

**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 :

**CHETRAT AMINA**

**Thème**

---

**Caractérisations d'un joint de soudeur obtenu sous atmosphère  
marine**

---

Soutenu le -06-2022 devant le jury composé de :

Mr.		Président
Mr.	YOUNES R	Rapporteur
Mr.		Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2021/2022

# Remerciements

# *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

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.

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 l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia,

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

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

# *Dédicace*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mes très chers parents*

*A mes frères et mes sœur*

*A tous mes proches*

*A tous les enseignants*

*A tous mes amis*

*Chetrat Amina*

## Remerciements

---

# Sommaire

## Sommaire

	Introduction générale.....	01
	<b>Chapitre I : étude bibliographique</b>	
I.	Introduction.....	3
I.1	I.1-Soudage.....	3
I.2	Les procédés de soudage.....	5
I.1.2.1	Soudage à l'électrode enrobée.....	8
I.1.2.2	Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG.....	9
I.3	Élément sur les phénomènes physiques du soudage.....	11
I.1.3.	Effet thermique.....	11
I.1.3.2	Effets mécaniques du régime thermique.....	11
I.1.3.2.1	les déformations en soudage.....	11
I.1.4	les contraintes résiduelles.....	12
I.1.4	contrainte et déformation dans le sens longitudinal.....	12
I.1.4.2	Contrainte et déformation transversales.....	12
I.1.4.3	Effet métallurgique.....	12
I.1.5	modification microstructurale en zone affectée par la chaleur.....	13
I.1.5.1	Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur.....	13
I.1.5.2	Transformation en ZAC lors du chauffage.....	13
I.1.5.3	Transformation en ZAC lors du refroidissement.....	14
I.1.5.5	Transfert du métal dans l'arc.....	15
I.1.5.5.1	Transferts par court –circuit.....	16
I.1.6	Transfert globulaire.....	16
I.1.7	Transfert par pulvérisation axiale (spray).....	17
I.2	les défauts des soudages.....	18
I.2.1	Les fissures.....	18
I.2.2	type de fissure.....	19
I.2.2.1	Fissures De Gorge (Throat Cracks) .....	20
I.2.2.2	Fissures De Racine .....	20
I.2.2.3	Fissures De Cratère.....	20
I.2.2.4	Fissures Au Raccordement.....	21

## Sommaire

I.2.2.5	Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	21
	<b>Chapitre II : Matériaux et techniques Expérimentales</b>	
II.	Introduction.....	23
II.1	Matériaux utilisés .....	23
II.1.1	Acier S460N.....	23
II.2	Présentation des échantillons.....	24
II.2.1	Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques.....	24
II.3	Technique de soudage.....	24
II.4	Paramètre de soudage .....	25
II.5	Polissage.....	26
II.6	Observation Métallographique.....	26
II.6.1	Observations au microscope optique.....	26
II.7	Caractérisation mécanique.....	27
II.7.1	Essais de dureté.....	27
II.7.1.1	Définition.....	27
II.7.1.2	Buts et objectifs de l'essai de dureté.....	27
II.4.1.3	Machine d'essais.....	28
II.8	Essai de résilience (Charpy).....	28
II.8.1	But de l'essai.....	28
II.9	La corrosion.....	30
II.9.1	Technique de la masse perdue.....	30
II.9.2	Manipulation de la technique de masse perdue.....	30
II.9.2.1	Manipulation.....	31
	<b>Chapitre III : Résultats et discussions</b>	
III.1	Introduction.....	33
III.1.1	Images microscopiques S1.....	33

## Sommaire

---

III.1.2	Observation.....	34
III.1.3	Observation.....	35
III.4	Les résultats de la dureté.....	35
III.5	Les résultats de diffraction de rayon X.....	38
III.6	Les résultats essai de Charpy.....	39
III.7	Oxydation des joints de soudure.....	40

# Liste des figures

## Liste des figures

	<b>Chapitre I</b>	
	<b>Étude bibliographiques</b>	
<b>Figure I.1</b>	Soudure autogène bout à bout sur chanfrein en V.....	04
<b>Figure I.2</b>	soudure autogène multi passe sur chanfrein avec talon.....	04
<b>Figure I.3</b>	soudure autogène sur bords droit avec support à l'envers.....	05
<b>Figure I.4</b>	soudage autogène brasage et soude brasage.....	05
<b>Figure I.5</b>	Classification de certains procédés de soudage.....	07
<b>Figure I.6</b>	L'électrode enrobée.....	09
<b>Figure I.7</b>	Procédés de soudage MIG/MAG.....	10
<b>Figure I.8</b>	Éléments sur les phénomènes physiques du soudage.....	11
<b>Figure I.9</b>	Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C.....	13
<b>Figure I.10</b>	(a) Exemple de diagramme TRC en conditions de soudage ( $\theta M=1300^\circ$ ) : (b) Courbe (dureté-critère de refroidissement $\Delta t$ ).....	15
<b>Figure I.11</b>	Transferts par court-circuit.....	16
<b>Figure I.12</b>	Transfert globulaire.....	17
<b>Figure I.13</b>	Transfert par pulvérisation axiale.....	18
<b>Figure I.14</b>	La fissure longitudinale.....	19
<b>Figure I.15</b>	La fissure transversale.....	19
<b>Figure I.16</b>	Les types de fissure.....	20
	<b>Chapitre II : Matériaux et techniques</b>	
	<b>Expérimentales</b>	
<b>Figure II.1</b>	1poste a soude Pulser ; 2 baguette de rutile barracuda 3 bain d'immersion de soudage à l'eau.....	25
<b>Figure II.2</b>	polisseuse sous jet d'eau.....	26

## Liste des figures

<b>Figure II.3</b>	microscope optique.....	27
<b>Figure II.4</b>	Machine d'essais de dureté.....	28
<b>Figure II.5</b>	essai de Charpy.....	29
<b>Figure II.6</b>	couteau ; 2 : éprouvette ; 3 : appuis.....	29
<b>Figure II.7</b>	: la technique de la masse perdue	30
<h3>Chapitre III</h3> <h3>Résultats et discussions</h3>		
<b>Figure III.1</b>	joint du soudeur S1.....	33
<b>Figure III.2</b>	joint du soudeur S1.....	33
<b>Figure III.3</b>	joint du soudeur S1.....	33
<b>Figure III.4</b>	joint du soudeur S2 .....	34
<b>Figure III.5</b>	joint du soudeur S2.....	34
<b>Figure III.6</b>	joint du soudeur S2.....	34
<b>Figure III.7</b>	Dureté HRC S1.....	35
<b>Figure III.8</b>	Dureté HRC S2.....	36
<b>Figure III.9</b>	la dureté HRC S1, HRC S2.....	37
<b>Figure III.10</b>	la dureté HRC S1, HRC S1 .....	38
<b>Figure III.11</b>	DRX S1.....	38
<b>Figure III.12</b>	DRX S2.....	39
<b>Figure III.12</b>	Résistance au choc pour une température 15 degrés.....	39
<b>Figure III.14</b>	la différence de masse en fonction de temps.....	40

## Liste des figures

---

<b>FigureIII.15</b>	la différence de masse en fonction de temps.....	41
FigureIII.15	étude comparative de différences de masse en fonction de temps pour deux Échantillons S1, S2.....	42

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau II.1</b>	Composition chimique de l'acier S460N.	23
<b>Tableau II.2</b>	composition chimique de la baguette barracuda.	24
<b>Tableau II.3</b>	Paramètres de soudage des échantillons sous environnement marin.	25
<b>Tableau III.1</b>	les valeurs de dureté HRC (Rockwell)	35

# Introduction générale

## Introduction général

Parmi les procédés d'assemblage, le soudage tient une place de premier choix pour ses multiples applications dans des secteurs industriels aussi nombreux que variés (aéronautique, nucléaire, cryogénie, naval, plates-formes). La compréhension de ce procédé requiert un investissement à la fois scientifique et technologique. Le développement de la technique est ancienne mais la technologie est en constante évolution et ouvre régulièrement de nouveaux champs d'application.

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 plusieurs procédés de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour l'échauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques.

Dans notre cas d'étude nous avons le poste utilisé est de type Pulse 300, 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. Pour ce travail, l'électrode utilisée est la Barracuda (E42 2 1 Ni RR 51) avec un diamètre de 4 mm Il s'agit d'une électrode rutile de soudage humide spécialement formulée.

Le but de ce mémoire de master est d'étudier les caractérisations d'un joint de soudeur obtenu sous atmosphère marin pour deux échantillons on acier S460N.

Nous avons partagé notre travail en trois chapitres :

- ❖ Le premier chapitre présente les généralités sur le soudage
- ❖ Le deuxième chapitre est consacrée à la démarche expérimentale, elle présent les matériaux et les moyenne expérimentaux mises en place (technique de caractérisation mécanique et microstructurale de joint de soudeur, les essais de dureté et essai de Charpy.

## Introduction général

---

- ❖ Enfin de dernier chapitre est consacré à la discussion des résultats expérimentaux obtenus des différents d'essai effectué pour la caractérisation et microstructurale de joint de soudeur acier S460N.
- ❖ Enfin en terminèrent par une conclusion générale.

# Chapitre I :

## Étude bibliographiques

# **Chapitre I :**

## **Étude bibliographiques**

## **I. Introduction**

Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le plus répandu dans la plupart des domaines industriels (transporte, industrie pétrolier et gazier construction navale, aéronautique, automobile etc.) Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par Pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression.

Dans ce chapitre on va présenter les procédés du soudage ainsi que les déformations de soudage et leurs défauts dans les joints soudés.

### **I.1-Soudage**

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes Les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. [1]

Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, le soudage se présente sous deux aspects :

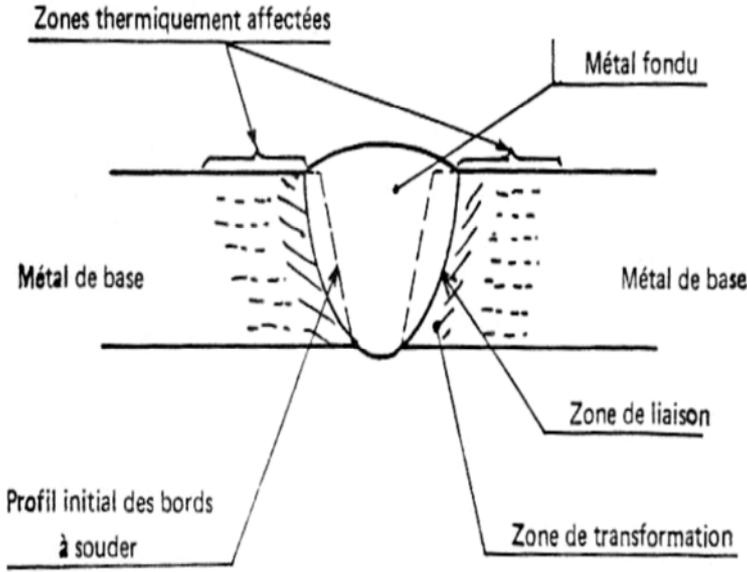
#### **a. Le soudage automatique :**

Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature identique. Dans ce procédé

Le métal des pièces à assembler participe à la constitution du joint au même titre que le métal d'apport.

Donc c'est une opération de "fusion localisée" de deux pièces de même nature Le métal de base se dilue dans le métal d'apport.

La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler. Les figures (1, 2 et 3) représentent des types de soudures autogènes [2].



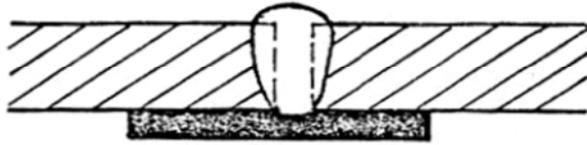
**Figure I.1 :** Soudure autogène bout à bout sur chanfrein en V

**Soudure autogène multipasse sur chanfrein avec talon**



**Figure I.2 :** soudure autogène multi passe sur chanfrein avec talon

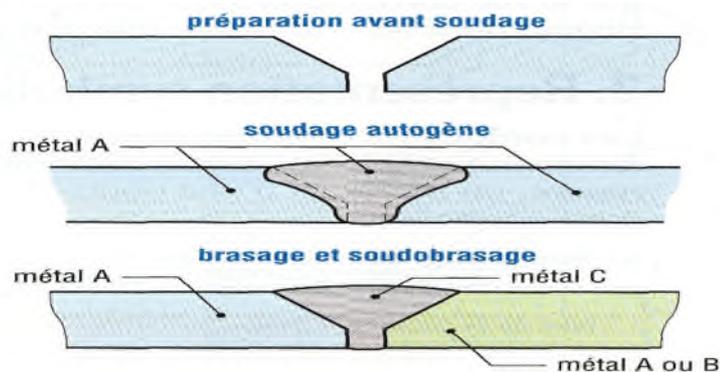
### Soudure autogène sur bords droits avec support à l'envers



**Figure I.3 :** soudure autogène sur bords droit avec support à l'envers

**b. soudage autogène :** les pièces à assembler, de même nature ou de composition voisine, participent à la constitution du joint ou du cordon de soudure. L'assemblage est dit homogène, c'est-à-dire « fait du même métal » (figure I .4).

