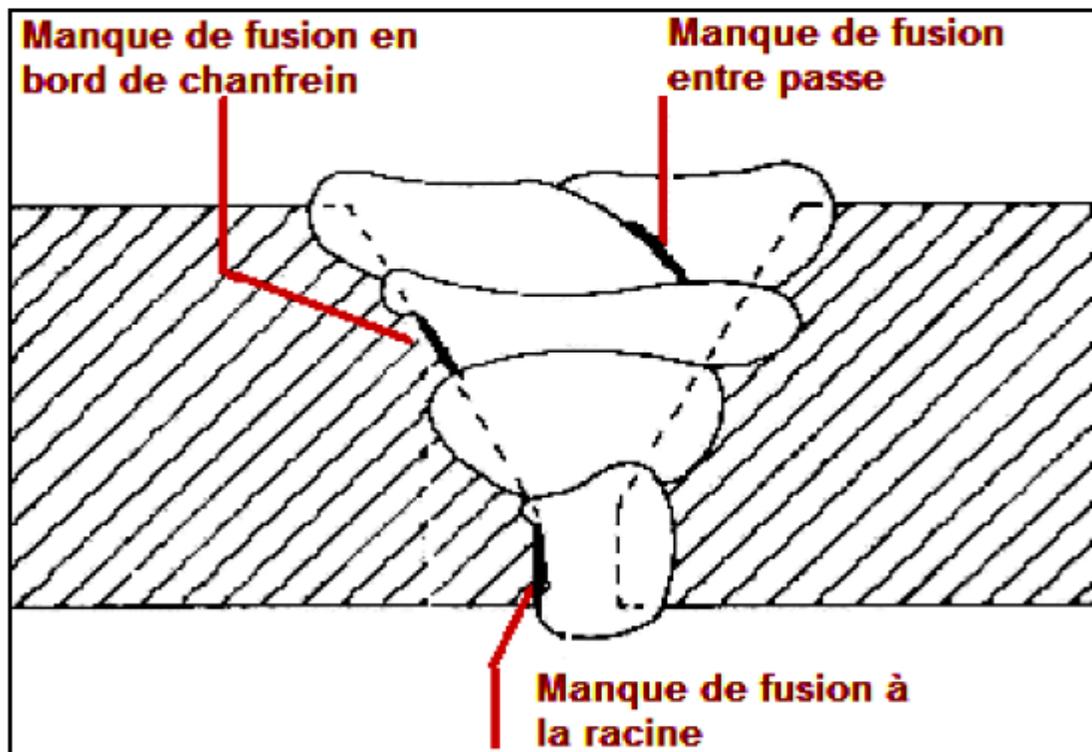


**Figure I.18:** Manque de pénétration.

## I.2.8 Manque de fusion

Le manque de fusion, également appelé collage, se caractérise par une zone de contact non fondue entre le métal déposé et le métal de base.

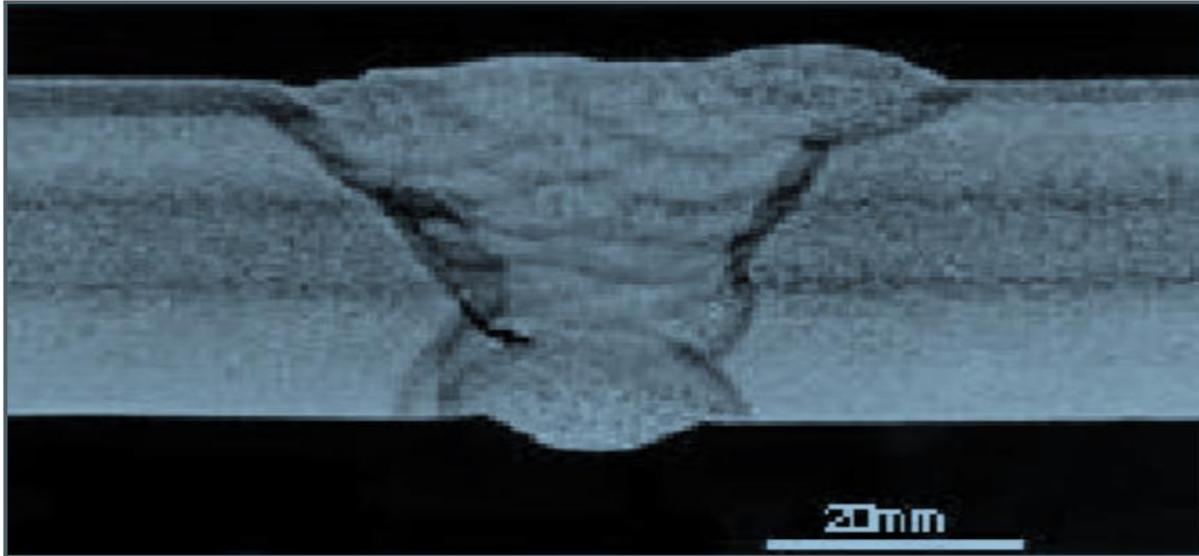
Ici aussi, la préparation des bords est une des causes d'apparition de ce défaut. Dans un chanfrein trop étroit par rapport au diamètre de l'électrode, l'arc peut être attiré par l'une des parois. Il y a donc fusion de l'un des bords et le chanfrein se remplit de métal fondu. Cependant, l'arc n'ayant pas directement atteint la racine (ou la passe précédente) et le côté opposé du chanfrein, ces zones n'ont pas été fondues et ont été simplement recouvertes de métal d'apport. [16]



**Figure I.19:** Localisations possibles des manques de fusion.

### I.2.8.1 Manque de fusion dans le flanc de la soudure

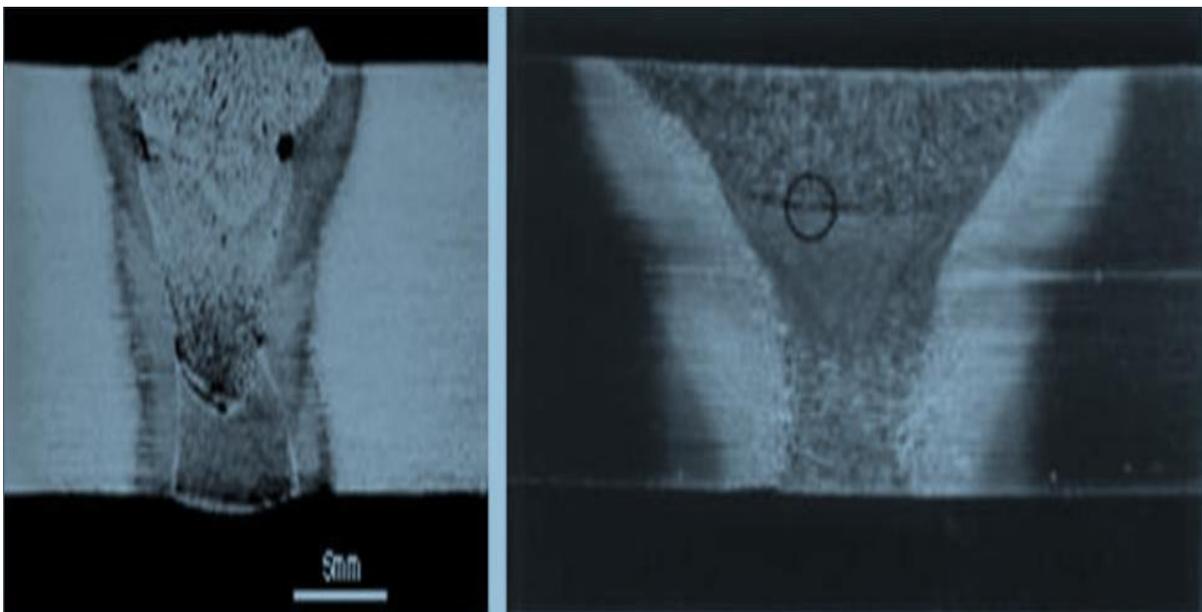
Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la Soudure.