**c. Brasage et soude brasage :** l'assemblage est hétérogène ; la formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une colle. La température de fusion du métal d'apport est inférieure à celle des matériaux à souder qui peuvent être de natures différentes (figure I .4). [3]



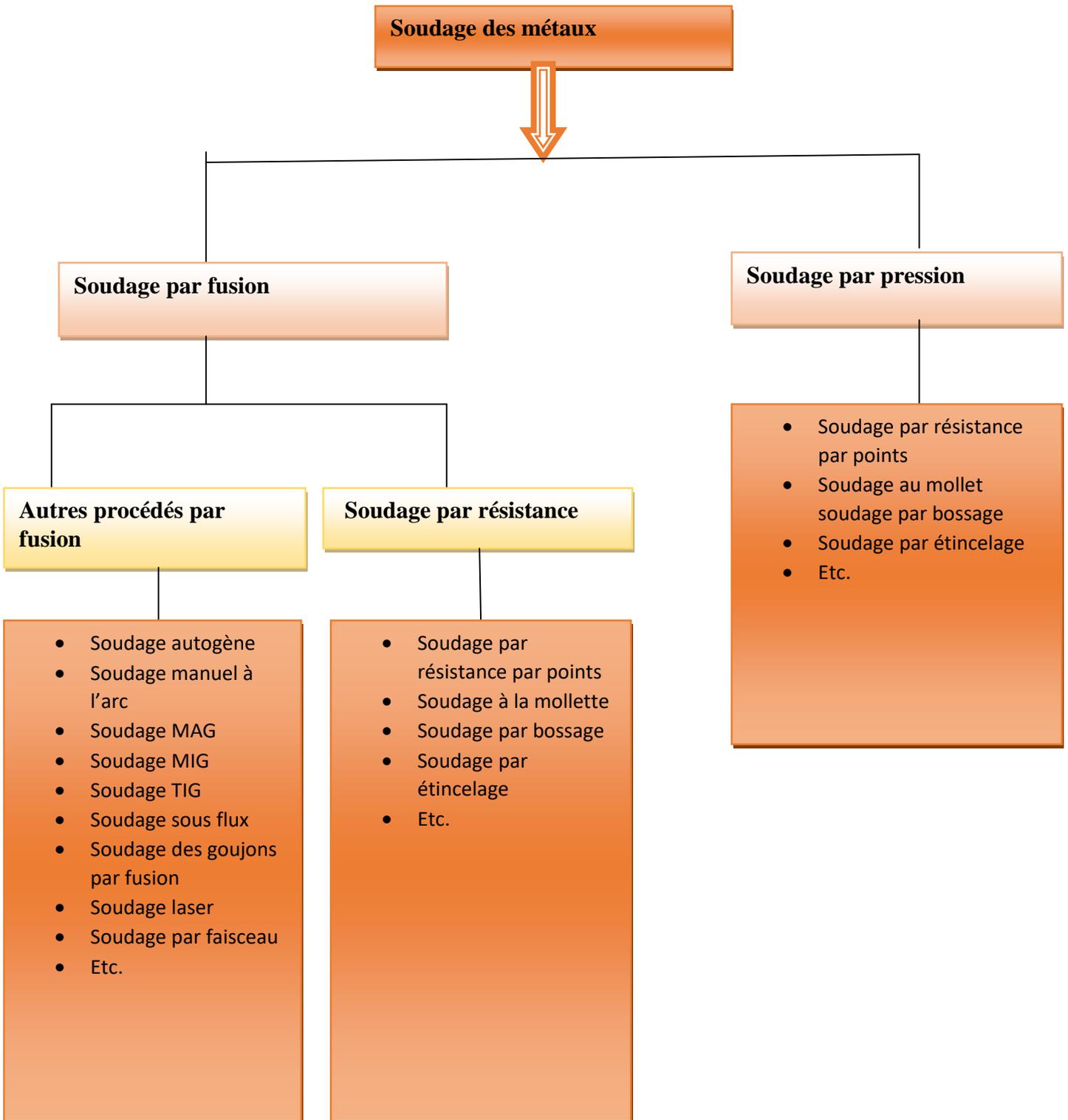
**Figure I.4 :** soudage autogène brasage et soude brasage

## I.2 Les procédés de soudage

Il existe plusieurs procédés de soudage caractérisés par le type de source d'énergie pour l'échauffement et par l'état du métal à l'endroit du soudage. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. [4]

Dans le domaine de la Construction Métallique, l'utilisation est limitée à un petit nombre. En effet, pour le soudage des structures en acier, les procédés du soudage manuel à l'arc, du Soudage à l'arc avec électrode fusible et le soudage sous flux sont principalement utilisés. Par conséquent, les procédés en gras de seront présentés ci-après toutefois certains autres procédés sont utilisés pour des applications particulières en Construction métallique.

Par exemple, pour créer des poutres mixtes, les goujons (connecteurs) sont soudés sur la poutre en acier par le « soudage à l'arc des goujons par fusion ». On peut noter que la NF EN ISO 4063 définit la nomenclature pour approximativement 80 procédés et variantes de soudage des métaux. [5] Ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre peuvent être Classés Comme le montre la (Figure I.5), il existe une large variété de procédés de soudure.



**Figure I.5 :** Classification de certains 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.

### **I.1.2.1 Soudage à l'électrode enrobée**

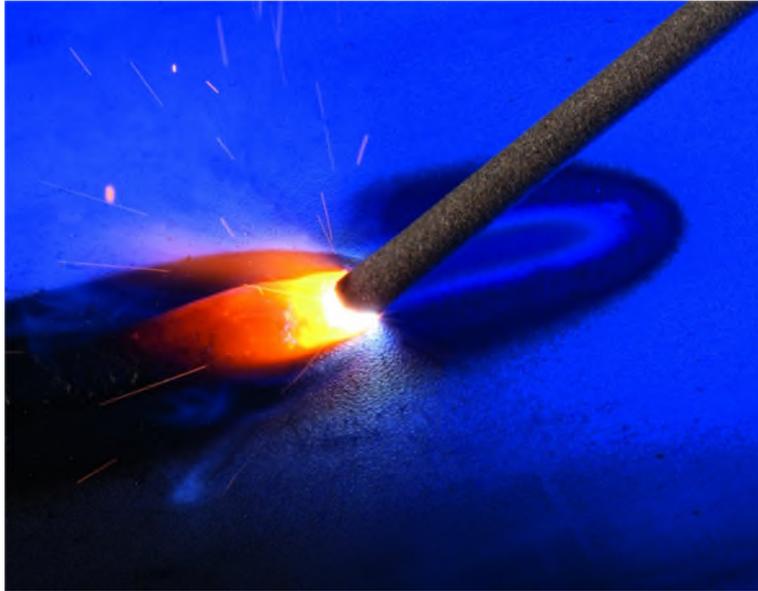
Le soudage électrique à l'arc électrode enrobée est un procédé utilisé comme moyen

De chauffage, l'énergie d'un arc électrique qui jaillit entre une électrode fusible constituant

Le métal d'apport et les pièces à assembler. [6]

Les électrodes de soudages sont constituées par (Figure I. 6) :

- ✓ Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant dont la 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



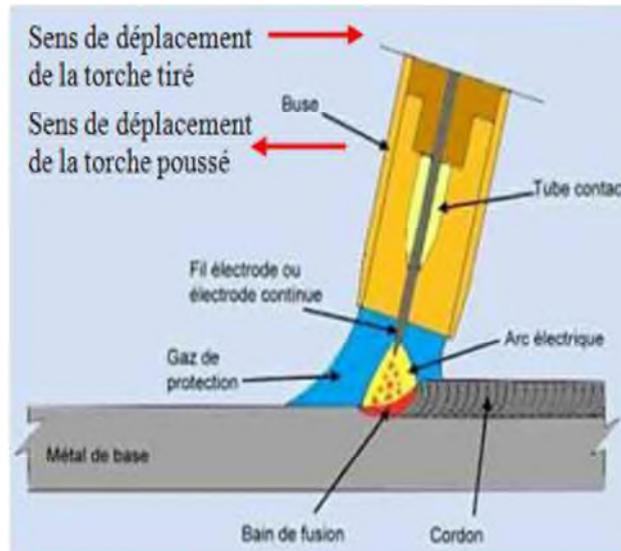
**FigureI.6** :L'électrode enrobée.

### **I.1.2.2 Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG**

Le développement du procédé MIG-MAG (nommé aussi Gaz Métal Arc Welding, GMAW) visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il s'est vite imposé dans l'industrie en raison de son efficacité au regard des soudures importantes.

Enfin, comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, le procédé MIGMAG s'est aussi révélé plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais.

Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.



**FigureI.7 : Procédés de soudage MIG/MAG**

La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base (FigureI.7). Un gaz ou un mélange de gaz provenant, d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée.

Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage, où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux

Catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

- ✓ Le procédé MAG (Métal Active Gaz) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz Carbonique (CO<sub>2</sub>), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO<sub>2</sub>) ou d'un Mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O<sub>2</sub>).

- ✓ Le procédé MIG (Métal Inerte Gaz) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He). [7]

### 1.3 Élément sur les phénomènes physiques du soudage

Le soudage est considéré comme une technique spéciale et multidisciplinaire. Le résultat de l'opération de soudage dépend étroitement d'un couplage entre les phénomènes thermiques, métallurgiques, mécaniques et électro-magnéto-hydrodynamiques (Figure I .8).

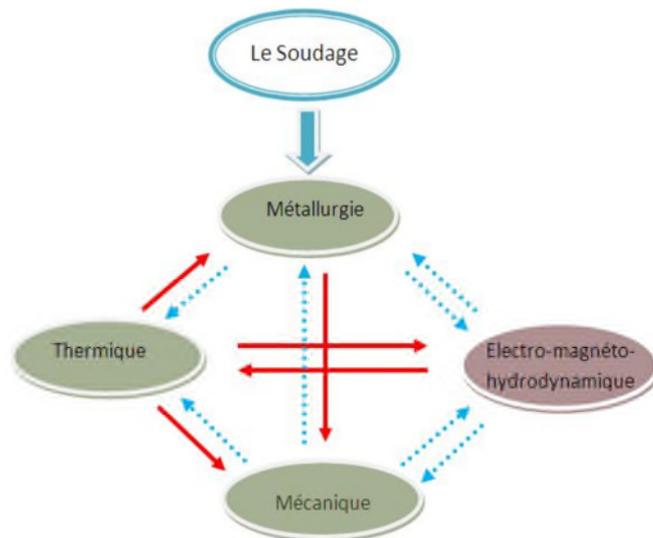


Figure I .8 : Élément sur les phénomènes physiques du soudage

#### I .1.3.Effet thermique

Dans le soudage des pièces métalliques, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation locale de température dans les pièces. Ces sources sont généralement le siège de phénomènes complexes. Le résultat est la production de la chaleur et son transfert au droit de la soudure.

##### I .1.3.2 Effets mécaniques du régime thermique

La localisation de l'opération de soudage entraîne une répartition thermique non uniforme dans les pièces à assembler. Cette répartition thermique non uniforme entraîne l'apparition de Contraintes internes (résiduelles) dans les pièces assemblées et des déformations de celles-ci ces contraintes résiduelles et ces déformations peuvent entraîner de sérieux inconvénients lors de la mise en service. [8]

##### I .1.3.2.1 les déformations en soudage

Les déformations résultent des déformations des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Sous l'effet du cycle thermique de soudage, non uniforme dans la masse des pièces, la dilatation empêchée conduit toujours à des déformations de retrait (raccourcissement de certaines zones) et à des contraintes résiduelles.

En soudage, les déformations résultent de la dilatation et du retrait occasionnés par un apport considérable de chaleur appliquée localement. La valeur des déformations est très difficile à déterminer. [9]

#### **I.1.4 les contraintes résiduelles**

Les contraintes résiduelles résultent de l'empêchement des déformations ou bridage des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Suivant l'origine du bridage on distingue les contraintes résiduelles directes et indirectes. Les parties chaudes sont bridées par les parties restées froides des pièces à assembler.

##### **I.1.4.1 contrainte et déformation dans le sens longitudinal**

Pendant le refroidissement, la contraction du métal de toute la bande centrale est systématiquement bridée par les zones adjacentes restées plus froides.

Une certaine largeur de métal de section  $s$  située de part et d'autre de l'axe du joint est plastifiée en traction la valeur de la limite d'élasticité  $R_e$  du métal. Les zones adjacentes assurant l'équilibre sont sous contraintes de compression. Celles-ci sont d'autant plus faibles que le rapport  $s/(S-s)$  est faible ( $S$  étant la section totale).

Les contraintes et les déformations longitudinales augmentent avec la limite d'élasticité du métal d'apport.

##### **I.1.4.2 Contrainte et déformation transversales**

Même dans le cas de simples éléments de tôles soudées bout à bout, il intervient ce qu'on appelle communément l'auto bridage, c'est-à-dire le bridage de la soudure par les éléments qu'elle assemble. Du fait que le soudage est exécuté de proche en proche l'auto bridage n'est pas constante. Il est très faible au début de l'exécution d'une soudure et devient plus sévère à la fin.

##### **I.1.4.3 Effet métallurgique**

La source d'énergie nécessaire au soudage fait subir aux pièces assemblées un traitement thermique spécifique qui modifie localement les propriétés du métal des pièces assemblées ou métal de base.

De plus, de nombreux procédés nécessitent généralement d'apporter une certaine quantité de métal, ou métal d'apport, de sorte que le soudage s'apparente à une sorte d'opération de

fonderie présentant un mode de solidification particulier mais également une sorte d'élaboration métallurgique puisque la continuité du joint est assurée au refroidissement par la solidification du métal d'apport et de la partie du métal de base qui auraient été préalablement fondu. L'étude de ces divers phénomènes : traitement thermique du métal de base dû au soudage, fusion du métal d'apport et d'une partie du métal de base et leur mélange ainsi que les phénomènes de solidification au refroidissement compose la métallurgie du soudage.

### I.1.5 modification microstructurale en zone affectée par la chaleur.

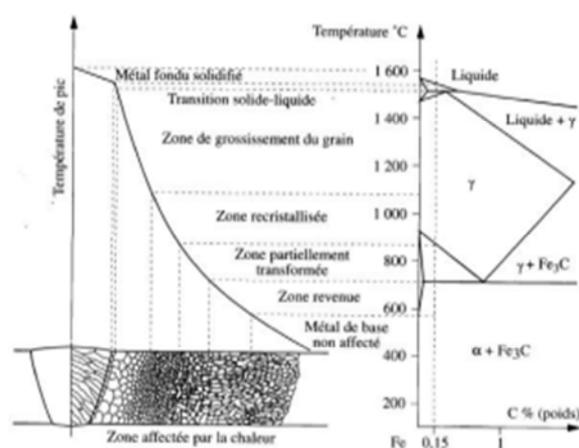
#### I.1.5.1 Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur

D'après les expressions analytiques du cycle thermique de soudage  $\theta(t)$  décrivant l'évolution de la température en fonction du temps dans les cas respectifs du soudage de produits épais ou minces, la température maximale est atteinte à un temps  $t_M$  tel que :

$$(\partial\theta / \partial t)_{t_M} = 0$$

#### I.1.5.2 Transformation en ZAC lors du chauffage

Au sens strict, le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, à l'exemple d'Esterling, il est commode de raisonner partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales (voir figure I.9).



**Figure I. 9** : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C.

En se rapprochant de la zone fondue, on trouvera successivement les zones suivantes.

- ✓ Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage.
- ✓ Une zone socratique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Certains phénomènes tels que revenu, globularisation, recristallisation, vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- ✓ Une zone de transformation partielle (ou inter critique).
- ✓ A partir de la température  $A_3$  et jusqu'à  $1\ 495\ ^\circ\text{C}$  environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain, la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques
- ✓ Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexiste une phase ferritique solide ( $\delta$ ) et une phase liquide.

Enfin le métal fondu a souvent une composition différente de celle du métal de base.

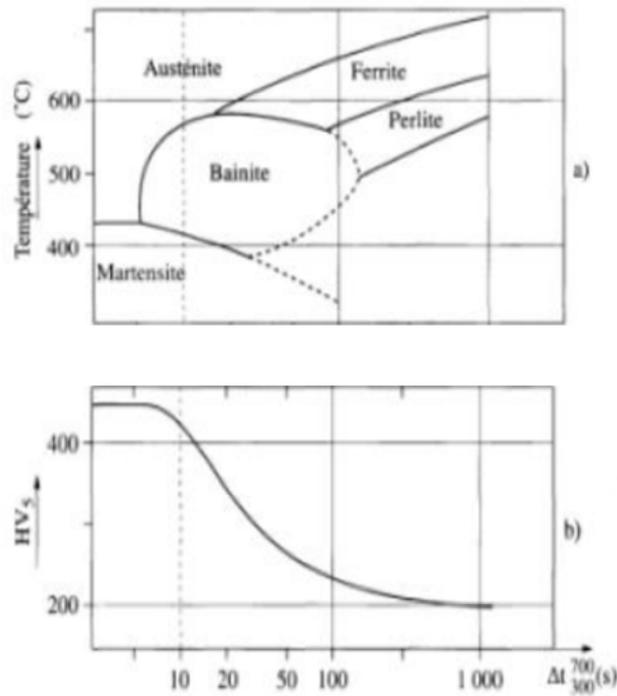
Les premiers germes du métal fondu se solidifient par épitaxie (relations de cohérence Cristallographique) sur les grains de la Zone Affectée par la Chaleur ZAC.

### **1.5.3 Transformation en ZAC lors du refroidissement**

Selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures sont susceptibles

de se former.

Il existe dans le métal de base une zone qui dépasse la température de transformation ferrite – austénite  $T_\alpha$ . Cette zone appelée Zone Affectée Thermiquement ZAT est comprise entre la ligne de fusion dans le métal de base et la température  $T_\alpha$ . En soudage, la vitesse de refroidissement de la ZAT est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la zone thermiquement affectée ne permettent pas d'appréhender correctement les phénomènes Métallurgiques qui apparaissent dans la zone thermiquement affectée. Ceci peut se faire au moyen de diagramme au refroidissement continu élaboré en condition de soudage (diagramme CCT-S) (Figure I. 10).



**Figure 1.10 :** (a) Exemple de diagramme TRC en conditions de soudage ( $\theta M=1300^\circ$ ) : (b) Courbe (dureté-critère de refroidissement  $\Delta t$ ).

Correspondante Compte tenu de la vitesse élevée de refroidissement, la zone thermiquement affectée subira une trempe plus ou moins sévère en fonction de la trempabilité du métal de base et de la vitesse de refroidissement.

Les caractéristiques mécaniques de la zone thermiquement affectée par le soudage sont liées à la sévérité de la trempe qu'elle a subie. Cette trempe se manifeste par :

- ✓ une résistance mécanique plus élevée ;
- ✓ une possibilité de déformation plus limitée (perte de ductilité).

### I.1.5.5 Transfert du métal dans l'arc

Dans la plupart des procédés de soudage, l'arc jaillit entre une électrode fusible, qui contient le métal d'apport, et les pièces à assembler.

Le métal d'apport, fondu à l'extrémité de l'électrode, transite dans la colonne d'arc en direction du bain de fusion situé sur les pièces. Le transfert se présente sous forme de gouttes qui sont soumises à un ensemble de forces dues à leur tension superficielle, à la pesanteur, au pincement électromagnétique, au jet de plasma et aux éruptions gazeuses. L'importance relative de ces différentes forces conditionne le type de transfert. Les forces d'origine

électromagnétique perpendiculaires aux lignes de courant sont pratiquement radiales à la sortie de l'électrode. Au fur et à mesure qu'on s'en écarte, ces forces présentent une composante axiale de plus en plus importante, donnant lieu au jet de plasma.

Il existe 3 modes de transfert du métal dans l'arc électrique :

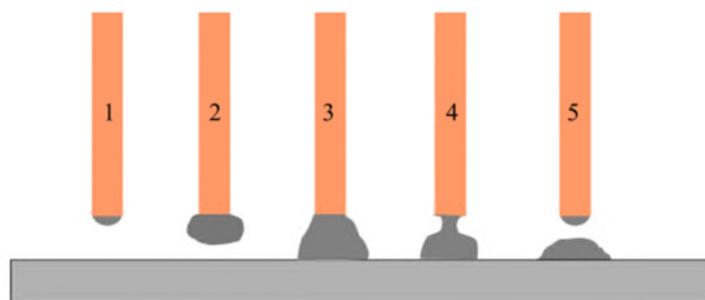
#### **I.1.5.5.1 Transferts par court –circuit**

L'intensité (< 200 A) et la tension d'arc (14 à 20 V) sont faibles. L'arc est court et instable. Le métal est déposé par grosses gouttes dans le bain de fusion par une succession de court-circuit (de 50 à 200 par seconde) entre le fl. et le bain de fusion.

Cette méthode de transfert permet une bonne maîtrise des passes de pénétration. Il y a des projections de métal sur les abords des pièces soudées. Il est indispensable de disposer d'une self ou inductance (amortisseur électrique) pour favoriser la stabilité de l'arc et réduire les projections gouttent de métal sur les abords des tôles à souder. Le bout du tube contact doit être sort d'environ 5 à 10 mm à l'extérieur de la buse en passe de pénétration (figure I .11). Le tube contact est placé au niveau de la buse pour les autres passes (remplissage et finition). [11]

Utilisé pour les passes de pénétration

- ✓ Utilisé pour le soudage de tôles minces
- ✓ Utilisé pour le soudage en position



**Figure I.11** : Transferts par court –circuit

#### **I.1.6 Transfert globulaire**

Pour des énergies de soudage comprises entre celles donnant les transferts par court-circuit et par pulvérisation axiale, les gouttes ont une croissance lente. L'intensité du courant n'étant

pas suffisante pour avoir un effet de pincement provoquant le détachement, la goutte devient gros, de taille supérieure au diamètre du fil (figure I.12). Le transfert se fait par court-circuit, quand la goutte touche le bain, ou par détachement de la goutte sous l'effet de la pesanteur.

Transfert en grosse gouttes (globulaire) :

- ✓ Utilisé pour les passes de remplissage
- ✓ Utilisé pour le soudage de tôles épaisses
- ✓ Utilisé pour le soudage à plat



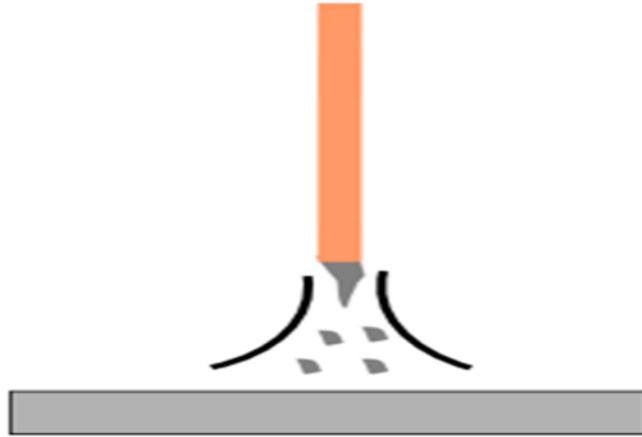
**Figure I.12 :** Transfert globulaire

### **I.1.7 Transfert par pulvérisation axiale (spray)**

Vers les hautes énergies de soudage et au-delà d'une certaine densité de courant (supérieure à 250 A/mm<sup>2</sup> selon la nature du fil et le gaz de protection), l'extrémité du Fil présente un cône allongé. Le transfert se produit sous forme de fines gouttelettes dont le diamètre est inférieur à celui du fil et qui sont projetées à grande vitesse dans l'axe du fil sous l'effet des forces de pincement électromagnétique (ponch affect). L'arc est long et très stable. Le taux de dépôt est important. Il n'y a pratiquement pas de projections sur les abords des pièces soudées. Le tube contacte placé en retrait à l'intérieur de la buse (figure I.13)

Transfert par pulvérisation axiale (spray arc) :

- ✓ Utilisé pour les passes de remplissage et finition
- ✓ Utilisé pour le soudage de tôles épaisses
- ✓ Utilisé pour le soudage à plat