**Figure I.20:** Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

### I.2. 8.2 Manque de fusion entre passes

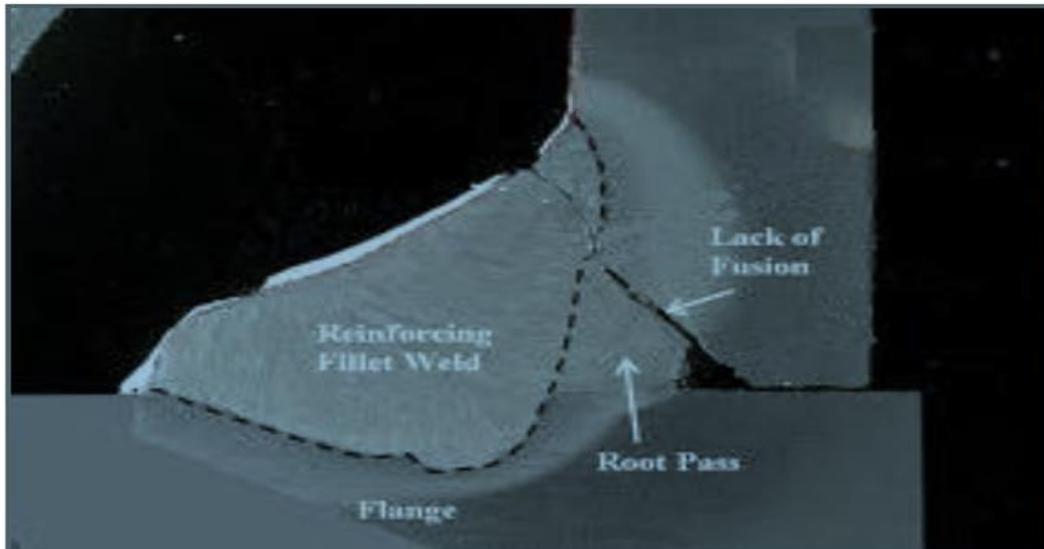
Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passe.



**Figure I.21:** Manque de fusion entre passes.

### I.2.8.3 Manque de fusion à la racine de la soudure

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la Soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration.



**Figure I.22:** Manque de fusion à la racine de la soudure.

### I.2.9 Les inclusions gazeuses

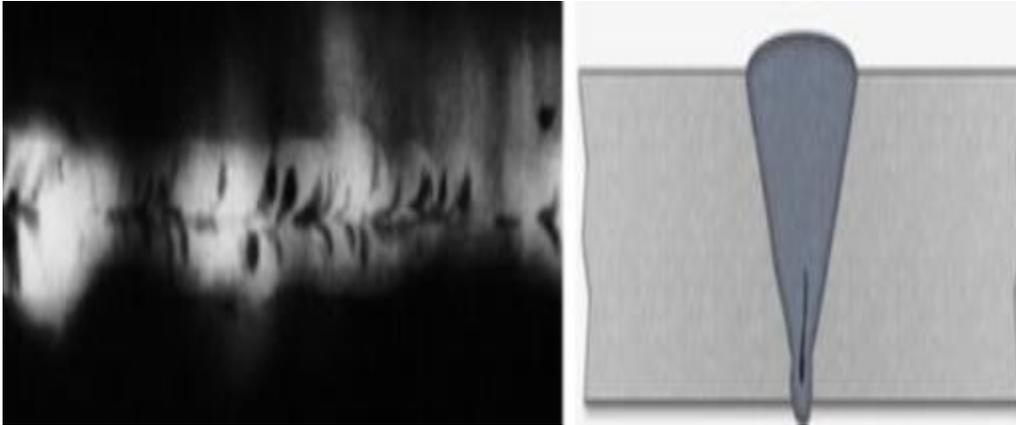
Sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. [16]

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes :

- 1) Porosités vermiculaires.
- 2) Porosités de reprise.
- 3) Porosités uniformes.

#### I.2.9.1 Porosités vermiculaires

Cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon. Elles peuvent se présenter isolées ou groupées, elles ont souvent une forme caractéristique d'arête de poisson suivant les séquences de solidification des dendrites.



**Figure I.23:** inclusions gazeuses porosités vermiculaires.

### **I.2.9.2 Porosités de reprise**

Porosités limitées à une petite partie du cordon et qui apparaissent lors d'un soudage électrique manuel ou automatique lors de l'amorce d'une passe.

### **I.2.9.3 Porosités uniformes**

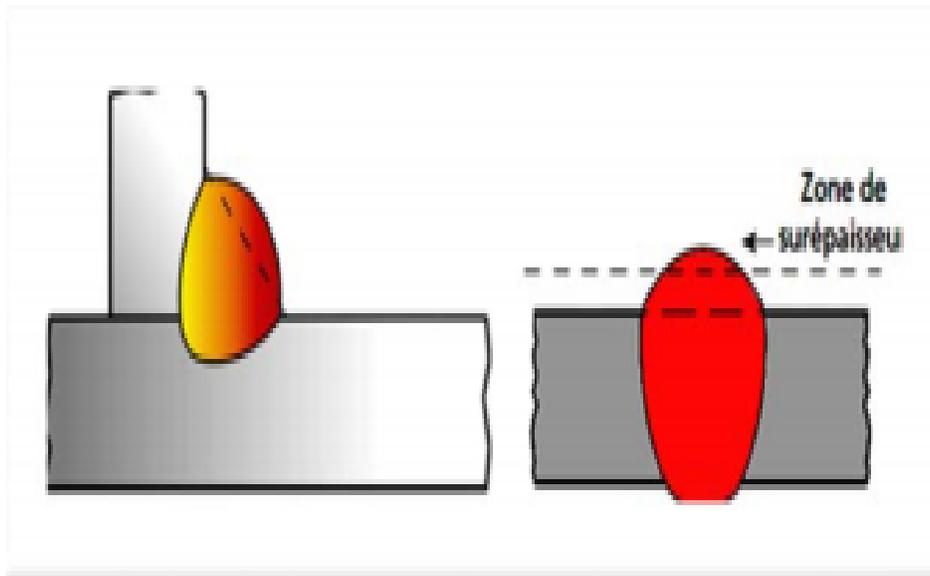
Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon



**Figure I.24:** inclusions gazeuses porosités uniformes.

### **I.2.10 Surépaisseur ou convexité excessive**

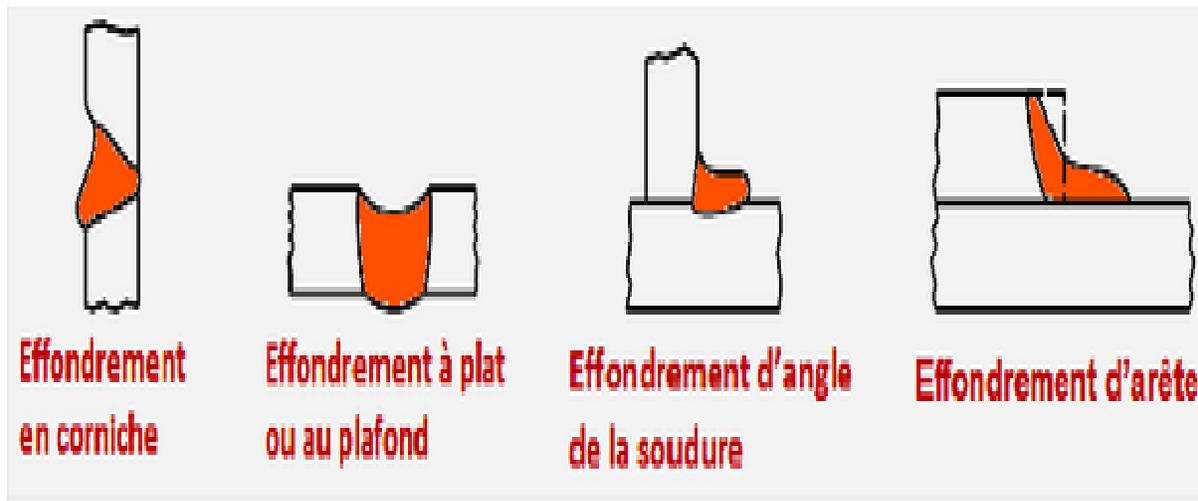
Un apport excessif de métal qui cause, de la convexité dans les soudures d'angle, et des épaisseurs supérieures à celles du métal de base pour les soudures bout à bout. [16]



**Figure I.25:** convexité excessive et surépaisseur excessive.

### I.2.11 Effondrements ou concavité excessive

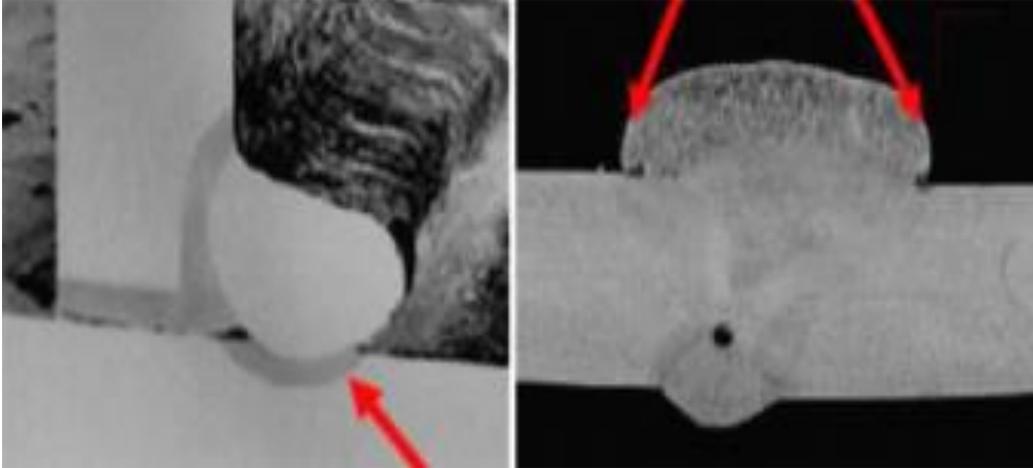
L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements. [16]