**Figure I .13 :** Transfert par pulvérisation axiale

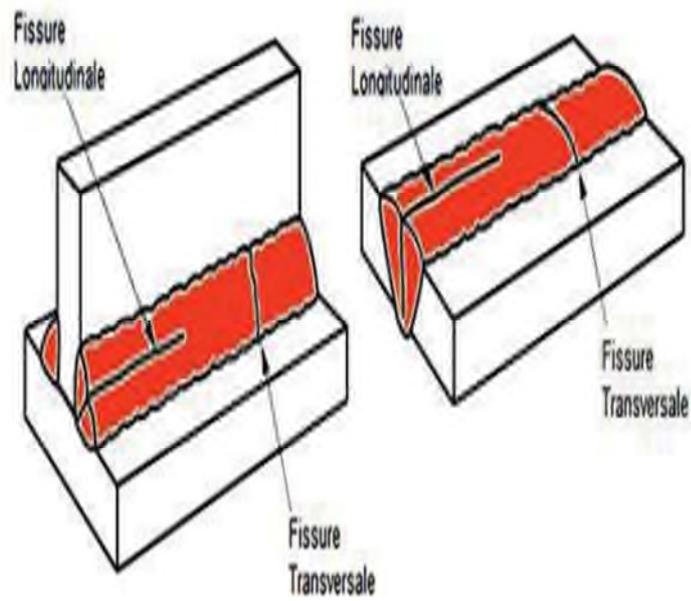
## **I .2 les défauts des soudages**

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

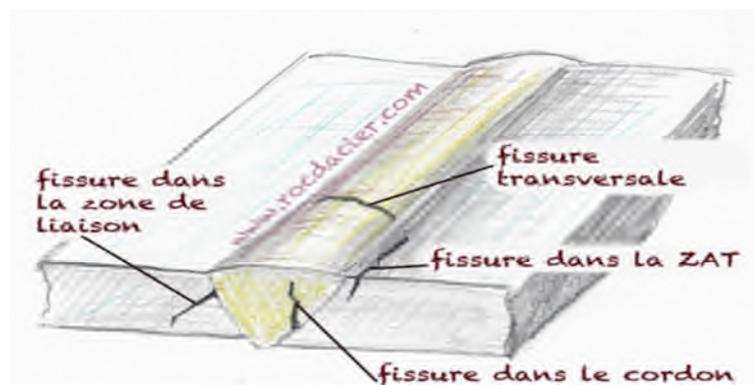
### **I .2.1 Les fissure**

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. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. [11]

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales (figure I .14, 15) 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. [11]



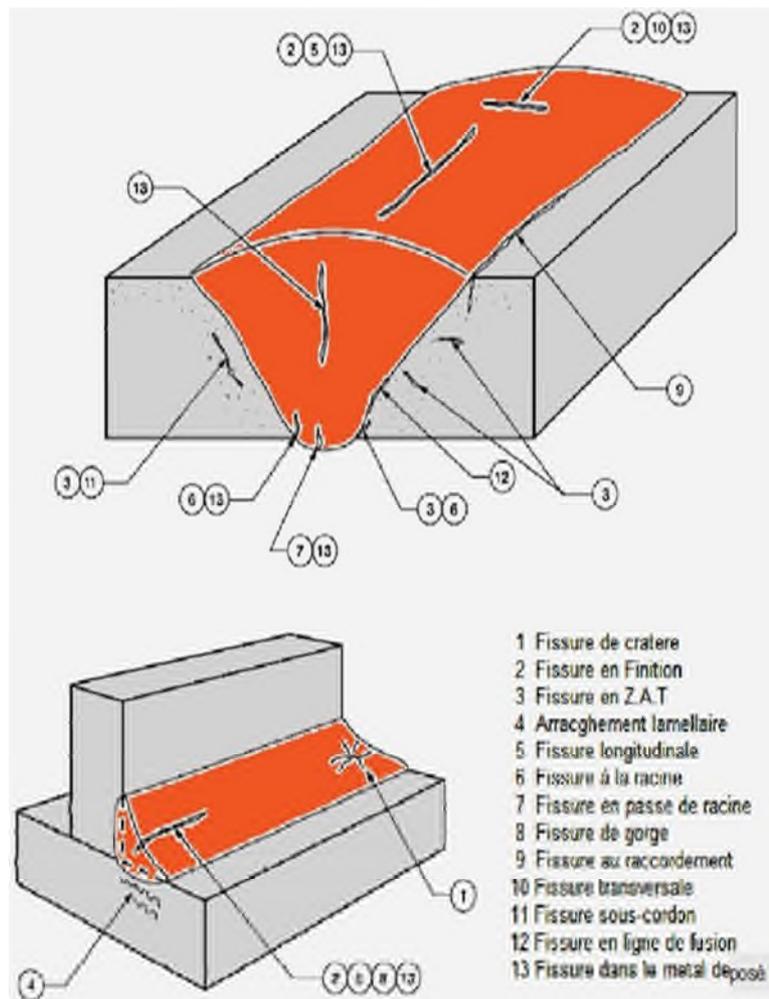
**Figure I .14 :** La fissure longitudinale



**Figure I .15 :** La fissure transversale.

### I .2.2 type de fissure

La figure 17 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :



**Figure I .16 :** Les types de fissure.

### **I .2.2.1 Fissures De Gorge (Throat Cracks):**

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle. Elles sont généralement des fissures à chaud.

### **I .2.2.2 Fissures De Racine :**

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine. Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

### **I .2.2.3 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.

#### **I.2.2.4 Fissures Au Raccordement**

Ce sont 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.

#### **I.2.2.5 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 :

- Hydrogène
- Une microstructure de ductilité relativement faible
- De fortes contraintes résiduelles

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales.

# **Chapitre II :**

## **Matériaux et techniques**

### **Expérimentales**

**Chapitre II :**  
**Matériaux et techniques**  
**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.

### II.1 Matériaux utilisés

#### II.1.1 Acier S460N

S460N Acier faiblement allié à haute résistance, Acier à haute limite d'élasticité S460N Utilisé dans un certain nombre d'applications offshore et on shore, par exemple, des supports de jambes pour une plate-forme de levage et des pieux d'amarrage pour un terminal terrestre de GNL. [12]

L'acier de structure S460 sont des aciers au carbone-manganèse ayant des propriétés mécaniques minimales garanties (limite d'élasticité et résistance à la traction). Les aciers de structure à grains fins soudables à haute résistance offrent une bonne soudabilité dans tous les procédés de soudage conventionnels. [13]

S : Acier de construction.

460 : limite d'élasticité en M Pa

**Tableau II.1** : Composition chimique de l'acier S460N.

Compositions chimique de l'acier S460N	Elément d'alliage	Pourcentage [%]
	C	0.16
	Si	0.53
	Mn	1,6
	P	0,030 max
	S	0,025 max
	Mo	0,03
	Ti	0,05 max
	<b>Ceq</b>	<b>0.464</b>

Le carbone équivalent de notre matériau a été calculé par la formule suivante.

$$C_e = C + (Mn/6) + ((Cu + Ni)/15) + (Cr + Mo + V)/10$$

## II.2 Présentation des échantillons

### II.2.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques

Nous avons prélevé deux échantillons d'acier S460N soudés sous l'eau de mer. Après j'ai corrigé la surface de soudure des deux échantillons.

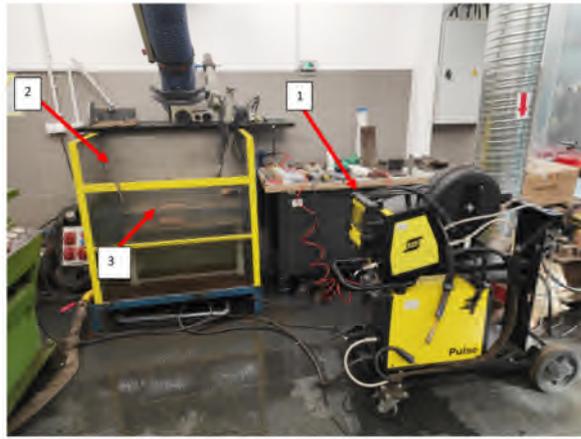
### II.3 Technique de soudage

Pour l'élaboration de nos soudures, le poste utilisé est constitué d'un poste type Pulse 300 (Figure II.1), 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.

Pour ce travail, l'électrode utilisée est la Barracuda (E42 2 1 Ni RR 51) avec un diamètre de 4 mm. Il s'agit d'une électrode rutile de soudage humide spécialement formulée. Sa composition chimique peut être dans le tableau II.2.

**Tableau II. 2** : composition chimique de la baguette barracuda.

Elément	C	Si	Mn	Ti	Ni	Mo	P	S
Composition	0.07	0.45	0.5	Bal	0.3	-	0.025	0.025



**Figure II.1 :** 1 poste a soude Pulser ; 2 baguette de barracuda 3 bain d’immersion de soudage à l'eau

Pour les essais, deux spécimens ont été préparés à l'aide du MMA. Elles ont été soudées dans l'eau (profondeur de 0,25 m) à l'aide de deux paramètres différents.

Pour couvrir toutes les surfaces de la plaque d'acier, le nombre de cordons était de 14 pour les spécimens soudés sous l'eau.

Ces paramètres ont produit des valeurs d'entrée de chaleur dans la gamme de supérieures à 0,9 kJ/mm pour les électrodes Barracuda Gold, ce qui limite la susceptibilité à la fissuration à froid de l'acier utilisé. Les spécimens soudés sous l'eau étaient caractérisés par une largeur plus faible des cordons posés. Il en résulte un nombre plus élevé de cordon.

#### **II.4 Paramètre de soudage :**

Les différents joints de soudure ont été obtenus selon les paramètres utilisés par les normes EN 10204, ils sont résumés dans le tableau II.3 suivant :

**Tableau II.3 :** Paramètres de soudage des échantillons sous environnement marin.

<b>Réglage</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>intensité</b>	195	272
<b>Courant</b>	26	26
<b>Q (KJ/mm)</b>	0.62	0.99
<b>Angle de soudage</b>	60°	60°
<b>Type de courant</b>	AC	AC

## II.5 Polissage

Après la rectification des éprouvette on fait un polissage avec plusieurs papiers abrasifs de Différentes granulométries (du plus dur au plus doux pour un effet miroir) de 220 à 2000. Ce polissage rend la surface des éprouvettes plane et brillante (miroir), le polissage doit être l'aide d'une polisseuse sous jet d'eau, Cette opération est suivie d'un rinçage par l'eau distillée. Pour éviter les stries sur la surface des éprouvettes.



**Figure II .2:** polisseuse sous jet d'eau.

## II .6 Observation Métallographique

### II .6.1 Observations au microscope optique

L'observation de l'acier a été réalisée à l'aide d'un microscope optique. Au moyen d'une caméra, pour voir le joint de soudeur de l'échantillon.

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 2000.

Les surfaces polies des échantillons ont été attaquées par le réactif Nital L'attaque est arrêtée après quelque secondes (10-20 secondes). Le but de l'attaque chimique est de créer un contraste révélant la microstructure de l'acier étudié.



**Figure II .3** : microscope optique

## **II.7 Caractérisation mécanique**

### **II.7.1 Essais de dureté**

#### **II.7.1.1 Définition**

L'essai de dureté type consiste à presser un objet spécifiquement dimensionné (pénétrateur) avec une charge donnée dans la surface du matériau à tester. La dureté est déterminée par la mesure de la profondeur de pénétration du pénétrateur ou en mesurant la taille de l'empreinte qu'il laisse. [14]

#### **II.7.1.2 Buts et objectifs de l'essai de dureté**

L'essai de dureté est un outil essentiel de discrimination des matériaux et d'analyse, de développement et d'amélioration des matériaux et des technologies dans le cadre de la recherche fondamentale (science des matériaux, techniques des matériaux, diagnostic des matériaux)

Il permet de collecter des valeurs caractéristiques (valeurs de dureté) qui sont d'une importance décisive pour l'application des matériaux dans l'industrie (aptitude d'un matériau pour un composant technique), pour leur réception dans le cadre de contrôles d'assurance qualité (inspection en entrée et en sortie), pour la discrimination des matériaux (par exemple dans le cas de confusion entre matériaux) et pour la clarification en cas de sinistres (analyse des dommages) [15]

### II.4.1.3 Machine d'essais

Dans notre étude nous avons effectué nos tests sur un équipement de référence type Rockwell figure II.4.