**Figure I.26:** effondrement à la racine.

### I.2.12 Débordement du cordon

L'écoulement d'un excès de métal d'apport sur la surface du métal de base, soit à la racine de la soudure, soit à la surface supérieure sans fusion avec ce métal de base. [17]



**Figure I.27:** recouvrements non fusionnés (Débordements).

# **Chapitre II :**

## Matériaux et méthodes expérimentales

## II. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le matériau utilisé, ainsi que les différentes techniques expérimentales qu'on a utilisé pour caractériser l'effet du courant de soudage sur les propriétés mécaniques du joint soudé à savoir : la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par le TIG

### II.1 Matériaux utilisés

#### II.1.1 Acier A60 :

Selon cette désignation l'acier A60, est un acier qui présente une résistance minimale à la traction de 60 daN/mm<sup>2</sup> (A pour acier ordinaire). Selon la nouvelle désignation Euro norme, cet acier est désigné par l'écriture S335 (S pour acier d'usage général et 335 pour la valeur moyenne de sa limite d'élasticité, soit 335 MPa).

Les différents éléments chimiques et les caractéristiques mécaniques de cet acier sont représentées sur le tableau suivant :

**Tableau II.1** : Composition chimique de l'acier A60. [18]

<b>Composition chimique de l'Acier A 60</b>	<b>Eléments d'alliages</b>	<b>Pourcentage [%]</b>
	<b>C</b>	0.18 % – 0.21 %
	<b>Si</b>	0.2580
	<b>Mn</b>	0,80
	<b>P</b>	0.0065
	<b>S</b>	0.0113
	<b>Cu</b>	0.2286
	<b>Cr</b>	0.0965
	<b>Ni</b>	0.1520
	<b>V</b>	0.0028
	<b>Mo</b>	0.0405
	<b>Al</b>	0.0235
	<b>Balance Fe</b>	

### II.1.2 Inox 18.8 (acier inoxydable)

L'acier inoxydable est un alliage de chrome, de silicium, de nickel, de carbone, d'azote et de manganèse donnent au métal des propriétés différentes selon leurs quantités variables.

L'inox de type 18.8 a une composition de 18 % de chrome et 08 % de nickel. Il est ainsi un des matériaux les plus sûrs pouvant contenir des produits alimentaires tant liquides que solides.

Bonne résistance à la corrosion uniforme, facile à nettoyer, excellente résistance et excellente ténacité à des températures cryogéniques, bonne formabilité, bonne soudabilité

Les différents éléments chimiques et les caractéristiques mécaniques de cet acier inoxydable (inox 18.8) sont représentés sur le tableau suivant [19]

**Tableau II.2 :** Composition chimique de l'Inox 18.8.

<b>Composition chimique de l'Inox 18.8</b>	<b>Eléments d'alliages</b>	<b>Pourcentage [%]</b>
	<b>C</b>	0.1 % Max
	<b>Si</b>	1% Max
	<b>Mn</b>	2 % Max
	<b>P</b>	0.0045 % Max
	<b>S</b>	0.15 % - 0.35 %
	<b>Cr</b>	17 % - 19 %
	<b>Ni</b>	8% - 10%
	<b>Mo</b>	≤ 0.70 %
	<b>Cu</b>	1% Max
	<b>N</b>	0.10 % Max
	<b>Fe</b>	Solde

### II.1.3 Procédé TIG usité

Pour l'élaboration de nos soudures, le poste utilisé par la société NAFTAL est constitué d'un poste type LINCOLN VINTAGE 300 (Figure II.3), pourvu d'un moteur électrique à basse vitesse (10mm/s) pour l'entraînement du cordon. Un système de contrôle des gaz, composé de débitmètres à flotteur pour régler le débit d'oxygène et d'argon et des manomètres régulant la pression des gaz ainsi des courant et intensité, alors que la torche montée est de type TIG Harris.



**Figure II.1 :** Poste à souder TIG.

#### **II.1.4 Baguette de soudure utilisée (Rutile) : W c'est tungstène**

L'électrode rutile possède une âme en acier, un enrobage en dioxyde de titane pour un aspect grisâtre en finalité. Elle s'emploie pour des usages très généraux car elle est parfaitement homogène. Elle peut s'utiliser facilement pour les différents travaux de bricolage classiques dans le milieu des métaux comme la réparation, l'assemblage, la chaudronnerie ou la plomberie.

Cette baguette rutile s'utilise avec un courant alternatif même lorsque la tension du poste de soudure est très faible. Elle est très simple d'utilisation lorsque l'on veut souder dans toutes les positions. Elle assure un très bel aspect du cordon qui est toujours bien homogène. L'étalement de la soudure reste bien fluide pour un assemblage parfaitement régulier.

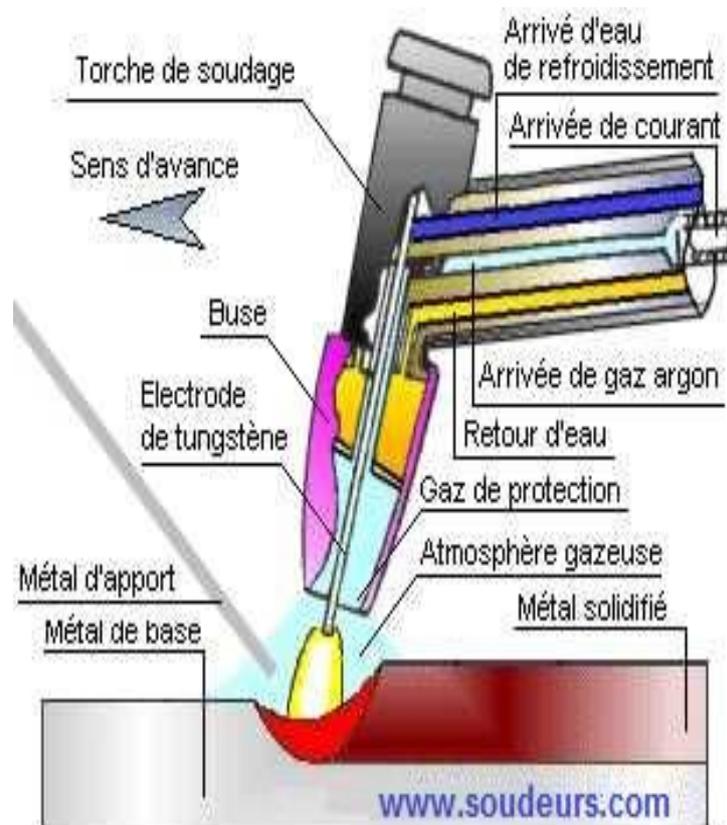
Cette baguette de soudure assure un enrobage de qualité afin d'être utilisé sans aucune difficulté sur tous les types d'acier classiques du marché. La fusion de la baguette est particulièrement douce pour un laitier qui peut se détacher très facilement. La soudure procure de remarquables qualités mécaniques pour une excellente résistance à l'abrasion ou aux chocs répétés. <sup>[20]</sup>

## II.2 Paramètre de soudage

Les différents joints de soudure ont été obtenus selon les paramètres utilisés par l'entreprise NAFTAL, ils sont résumés dans le tableau II.3 suivant :

**Tableau II.3 : Paramètres de soudage TIG.**

Paramètres de Soudage	W (Tungstène)
Gaz	Argon
Pression de gaz	0.5 bar
Courant	220 V
Intensité	30-40 A
Angle projection	60°
Diamètre des fils	3 mm
Type de courant	Alternatif ou Continu



**Figure II.2 : schéma de principe TIG.**

## II.3 Présentation des échantillons

### II.3.1 Elaboration des échantillons

#### II.3.1.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques

L'acier S335 et L'inox 18.8 fourni par le Hall de technologie sont sous formes de tôle d'une épaisseur de 6 mm.

##### II.3.1.1.1 Fraisage des maquettes

Après soudage nous allons travailler sur une fraiseuse universelle pour effectuer un surfaçage pour avoir une épaisseur de 4mm.