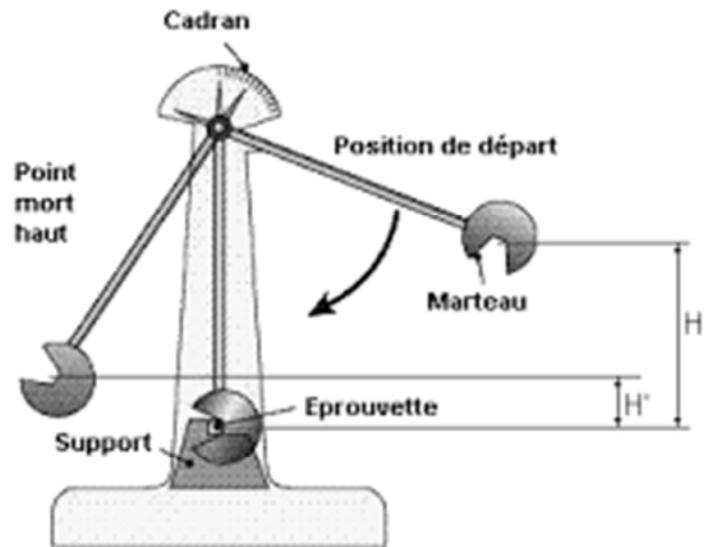


**Figure II .4 :** Machine d'essais de dureté

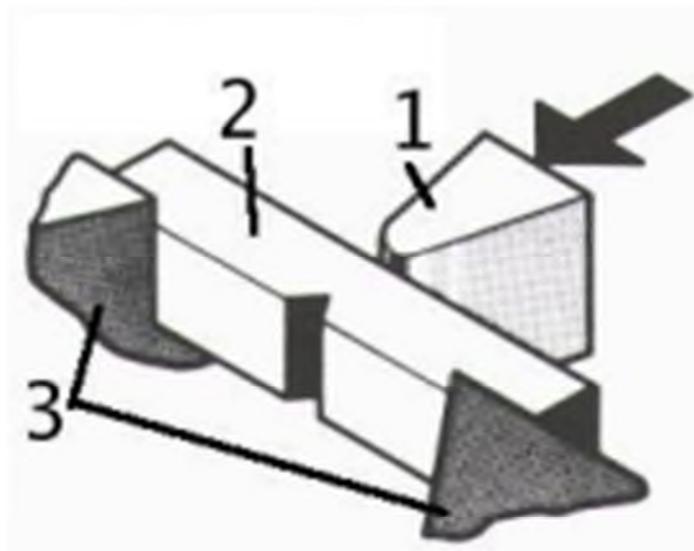
## II.8 Essai de résilience (Charpy)

### II.8.1 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>))



**FigureII.5** : essai de Charpy



**schéma de fonctionnement**

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

**FigurII.6** : schéma de fonctionnement

Résultat impact test à température 15 degrés

Acier témoin = 27

Acier avec réglage 1 = 35

Acier avec réglage 2 = 39

## **II. 9. La corrosion**

La corrosion d'un matériau est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides.

### **II.9.1. Technique de la masse perdue**

Les mesures de perte de poids sont une première approche de l'étude de la corrosion d'un métal dans une solution marine. Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple et de ne pas nécessiter un appareillage important. Cette méthode consiste à mesurer la perte de masse  $\Delta m$  des échantillons acier S460N de surface pendant un temps d'immersion de l'échantillon dans une solution corrosive.

### **II.9.2. Manipulation de la technique de masse perdue**

Cette méthode dont le dispositif est représentée par la figure. (II.7) nécessite de laboratoire suivant :

- Échantillons en aciers
- Béchers
- Balance de précision de sensibilité de 0.0001g
- solution marin



**FigureII.7** : la technique de la masse perdue

### **II.9.2.1 Manipulation**

Chaque échantillon fini, a été pesé Sa masse et la durée du test ont été mentionnées L'échantillon a été suspendu dans un bêcher contenant de solution marin. Après chaque période de test choisie l'échantillon est retiré de la solution puis nettoyé à l'eau. Les produits de corrosion ont été éliminés de la surface du métal à l'aide d'une brosse à dent souple. Ensuite sa nouvelle masse a été également reportée dans le tableau.

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussions**

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussions**

### III.1 Introduction

Après la réalisation de l'opération de polissage sur les deux échantillons acier S460N, nous avons effectué des essais de mécanique de dureté, essai de Charpy et l'observation microscope optique et DRX, nous allons présenter et discuter l'ensemble des résultats dans ce chapitre 3.

#### III. 1.1 Images microscopiques S1

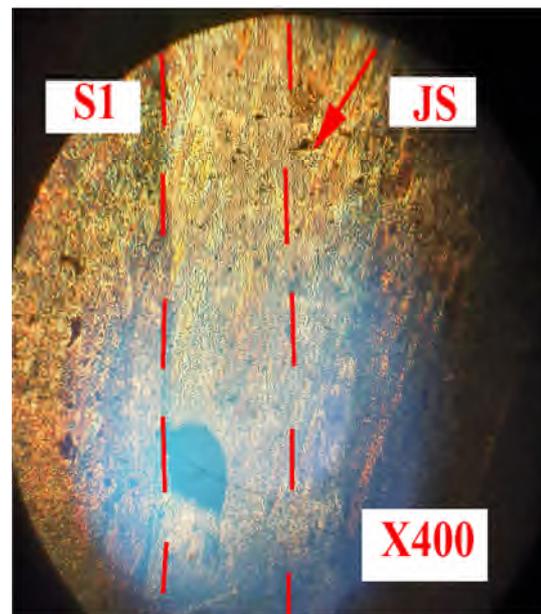
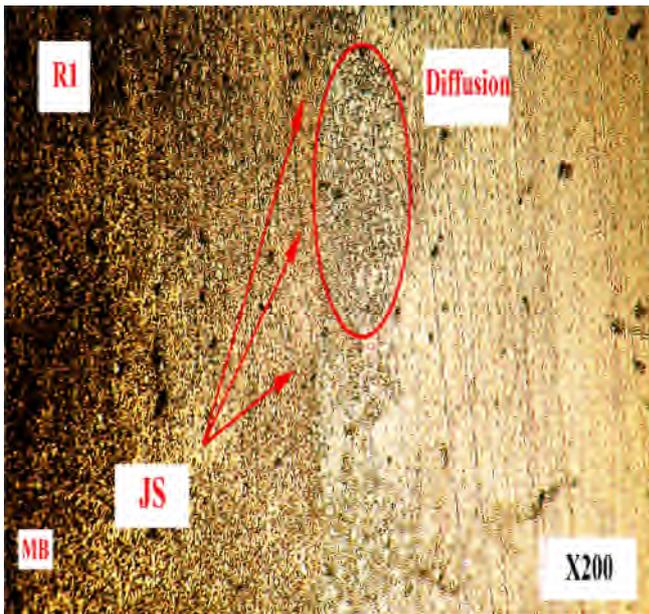
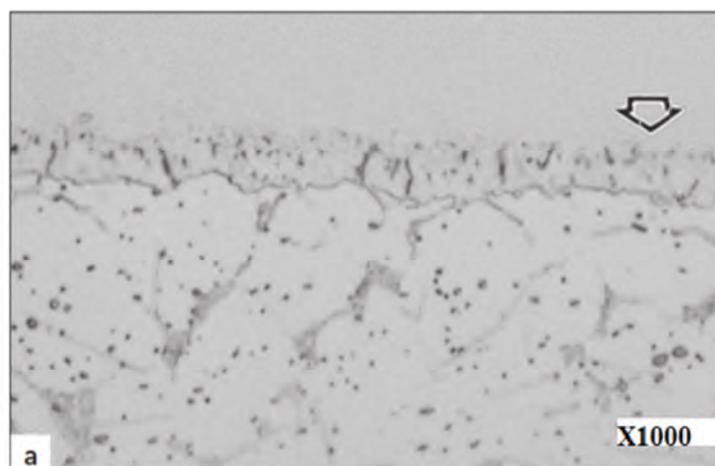


Figure III.1 : joint du soudeur S1

Figure III.2 : joint de soudeur S1



### Figure III.3 : joint de soudeur S1

#### III.1.2 Observation

Après le polissage et l'attaque chimique nous avons vu l'échantillon S1 acier S460N à différentes grossissement microscopique X200, X400, X1000 à voir le joint de soudeur. La Figure III.1 On observe dans cette structure qui correspond à un constate de deux zone plus claire et montre la moitié de ZAT obtenue par le MO avec un grossissement X200, on constate la formation de porosité dans la zone de MB et ZF. La figure III.2 présente la microstructure de joint de soudeur avec un grossissement X400 est plus visible. La figure III.3 montre la microstructure de joint de soudeur avec un grossissement X1000, L'observation de joint de soudure nous révèle la formation de gros grains dans la ZAT, ZF par rapport au métal de base et montre bien la liaison entre les trois zone, et illustre clairement la différence de morphologie granulaire entre les deux zones.

#### III.1.3 image microscopie S2

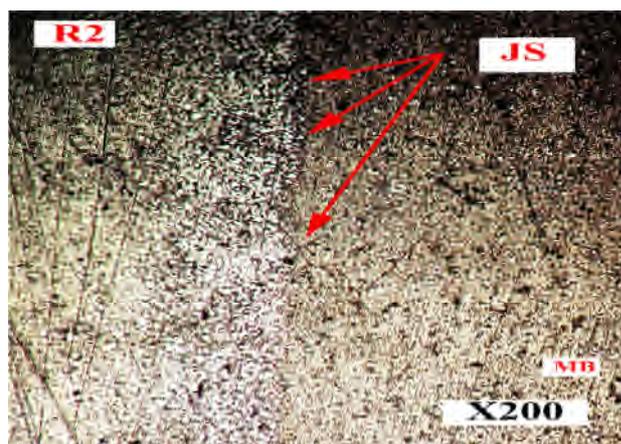


Figure III.4 : joint de soudeur S2

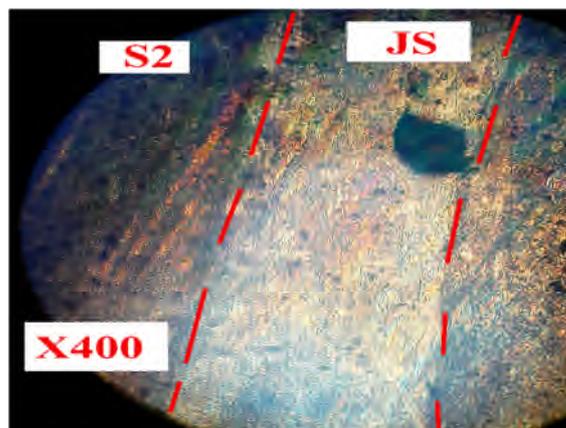


Figure III.5 : joint de soudure S2

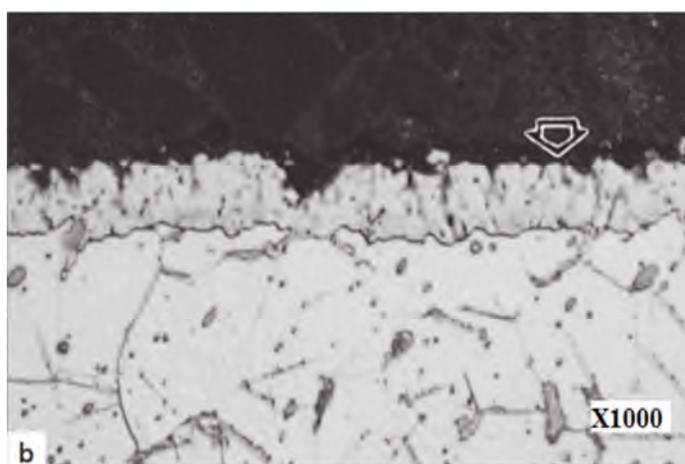


Figure III.6 : joint de soudeur S2

### III.1.3 Observation

La figure III.4 représente la microstructure de la liaison entre les deux zones MB et ZF avec un grossissement X200, nous constatons la présence de grains plus fins.

La figure III.5 montre la microstructure obtenu par MO de joint de soudeur on observe clairement les trois sons ZAT, ZF, MB avec un grossissement X400.

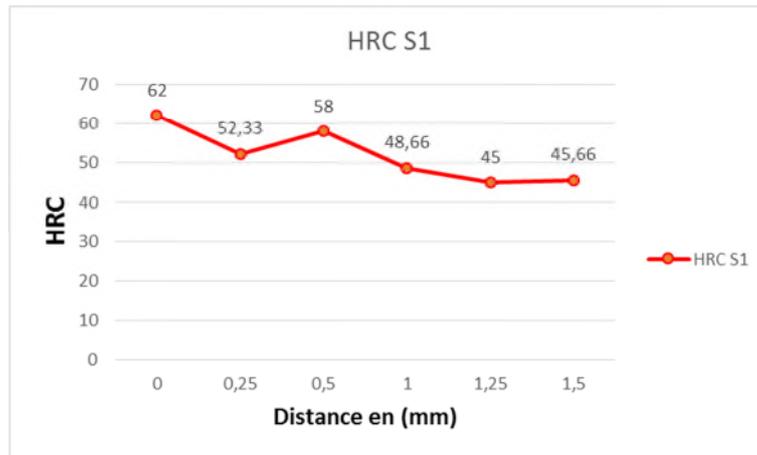
La figure III.6 montre bien la zone de liaison entre la ZF et la ZAT, et qui illustre clairement la différence de morphologie granulaire entre les deux zones et on observe différente taille de gros grains dans les trois zones avec un grossissement X1000.