##### II.3.1.1.2 Découpage de plaquettes

On coupe 3 éprouvettes des deux tôles qu'on possède, 6 éprouvettes de 10 mm de largeur et 55 mm de longueur avec une épaisseur de 4 mm.

##### II.3.1.1.3 Polissage

Après le découpage des éprouvettes on fait un polissage avec plusieurs papiers abrasifs de différentes granulométries (du plus dur au plus doux pour un effet miroir) de 220 à 1500.

Ce polissage rend la surface des éprouvettes plane et brillante (miroir), le polissage doit être accompagné avec des gouttes d'eau pour éviter les stries sur la surface des éprouvettes.



Figure II.3 : 3 éprouvettes en acier.

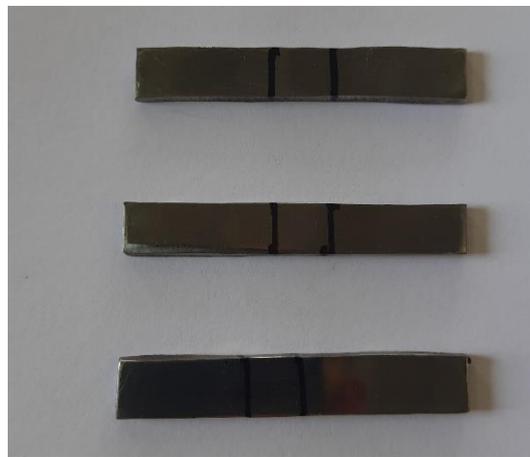


Figure II.4 : 3 éprouvettes en inox.

## II.4 Observation Métallographique

L'observation de l'acier a été réalisée à l'aide d'un microscope optique de marque « AXIOLAB ZEISS » avec des grossissements de X200 et X500. Au moyen d'une caméra, le microscope est relié à un ordinateur équipé d'un logiciel de traitement d'image (image J) et transmis instantanément l'image qui s'affiche sur l'écran et qu'on peut stocker dans des fichiers réservés pour chaque type d'échantillons.

Ces fichiers seront par la suite repris pour une éventuelle analyse d'image. Avant d'être vu ou repris au microscope optique, l'échantillon a subi les opérations suivantes :

Un polissage en utilisant du papier abrasif de granulométrie allant 200 à 1500, Une attaque chimique qui s'effectue par immersion de l'échantillon fraîchement poli et sec dans une solution de Nital (4% vol. HNO<sub>3</sub> et 96% vol. Éthanol). L'attaque est arrêtée après quelque secondes (10-20 secondes).

L'échantillon est rincé par la suite avec l'eau. Le but de l'attaque chimique est de créer un contraste révélant la microstructure de l'acier étudié. Le but de l'attaque métallographique est de créer un contraste révélant la microstructure de l'acier étudié.



**Figure II.5 :** Microscope optique.

## **II.5 Caractérisation mécanique**

### **II.5.1 Essais de dureté**

#### **II.5.1.1 Définition**

La dureté, de symbole général H (de l'anglais-hardness), est une propriété mécanique qui exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée (petites indentations ou rayure).

Beaucoup de méthodes servent à l'évaluation de la dureté ; les plus courantes consistent à mesurer la résistance à la pénétration. <sup>[21]</sup>

#### **II.5.1.2 Principe de l'essai**

Un pénétrateur, de formes différentes suffisamment dures pour ne pas être déformé par le matériau à essayer entre de force dans la surface de la pièce, les conditions de charge et de vitesse d'application étant contrôlées. La profondeur ou dimension de l'empreinte (indentation) résultante est mesurée et rapportée à un nombre de dureté. Plus le matériau est

mou, plus l'empreinte est grande et profonde et plus le nombre d'indexation de la dureté est petit.

Les essais de dureté sont relativement économiques pour les raisons suivantes :

L'appareillage de l'essai est relativement peu cher ; il n'est pas nécessaire d'utiliser une éprouvette spéciale ; l'essai est non destructif- la déformation de l'éprouvette n'est qu'une simple indentation. [22]

### II.5.1.3 Machine d'essais

La machine d'essais de dureté présente à l'ENMTP, permettant de faire les trois types d'essais, est de marque Wolpert.



**Figure II.6 :** Machine d'essais de dureté.

## II.6 Essai de résilience (Charpy)

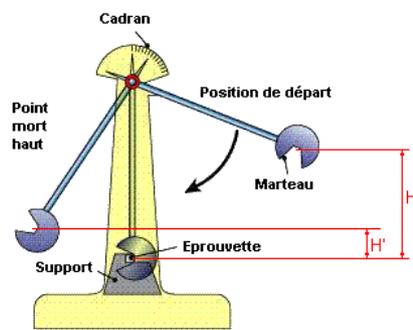
### II.6.1 But de l'essai

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) éprouvette Charpy - sous l'impact d'un "mouton-pendule". On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (joule/cm<sup>2</sup>)) [23].

### II.6.2 Mouton Charpy

Le mouton Charpy est constitué d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe (fig.II.7). Pour un essai, le couteau est amené à une hauteur  $H$  qui correspond à l'énergie de départ  $W_h = mgh$ . Dans sa chute, le couteau va provoquer la Rupture de l'éprouvette qui sera accompagnée d'une absorption d'énergie  $KV$ , et le marteau montera à une hauteur  $H'$  à laquelle est associée une énergie potentielle  $W_{h'} = mgh'$ . Il vient alors simplement  $KV = W_h - W_{h'}$ . Plus  $H$ , la hauteur de remontée est faible, plus le matériau est résilient.

Une éprouvette Charpy est un barreau de section  $10 \times 10$  mm entaillé son milieu et dont la longueur est de 55 mm L'entaille a une forme de cavité en V<sup>[23]</sup>.



Pendule de Charpy

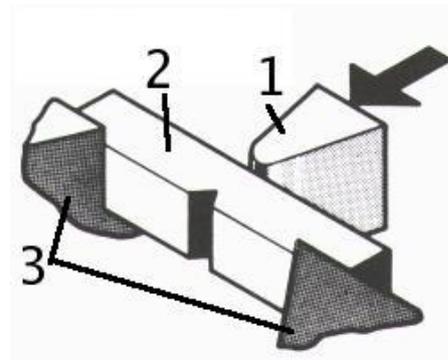


schéma de fonctionnement

**1 : couteau ; 2 : éprouvette ; 3 : appuis**

**Figure II.7 :** Pendule de Charpy + schéma de fonctionnement.

# Chapitre III :

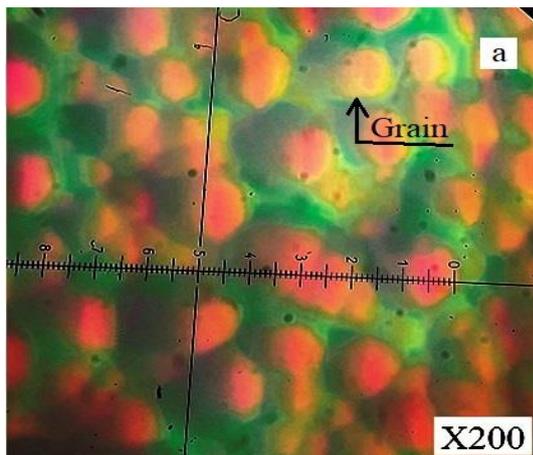
## Résultats et discussions

### III.1 Introduction

Après la réalisation de l'opération de soudage au TIG sur les deux plaques Inox 18.8 et Acier A60, nous avons effectué des essais de mécanique de résilience et de dureté, nous allons présenter et discuter l'ensemble des résultats dans ce chapitre 3.

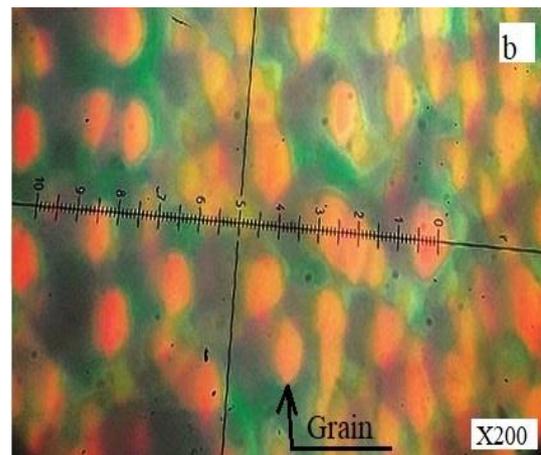
### III.2 Images microscopiques

**Inox :**

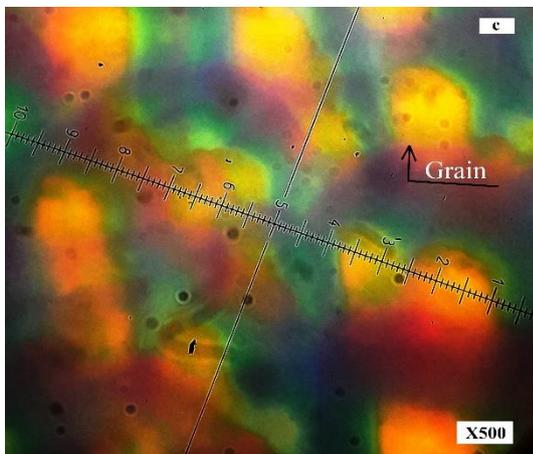


**Figure III.a.1:** Inox.

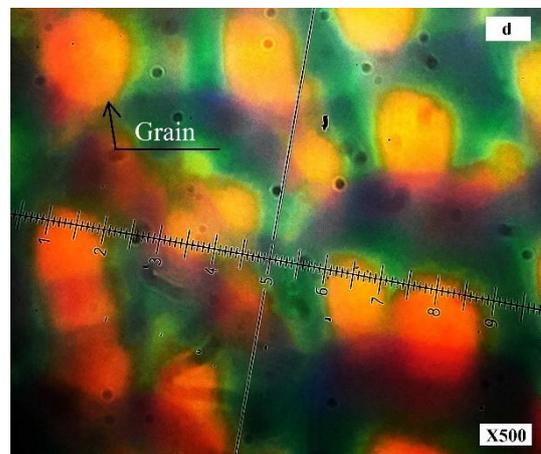
**Joint de soudure**



**Figure III.b.2:** Inox (joint de soudure).

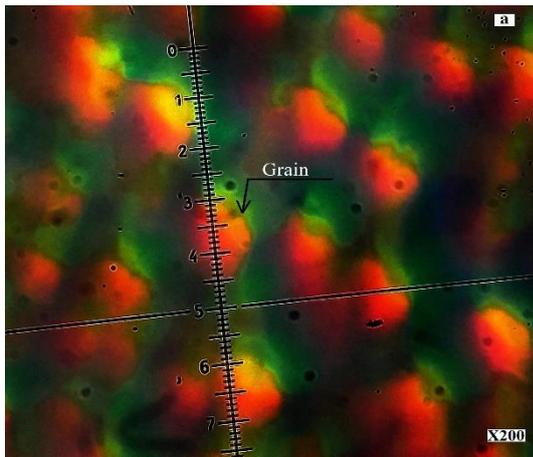


**Figure III.c.3:** Inox.



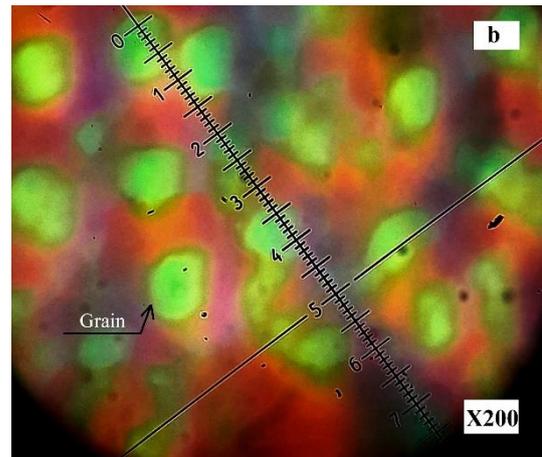
**Figure III.d.4:** Inox (joint de soudure).

**Acier**

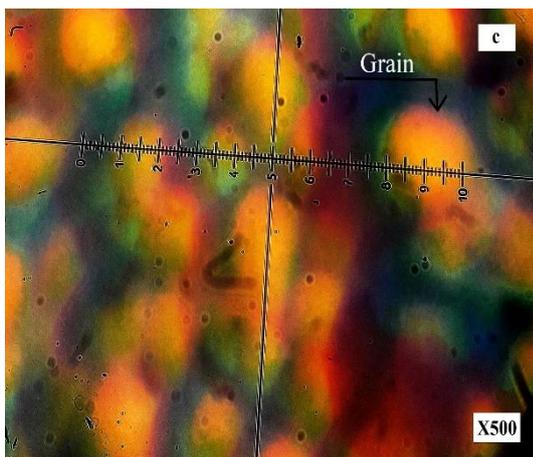


**Figure III.a.5:** acier.

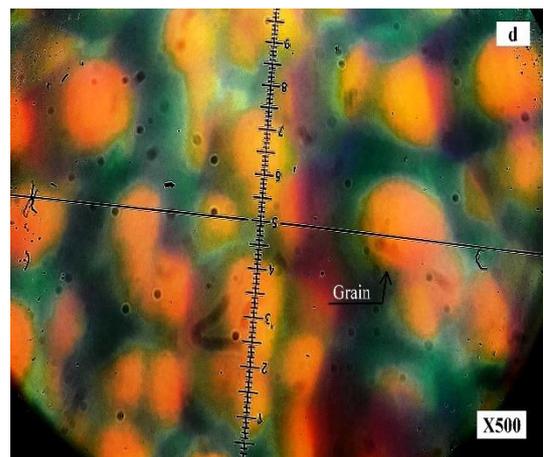
**Joint de soudure**



**Figure III.b.6:** Acier (joint de soudure).



**Figure III.c.7:** Acier.



**Figure III.d.8:** Acier (joint de soudure).

### III.3 Les taille de grains :

Après avoir terminé l'observation métallographique on passe aux calculs de la taille de grains :

$$\text{Taille moyenne du grain} = \frac{\text{Taille du grain en mm} \times 100}{\text{grossissement de l'objectif} \times \text{grossissement de l'oculaire}}$$

Les valeurs sont traduites sur le tableau suivant :

**Tableau III.1** : diamètre des grains

	<b>X500 Joint de soudure</b>	<b>X500 Substrat</b>
<b>ACIER A60 (µm)</b>	5	4.44
<b>INOX 18.8 (µm)</b>	3.6	3.2

#### Observations

On observe sur les deux joints de soudure de l'acier A60 et l'inox 18.8 la présence des grains d'un diamètre plus grand que celui des deux métaux de base, cette morphologie est due à la réaction de solidification qui s'est déroulée juste après l'opération de soudage.

Sur la zone affectée thermiquement un grossissement de tailles de grains est observé Cette morphologie sous forme de grains à une liaison avec la vitesse de soudage et la vitesse de refroidissement du bain de fusion.

Les figures, III.b.2, III.d.4, III.b.6, III.d.8 montrent la microstructure de la zone affectée thermiquement qui est caractérisée par un grossissement des grains avec un diamètre qui varie entre 4.4 µm et 6 µm et elle est proche de la zone de fusion après le polissage du joint de soudure, comme zone de fusion la taille des grains augmente avec la quantité d'énergie absorbée.

Nous constatons que la microstructure des deux métaux de base A60 et Inox 18.8 est composé de ferrite et de perlite, la température des deux composants est de 914 °C et de 727 °C respectivement.

Les températures atteintes par l'arc électrique dépassent les 3600°, alors que la température de fusion du métal à souder est de l'ordre de 1740 °C pour l'acier, ce qui a permis l'apparition de la ferrite et de la perlite.

La zone affectée thermiquement dans notre cas de soudure présente une microstructure ferrito-perlitique à grains fins est due à l'influence de température lors du dépôt du laitier poursuivi d'un refroidissement à l'air.

La transformation perlite a le caractère de diffusion, à première étape, elle est caractérisée par l'apparition des germes de cémentite ( $Fe_3C$ ) sur les joints des grains.