### III.4 Les résultats de la dureté

Le tableau ci –dessous représente les valeurs obtenues de la dureté HRC des deux échantillons :

**Tableau III.1** : les valeurs de dureté HRC (Rockwell)

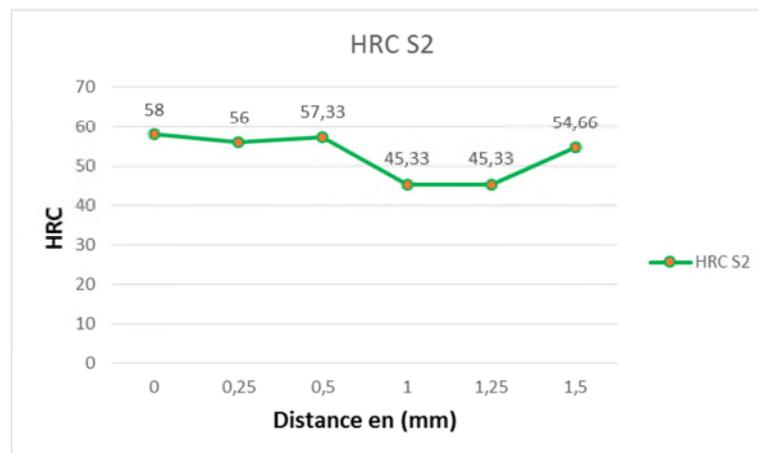
	<b>S1</b>	<b>S2</b>
<b>N°</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Moyenne</b>
<b>1</b>	62	58
<b>2</b>	52.33	56
<b>3</b>	58	57.33
<b>4</b>	48.66	54.33
<b>5</b>	45	54.33
<b>6</b>	45.66	54.66



La figure ci-dessous représente le profil de dureté pour l'échantillon S1 :

**Figure III.7 : Dureté HRC S1**

La figure III.7 montre les duretés HRC des échantillons obtenu avec les paramètres S1, On



remarque qu'il subsiste trois palier :

- Le premier palier débute de 0 à 0.25 mm, on observe une diminution de dureté allant de 62 HRC vers 52.33,
- La deuxième zone est celle qui débute de 0.25 à 1mm, elle résume la ZF (joint de soudure) on remarque une HRC moyenne de 50 HRC, ce qui est logique vu que matériel d'apport a été fusion dans le bain marin.
- La troisième zone est la deuxième partie de MB, on remarque une diminution considérable de la HRC au environ de 48HRC. On peut dire que cette zone a été affectée par l'augmentation de la taille du grain dû au forte chaleur induite par l'opération de soudage

La figure ci-dessous représente le profil de dureté pour l'échantillon S2 :

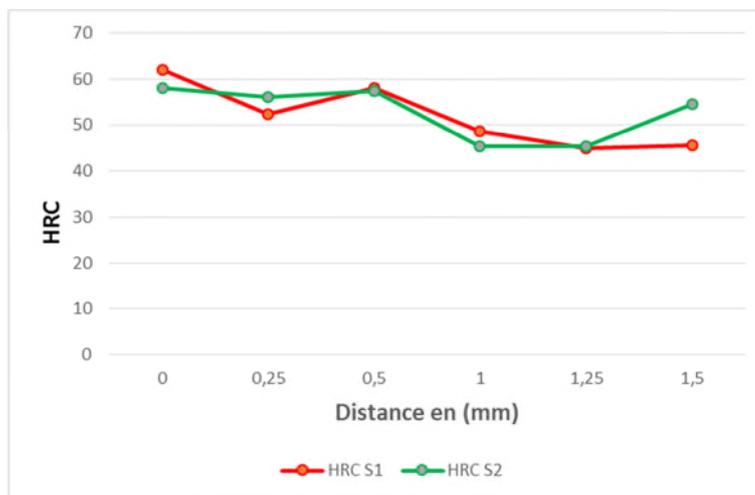
**Figure III.8 : Dureté HRC S2.**

La figure III.8 montre les duretés HRC des échantillons obtenus avec les paramètres S2, On remarque qu'il subsiste trois paliers :

-la première zone est celle qui va de 0 à 0,5 mm, elle résume le MB on remarque une légère diminution de la dureté allant de 58 HRC vers 56, ensuite une légère augmentation de la dureté 56 HRC vers 57

-la deuxième partie de la ZF ( joint de soudeure ) débute de 0,5 à 1,5 mm .on remarque une diminution de la dureté 57 HRC vers 45 .ensuite le palier de 1 à 1,25 mm est stable dureté 45 HRC ,et encore une augmentation de dureté allant de 45 HRC vers 54 .On peut dire que cette ZF a été affectée par la diminution de taille de grain due à la forte chaleur induite par le soudage sous-marin.

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



**Figure III.9 : la dureté HRC S1, HRC S2**

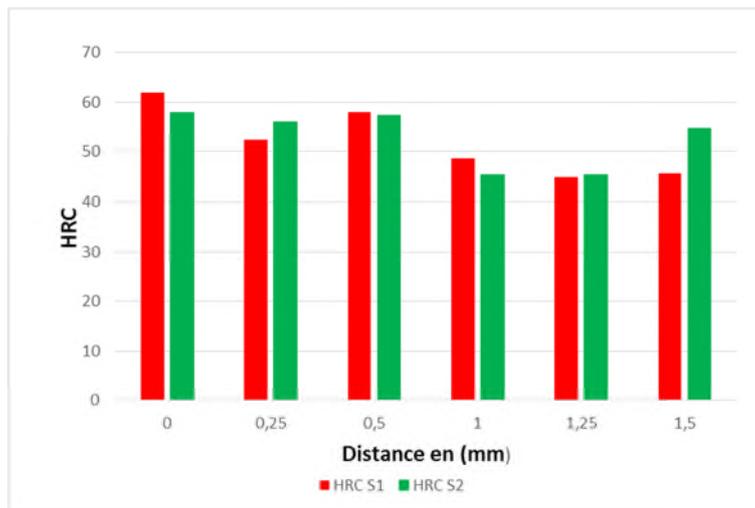
-le premier palier débute de 0 à 0,25 mm elle résume le MB de dureté HRC S1, HRC S2, on remarque une diminution de dureté.

- le deuxième palier débute de 0,25 à 0,5 mm on observe une légère augmentation pour HRC S1, HRC S2.

- le troisième palier débute 0.5 à 1mm elle résume la ZF des deux échantillons de HRC S1 HRCS2 .on remarque une diminution progressivement de la dureté c'est-à-dire que le joint de soudeur dû à la chaleur de soudage sous-marine

- le dernier palier de 1.25 à 1.5 mm elle résume les trois parties de MB de HRC S1, la ZF de HRC S2 on remarque que la dureté de HRC S2 est plus grande que celle de HRC S1 on peut dire que la ZF est plus dure que celle de MB.

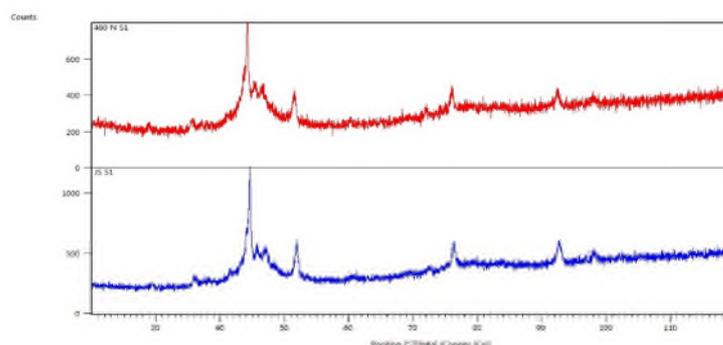
L'histogramme ci-dessous représente les valeurs moyennes des essais de dureté de deux échantillons S1, S2



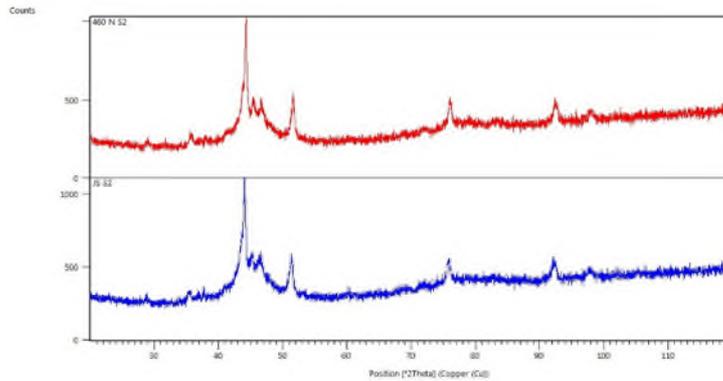
**Figure III.10 :** la dureté HRC S1, HRC S1.

On remarque que la moyenne de la dureté varie d'une zone à l'autre et on remarque que 1

### III.5 Les résultats de diffraction de rayon X



**Figure III.11: DRX S1**

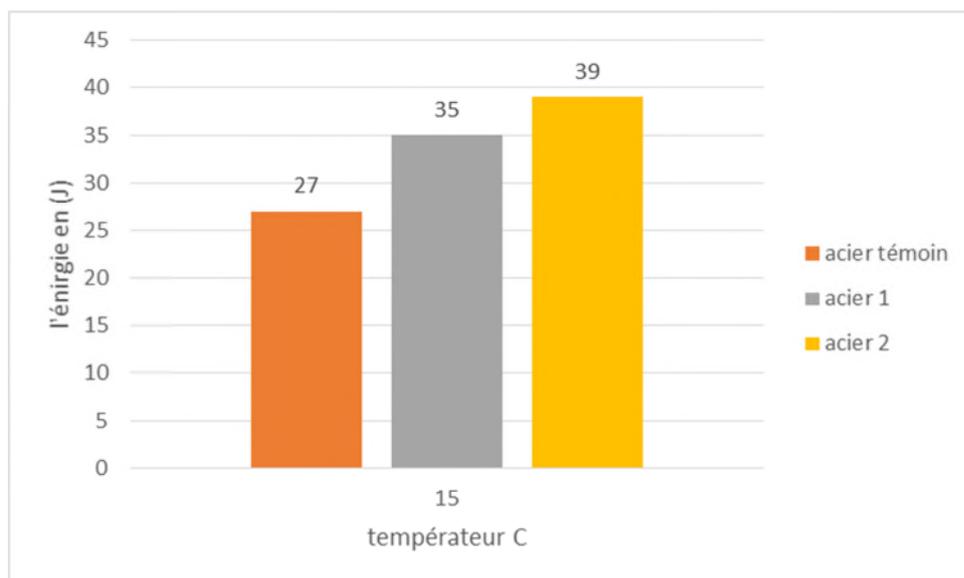


**Figure III.12: DRX S2**

Les schémas de diffraction de rayon X du joint du soudeur acier S460N pour les deux échantillons S1, S2 on présente la différente diffraction de rayons X des différentes zones (MB, JS) sont illustrés dans la figure III.11, III.12 comme on peut constater des pics d'austénite ont été observé dans le métal de base et joint de soudeur.