### III.4 Résultats de la résilience

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de la résilience en J/Cm<sup>2</sup> des deux éprouvettes :

**Tableau III.2** : les valeurs de la résilience en J/Cm<sup>2</sup> des deux éprouvettes

<b>Résilience en j/cm<sup>2</sup> de la plaque en Acier A 60</b>	
<b>Résultat après calcul</b>	K= 444
<b>Résilience en j/cm<sup>2</sup> de la plaque en Inox 18.8</b>	
<b>Résultat après calcul</b>	K= 796

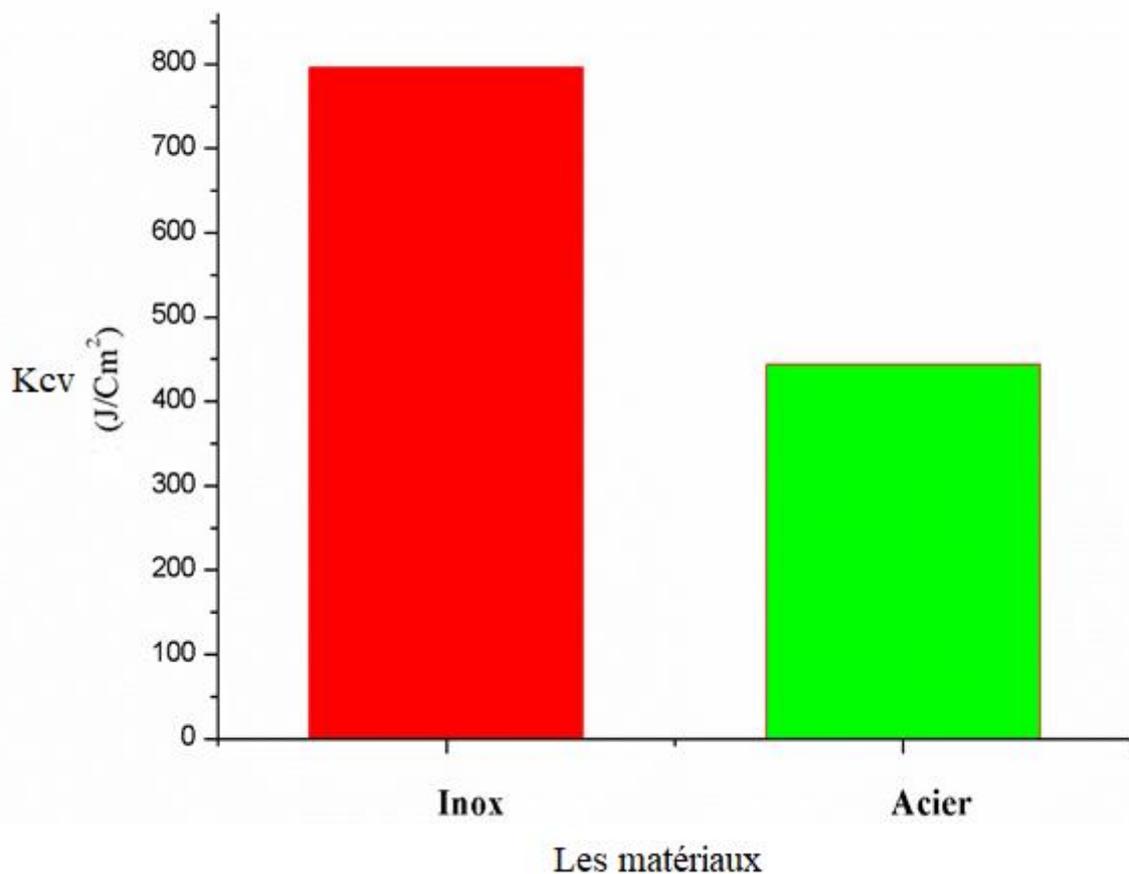
$$K_{cv} = \frac{K_{max} - K}{Section}$$

### III.4.1 Justification des résultats :

**Tableau III.3** : Justification des résultats de résilience

Acier A60		Inox 18.8	
<b>K max</b>	300	<b>K max</b>	300
<b>K1</b>	140	<b>K2</b>	85
<b>S (Section)</b>	0.36 cm <sup>2</sup>	<b>S</b>	0.27 cm <sup>2</sup>
<b>Θ (Angle de déformation)</b>	90°	<b>Θ</b>	110°

L'histogramme de la figure représente les valeurs de la résilience enregistrées sur les deux éprouvettes :



**Figure III.9** : Histogramme des résultats de la résilience.

Les résultats de la résilience effectuée sur l'entaille en V des éprouvettes au milieu du joint de soudure, montrent que le matériau inox 18.8 est plus tenace que l'acier A60, il demande une énergie plus importante à la rupture pour une valeur de 796 J/Cm<sup>2</sup> et, contrairement à l'acier A60 qui présente une énergie à la rupture égale à 444 J/Cm<sup>2</sup>.

A partir de ces résultats nous concluons que l'inox 18.8 a un comportement ductile à la rupture par rapport à l'acier A60 qui est fragile et peu résistant aux chocs.

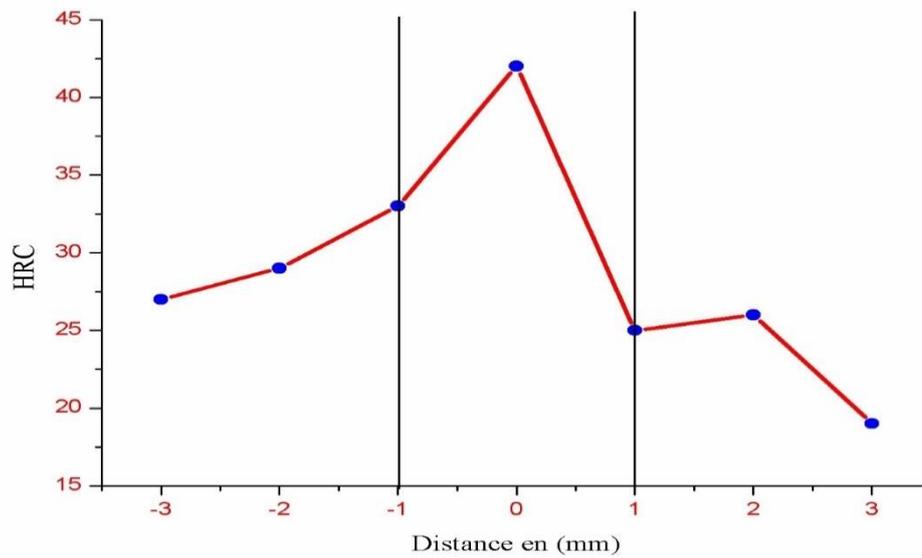
### III.5 Les résultats de la dureté

Le tableau ci-dessous représente les valeurs obtenues de la dureté HRC des deux éprouvettes :

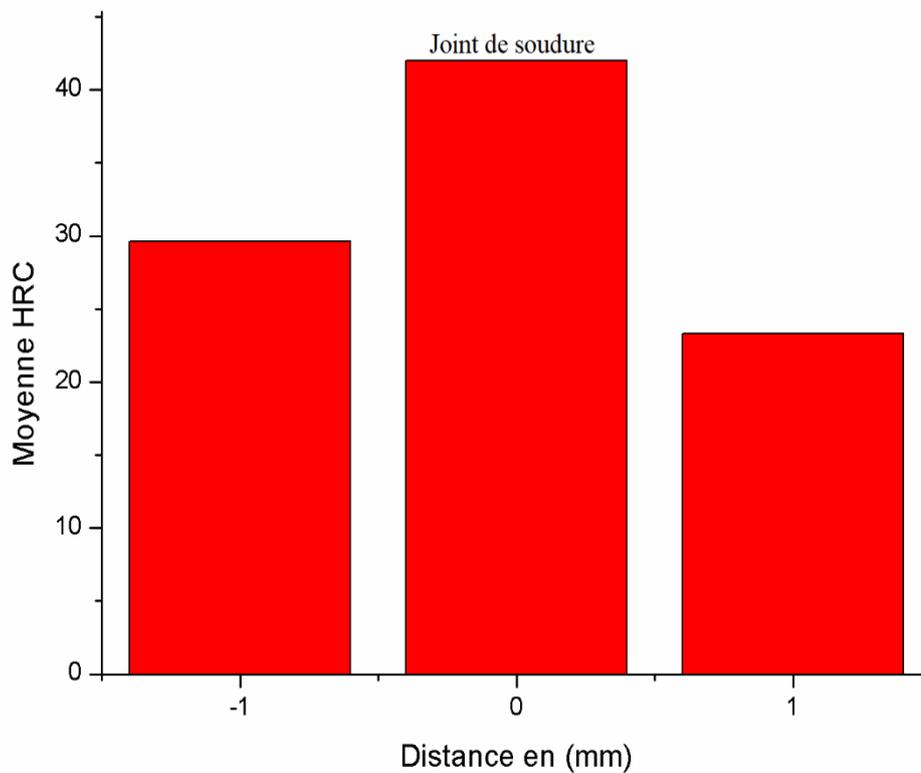
**Tableau III.4** : Les valeurs de l'essai de dureté HRC (Rockwell)

	<b>Acier A60</b>	<b>Inox 18.8</b>
<b>N°</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Moyenne</b>
1	27	35
2	29	36
3	33	36
<b>4 (Joint de soudure)</b>	42	43
5	25	35
6	26	34
7	19	36

La figure ci-dessous représente le profil de dureté pour l'éprouvette en Acier A60 :



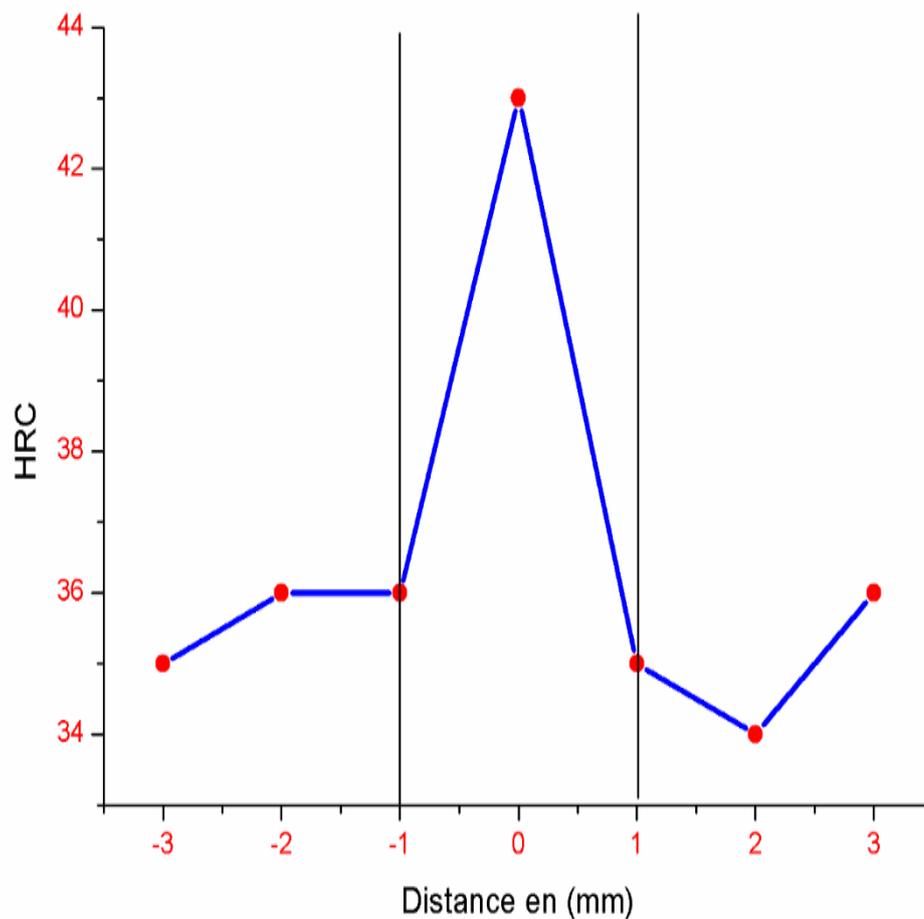
**Figure III.10 :** Dureté HRC Acier A60. L'histogramme ci-dessous représente les valeurs moyennes des essais des essais de dureté de l'acier A60 :



**Figure III.11 :** Histogramme des valeurs moyennes HRC.

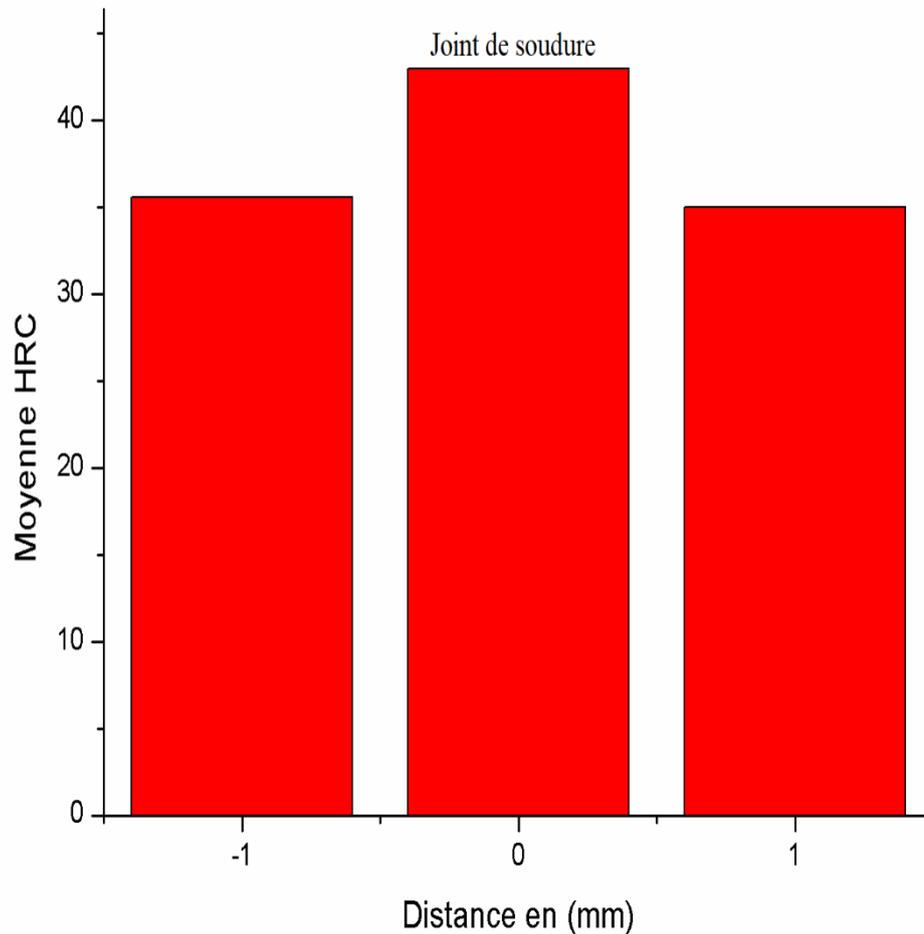
Nous remarquons sur le graphe qu'il y'a un pic au niveau du joint de soudure, c'est la valeur maximale obtenue lors des essais de la dureté, la valeur moyenne est comprise entre 33 ET 25 HRC, ce changement peut être expliqué par les modifications métallurgiques au niveau du joint de soudure.

La figure ci-dessous représente le profil de dureté pour l'éprouvette en Inox 18.8 :



**FigureIII.12** : Dureté HRC Inox 18.8.

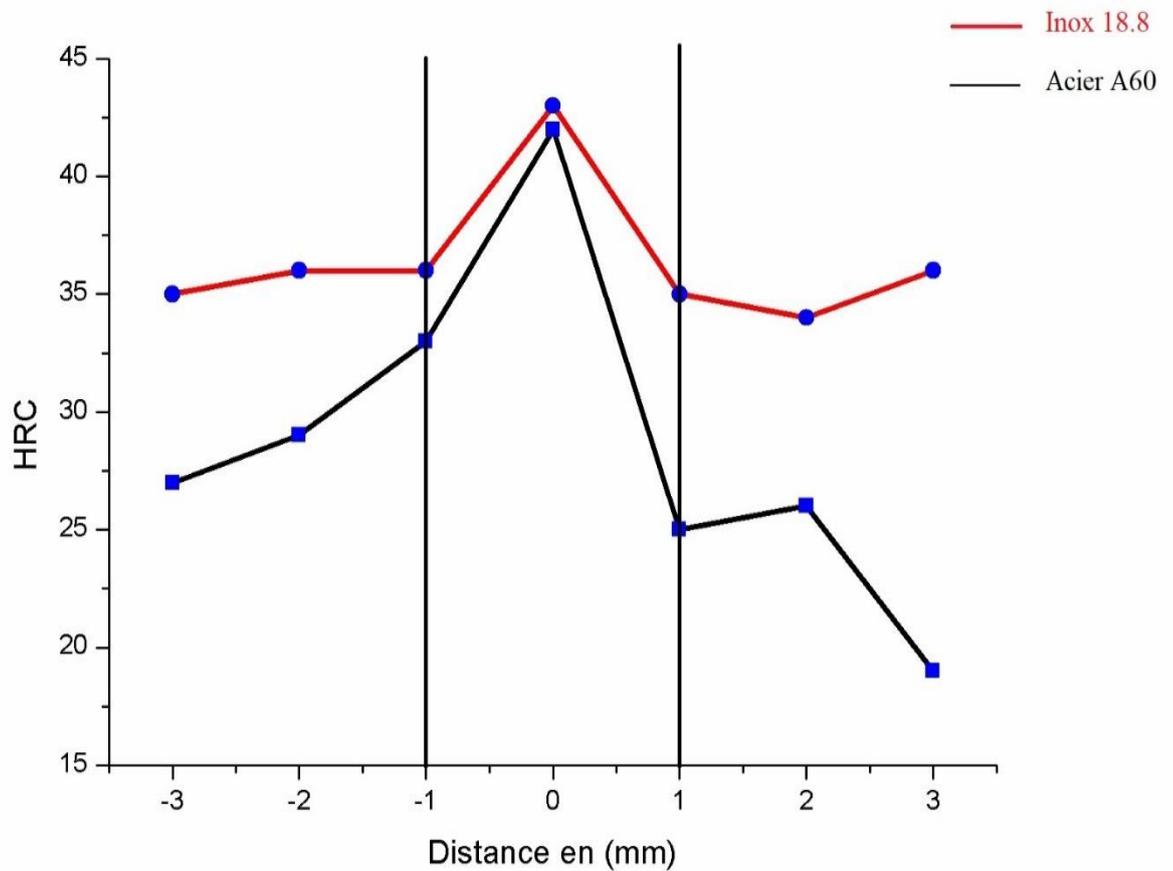
L'histogramme ci-dessous représente les valeurs moyennes des essais des essais de dureté de l'inox 18.8 :



**Figure III.13.** Histogramme des valeurs moyennes HRC.

Nous remarquons sur le graphe qu'il y'a un pic au niveau du joint de soudure, c'est la valeur maximale obtenue lors des essais de dureté, la valeur moyenne est comprise entre 36 ET 35 HRC, ce changement peut être expliqué par les modifications métallurgiques au niveau du joint de soudure.