### III.6. Les résultats essai de Charpy

Résultat impact test à température 15 degrés



### Figure III.13 : Résistance au choc pour une température 15 degrés

Les résultats sont présentés sous forme d'histogramme décrivant les valeurs d'énergie par chaque acier avec une température de 15 degré .on remarque que l'énergie de acier 1, acier 2 et plus grand par rapport aux aciers témoin donc l'acier1, acier 2 plus résiste ou choc qui vu dire le joint de soudeur (acier 1, acier2) et ductile par contre le MB (acier témoin) et fragile

## III.7. Oxydation des joints de soudure

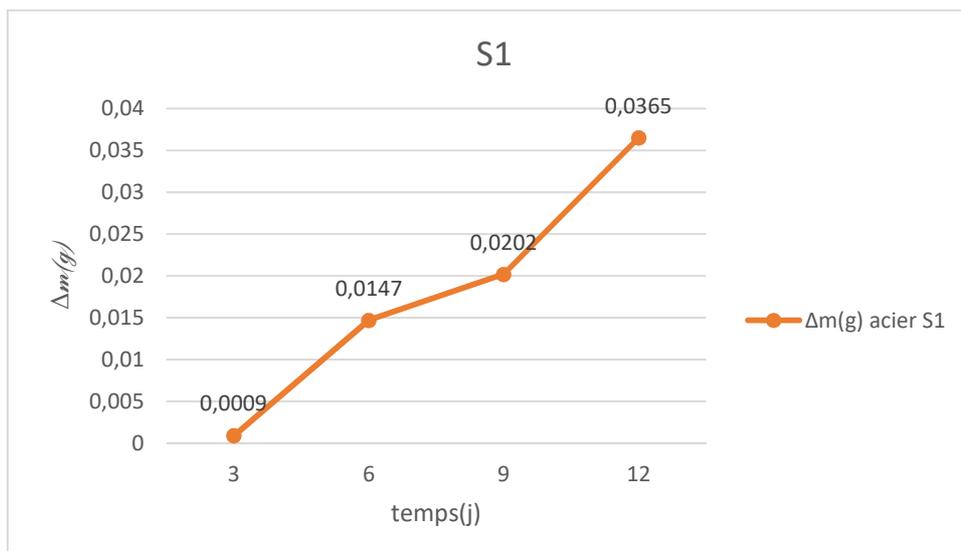
### III.7.1. Résultats

Tableau suivant présente les valeurs de masse pondent 12 jours

**Tableau III.2 :** les pertes de masse des différents joints de soudure par le phénomène d'oxydation

Date(j)	Masse (g) S1	Masse(g) S2
1j	13.8118	11.1606
3j	13.8109	11.1599
6j	13.8265	11.1781
9j	13.8320	11.1787
12j	13.8483	11.1827

La figure ci-dessous représente le profil de différence de masse en fonction de temps pour

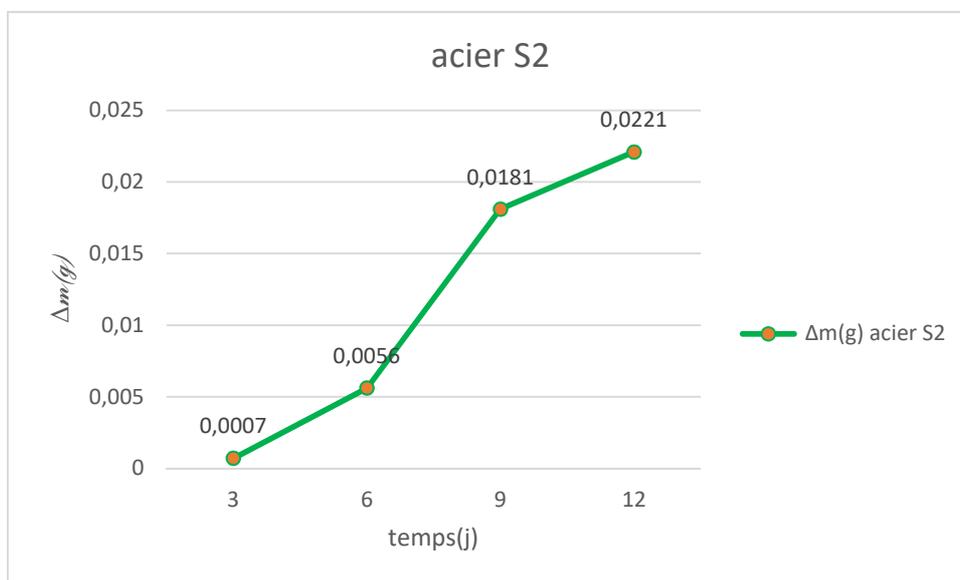


l'échantillon S1

**FigureIII.14** : la différence de masse en fonction de temps

On remarque dans la FigureIII.14 que la différence de masse dans les premier 3 jour une légère augmentation cela indique une réaction d'oxydation, ensuite une augmentation jusqu'à la durée 12 jour Ceci conséquence il Ya dépôt sur l'acier.

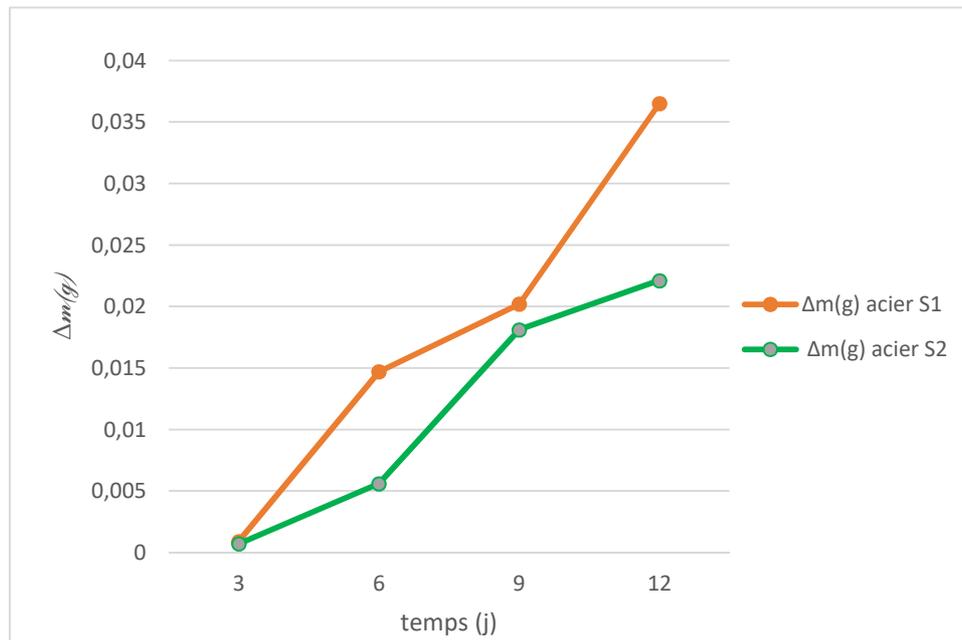
La figure ci-dessous représente le profil de différence de masse en fonction de temps pour l'échantillon S2



**FigureIII.15** : la différence de masse en fonction de temps

On remarque dans la FigureIII.15 que la différence de masse dans les premier 3 jour une valeur léger augmentation cela indique une réaction d'oxydation, ensuite une augmentation brusque jusqu'à la durée 9 jour ensuite une augmentation à 12 jour Ceci est conséquence il Ya dépôt sur l'acier.

La figure ci-dessous représente le profil de différence de masse on fonction de temps des deux échantillons (Etude comparative) :



**Figure III.15** : étude comparative de différences de masse en fonction de temps pour deux Échantillons S1, S2.

On remarque que les valeurs de différence de masse dans les premier 3jour à de la même valeur ensuite une augmentation progressivement par conséquent il Ya dépôt sur l'acier qui entraine automatique une augmentation, c'est la preuve de non l'existence de corrosion.

# **Chapitre III :**

## **Résultats et discussions**

### III.1 Introduction

Après la réalisation de l'opération de polissage sur les deux échantillons acier S460N, nous avons effectué des essais de mécanique de dureté, essai de Charpy et l'observation microscope optique et DRX, nous allons présenter et discuter l'ensemble des résultats dans ce chapitre 3.

#### III. 1.1 Images microscopiques S1

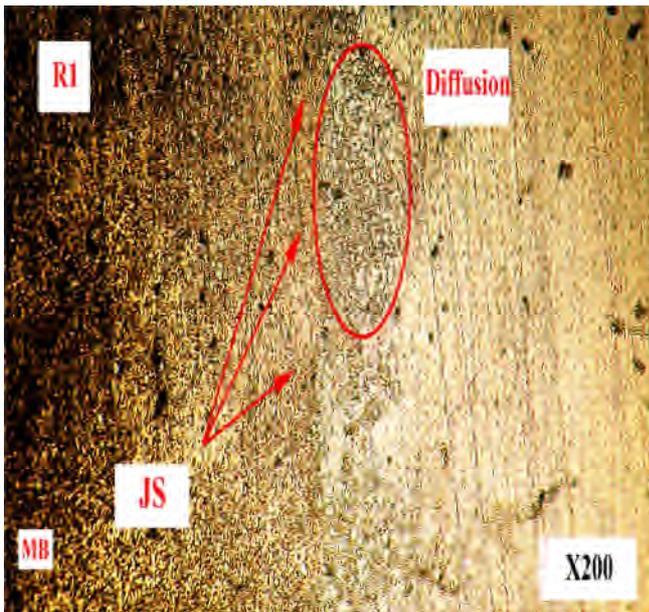


Figure III.1 : joint du soudeur S1

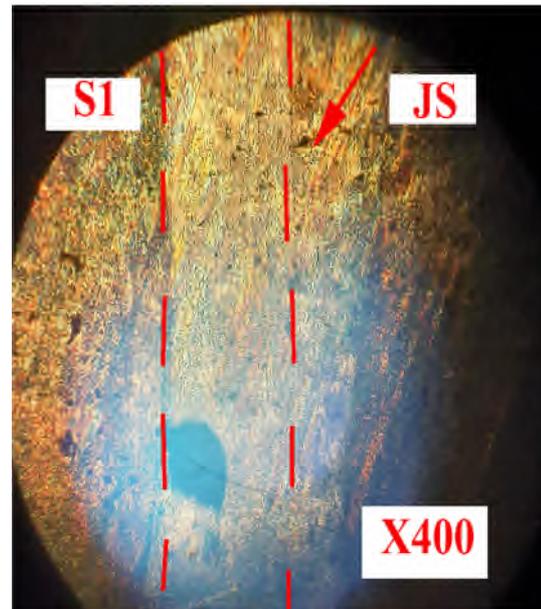


Figure III.2 : joint de soudeur S1

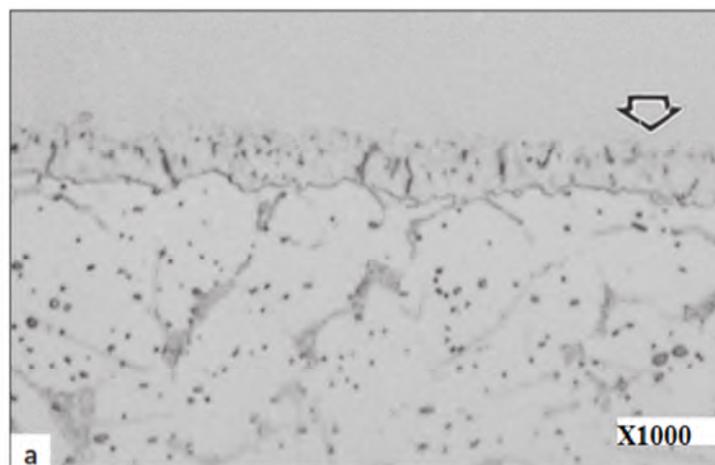


Figure III.3 : joint de soudeur S1

### III.1.2 Observation

Après le polissage et l'attaque chimique nous avons vu l'échantillon S1 acier S460N à différentes grossissements microscopique X200, X400, X1000 à voir le joint de soudeur. La Figure III.1 On observe dans cette structure qui correspond à un constate de deux zone plus claire et montre la moitié de ZAT obtenue par le MO avec un grossissement X200, on constate la formation de porosité dans la zone de MB et ZF. La figure III.2 présente la microstructure de joint de soudeur avec un grossissement X400 est plus visible. La figure III.3 montre la microstructure de joint de soudeur avec un grossissement X1000, L'observation de joint de soudure nous révèle la formation de gros grains dans la ZAT, ZF par rapport au métal de base et montre bien la liaison entre les trois zone, et illustre clairement la différence de morphologie granulaire entre les deux zones.