La figure ci-dessous représente le profil de dureté des deux éprouvettes (Etude comparative) :



**Figure III.14. :** Dureté HRC Acier et Inox

Nous remarquons que la dureté Rockwell est plus élevée dans le cas de l'éprouvette Inox 18.8 par rapport à l'acier A60, car l'inox 18.8 est plus tenace et plus dur que l'acier A60, mais les valeurs de la dureté au niveau du joint de soudure se rapprochent au pic.

# Conclusion générale

## Conclusion général

---

Cette étude nous a permis de mieux interpréter et comprendre l'effet du soudage sur l'évolution de la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint de soudure TIG.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à des essais mécaniques et des observations métallographiques qui ont été effectués sur des éprouvettes en acier A60 et inox 18.8 afin de comprendre leurs comportements mécaniques après le dépôt d'un joint de soudure sur les deux tôles.

Le joint de soudure est testé par rapport à son comportement aux chocs à travers les essais de résiliences dont la caractéristique mécanique (ténacité) est une propriété de ductilité.

Des observations métallographiques nous ont permis de voir les différentes zones affectées par la chaleur de la fusion de la baguette Tungstène.

D'après les observations et les résultats obtenus nous concluons que :

La zone fondue a montré un grossissement de grains à cause de la température élevée du soudage.

- On remarque que la taille de grain au niveau du joint de soudure est plus grande que celle du substrat (Acier A60).
- On remarque que la taille de grain au niveau du joint de soudure est plus grande que celle du substrat (Inox 18.8).
- Sur les joints de soudure des deux matériaux on remarque que la taille du grain de l'inox 18.8 est plus grande que celle de l'acier A60.

Les résultats obtenus pour la caractérisation mécaniques de nos éprouvettes :

Pour les essais de dureté :

- La valeur de la dureté du joint de soudure de l'inox 18.8 est supérieure à celle du substrat
- La valeur de la dureté du joint de soudure de l'acier A60 est supérieure à celle du substrat
- Sur les joint de soudure on remarque que l'inox 18.8 est plus dur que l'acier A60

## Conclusion général

---

Pour les essais de la résilience :

- On remarque que la valeur de la résilience de l'inox 18.8 est plus importante que celle de l'acier A60 car l'inox 18.8 est connu par sa bonne résistance mécanique et de son excellente ténacité.

### Perspective

Ce travail ne constitue qu'une modeste contribution à la compréhension des différents phénomènes rencontrés lors du soudage TIG de structures métalliques en acier A60 et en Inoxy 18.8. Afin de compléter nos résultats, plusieurs directions d'études pourraient être suivies :

- Diffraction des rayons X (DRX)
- Microscopie électronique à balayage (MEB)
- La micro-dureté
- Essai de traction

# Références bibliographiques

## Bibliographie

---

- [1] Perfect Welding - Le magazine. - Fronius International
- [2] HADDOU. Hanane Assemblages soudés et matériaux, mémoire fin d'étude master II université de Telemcen ,2018/2019
- [3] déformations et contraintes en soudage /extraits de textes de H. Gerbeaux, présentés et mis à jour par P. Berthet.
- [4] Catalogue Cetim centre de Val de Loire Centre de Ressources Technologiques certifié par le ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation.
- [5] Hal archive Constant Ramard. Étude expérimentale et numérique du soudage multi passe : application à un acier de construction navale. Physique, Université de Bretagne Sud, 2018. Français.
- [6] Francis, Justin D. April 2002. « Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis ». Blacksburg, Virginia, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [7] Laurent Carbonell (institut de soudure France).
- [8]: Hal archive Étude expérimentale et numérique du soudage multipasse : application à un acier de construction navale Constant Ramard
- [9] Granjon, H. Bases métallurgiques du soudage /H. Granjon. pref. De P. Lacombe.
- [10] Callister, William D. 2001. Science et génie des matériaux. Mont-Royal, Québec Modulo, xvii, 781 p.p
- [11] D. Kaplan et G. Murry, (2001) les phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques dans la zone affectée par la chaleur en soudage. Métallurgie et mécanique du soudage, Lavoisier.
- [12] Cours Assemblage thermique par Soudage école nationale d'ingénieur de Tunis.

## Bibliographie

---

[13] Techniques ingénieur base-documentaire mecanique-th7/assemblage des matériaux par soudage

[14] livre de Jean MATON.

[15] BENEDDEB Mostefa. Étude les défauts de soudage des pipelines, mémoire fin d'étude master II université de Mohamed Khider Biskra, 2011 /2012

[16] Documents défauts de soudage Yamani Institute of Technology.

[17] A. Mostefa, Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration à froid dans la Zat, Mémoire fin d'étude Master II présenté à l'université de Abubakr belkaid-Tlemcen ,2017/2018

[18] Certificat d'analyse chimique et mécanique de l'acier A60 (d'après le fabricant "ACCIAIRIE VENETE SPA")

[19] S.Bensaada cours élaboration des métaux ferreux (fontes et aciers) université de Biskra

[20] H, Amer. M, Younes, contrôle qualité des soudures X52M réalisées par les procédés SAW et SMAW, Mémoire fin d'études master II présenté à l'université MOULOUE Mammeri de Tizi-Ouzou.

[21] Document scientifique archive ouverte HAL.

[22] polycopie de résistance des matériaux pour deuxième année tronc commun 2017 université de Biskra

[23] Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux Marc Blétry 2006-2007 École nationale supérieure des mines de Paris.

[24] Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD) - Dr. B. JACQUOT

## Bibliographie

---

# Résumé

---

## **Résumé :**

L'objet de cette étude consiste à mettre en évidence le comportement mécanique et l'observation métallographique de deux plaques en acier A60 et Inox 18.8.

Nous nous sommes intéressés au joint de soudure sur les deux plaques plus précisément sur les propriétés mécaniques telles que la résilience et la dureté.

On étudie l'évolution structurale des joints soudés et la zone affectée thermiquement (Z.A.T). Le type de soudage effectué est le soudage au TIG (Tungsten Inert Gas), et on abordera les propriétés mécaniques du joint de soudure.

Les propriétés mécaniques de l'éprouvette en inox 18.8 sont plus importantes que celle de l'acier A60.

## **Abstract:**

The object of this study is to highlight the mechanical behavior and metallographic observation of two samples in A60 and stainless steel 18.8.

We focus our study on the weld joint of two samples more precisely on the mechanical properties such as the resilience and the hardness.

We study the evolution of the welded joints and the heat affected zone (HAZ). The type of welding performed is TIG (Tungsten Inert Gas) welding.

The mechanical properties of the stainless steel 18.8 specimen are more important than those of the A60 steel.

## **ملخص:**

الغرض من هذه الدراسة هو إثبات السلوك الميكانيكي والملاحظة المعدنية لوحين من الفولاذ A60 و 18.8 من الفولاذ المقاوم للصدأ.

كنا مهتمين بمفصل اللحام على الصفيحتين بدقة أكبر على الخواص الميكانيكية مثل المرونة والصلابة. ندرس التطور الهيكلي للوصلات الملحومة والمنطقة المتأثرة بالحرارة (Z.A.T). نوع اللحام الذي يتم إجراؤه هو لحام TIG (Tungsten Inert Gas)، وسوف نناقش الخصائص الميكانيكية والمعدنية لوصلة اللحام. تعد الخواص الميكانيكية لعينة الفولاذ المقاوم للصدأ 18.8 أكثر أهمية من تلك الخاصة بفولاذ A60 .