### III.1.3 image microscopie S2

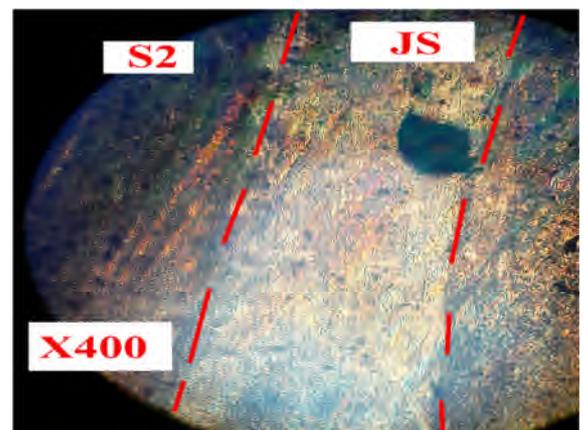
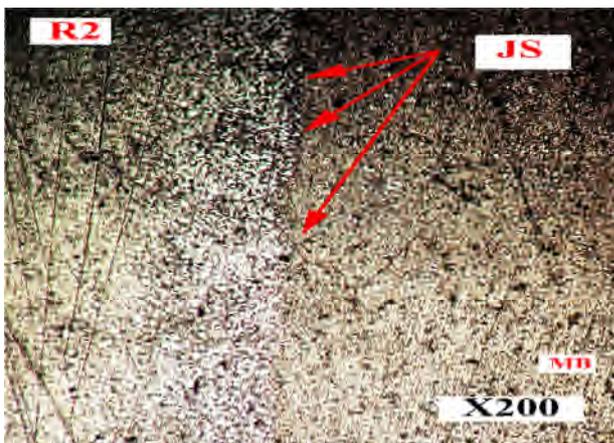


Figure III.4: joint de soudeur S2 Figure III.5 :joint de soudure S2

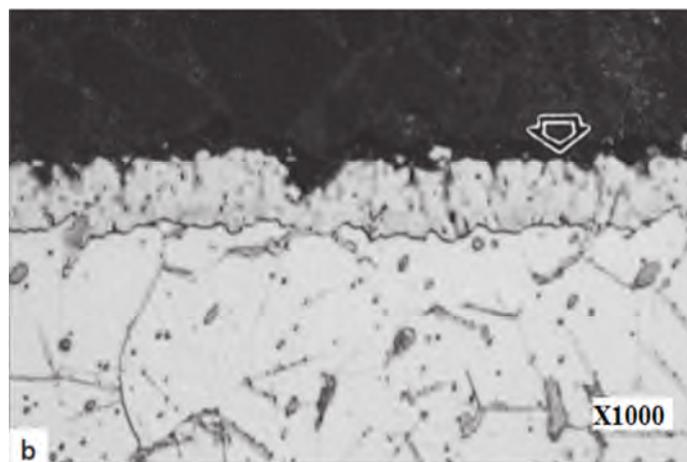


Figure III.6: joint de soudeur S2

### III.1.3 Observation

La figure III.4 représente la microstructure de la liaison entre les deux zones MB et ZF avec un grossissement X200, nous constatons la présence de grains plus fins.

La figure III.5 montre la microstructure obtenu par MO de joint de soudeur on observe clairement les trois sons ZAT, ZF, MB avec un grossissement X400.

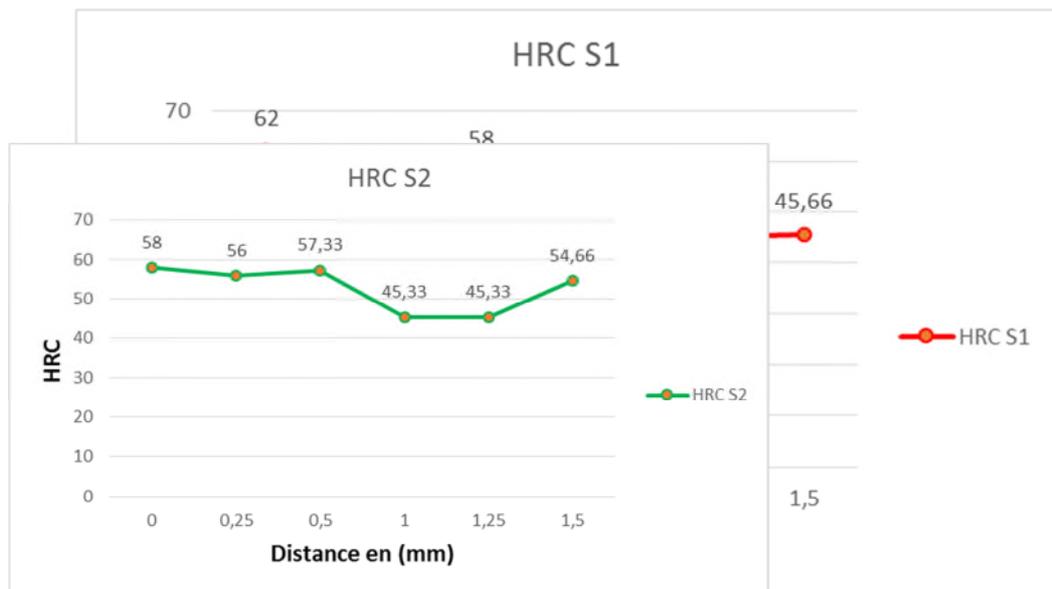
La figur III.6 montre bien la zone de liaison entre la ZF et la ZAT, et qui illustre clairement la différence de morphologie granulaire entre les deux zones et on observe différente taille de gros grains dans les trois zones avec un grossissement X1000.

### III.4 Les résultats de la dureté

Le tableau ci –dessous représente les valeurs obtenues de la dureté HRC des deux échantillons :

**TableauIII.1** : les valeurs de dureté HRC (Rockwell)

	<b>S1</b>	<b>S2</b>
<b>N°</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Moyenne</b>
<b>1</b>	62	58
<b>2</b>	52.33	56
<b>3</b>	58	57.33
<b>4</b>	48.66	54.33
<b>5</b>	45	54.33
<b>6</b>	45.66	54.66



La figure ci-dessous représente le profil de dureté pour l'échantillon S1 :

**Figure III.7 : Dureté HRC S1**

La figure III.7 montre les duretés HRC des échantillons obtenu avec les paramètres S1, On remarque qu'il subsiste trois palier :

- Le premier palier débute de 0 à 0.25 mm, on observe une diminution de dureté allant de 62 HRC vers 52.33,
- La deuxième zone est celle qui débute de 0.25 à 1mm, elle résume la ZF (joint de soudure) on remarque une HRC moyenne de 50 HRC, ce qui est logique vu que matériel d'apport a été fusion dans le bain marin.
- La trois zone est la deuxième partie de MB, on remarque une diminution considérable de la HRC au environ de 48HRC. On peut dire que cette zone a été affectée par l'augmentation de la taille du grain dû au forte chaleur induite par l'opération de soudage

La figure ci-dessous représente le profil de dureté pour l'échantillon S2 :

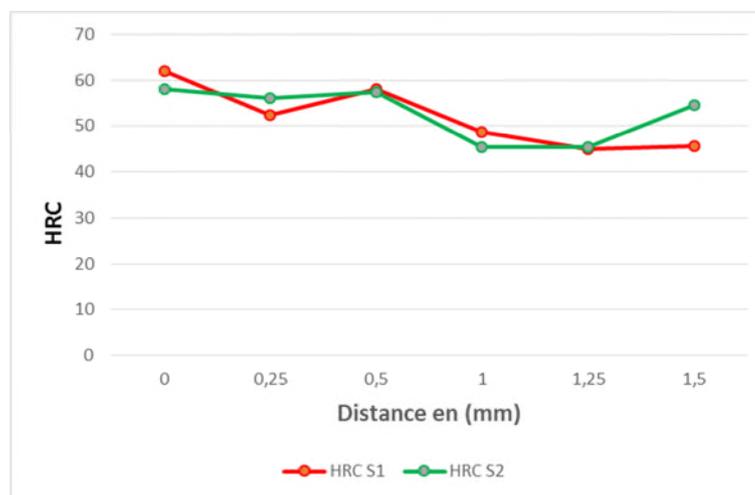
**Figure III.8 : Dureté HRC S2.**

La figure III.8 montre les duretés HRC des échantillons obtenu avec les paramètres S2, On remarque qu'il subsiste trois palier :

-la premier zone est celle qui de 0 à 0.5 mm, elle résume le MB on remarque une légère diminution de la dureté allons de 58 HRC ver 56, ensuite une légère augmentation de la dureté 56HRCver 57

-la deuxiem partie de la ZF( joint de soudeure ) debute de 0.5à 1.5 mm .on remaque un diminition de la durté 57 HRC ver 45 .ensuite le palier de 1à 1.25 mm set stable durté 45 HRC ,et encore une augmenttion de duertée allon de 45 HRC VER 54 .On peut dire que cette ZF a été affectée parla diminition de taille de grain dur ou forte chaleur enduite par le soudage sous-marin.

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



**FigureIII.9** : la dureté HRC S1, HRC S2

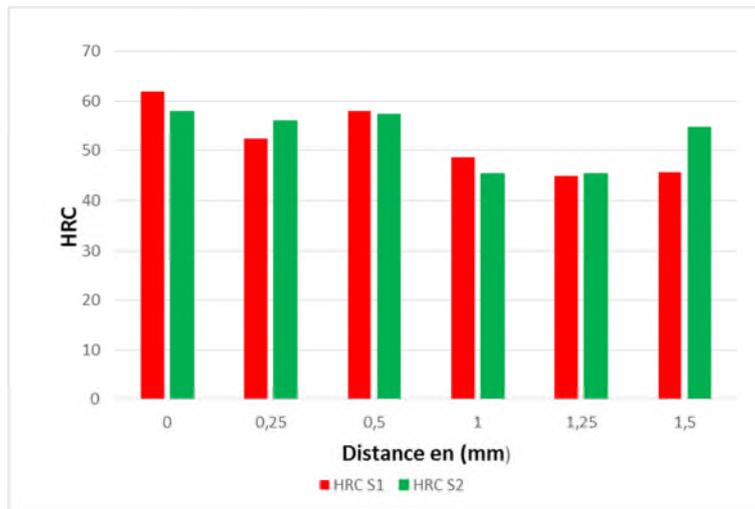
-le premier palier débute de 0 à 0.25 mm elle résume le MB de dureté HRC S1, HRC S2, on remarque une diminution de dureté.

- le deuxième palier débute de 0.25 à 0.5 mm on observe une légère augmentation pour HRC S1, HRC S2.

- le troisième palier débute 0.5 à 1mm elle résume la ZF des deux échantillons de HRC S1 HRCS2 .on remarque une diminution progressivement de la dureté c'est-à-dire que le joint de soudeur dû à la chaleur de soudage sous-marine

- le dernier palier de 1.25 à 1.5 mm elle résume les trois parties de MB de HRC S1, la ZF de HRC S2, on remarque que la dureté de HRC S2 et plus grand celle de HRC S1 on put dire que la ZF et plus dur celle de MB.

L'histogramme ci-dessous représente les valeurs moyennes des essais de dureté de deux échantillons S1, S2



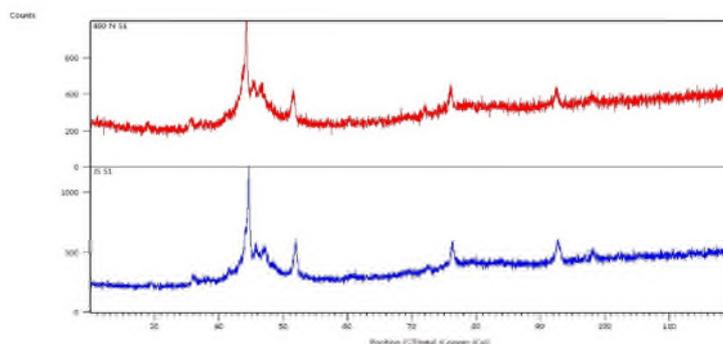
**Figure III.10 :** Dureté HRC S1, HRC S2.

L'histogramme de dureté moyenne nous permet de remarquer que l'évolution du profil de dureté est assez proche pour les deux joints de soudure,

on peut dire aussi que les duretés sont élevées dans le cœur du joint de soudure par rapport à celle des profils du métal de base, ceci peut être expliqué par le phénomène de ZAT du MB.

En effet, le MB aura subi un cycle de chauffage et de refroidissement qui se rapporte à un traitement thermique, ce qui augmentera la dureté des parois alors que le joint de grain est une fusion totale du métal d'apport.

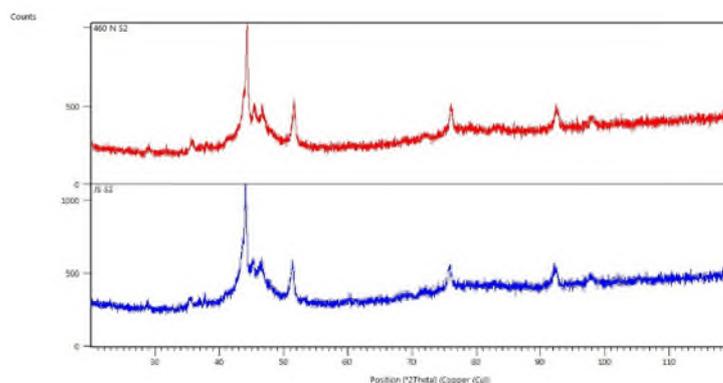
**III.5 Les résultats de diffraction de rayons X :** la figure suivante présente quatre spectres au



rayon X , Métal de base spectre joint obtenue avec réglage S1 et métal de base obtenue avec réglage S2

**place votre DRX III.111 ici**

**Figure III.11:** DRX S1 Spectre rouge MB, Spectre bleu S1

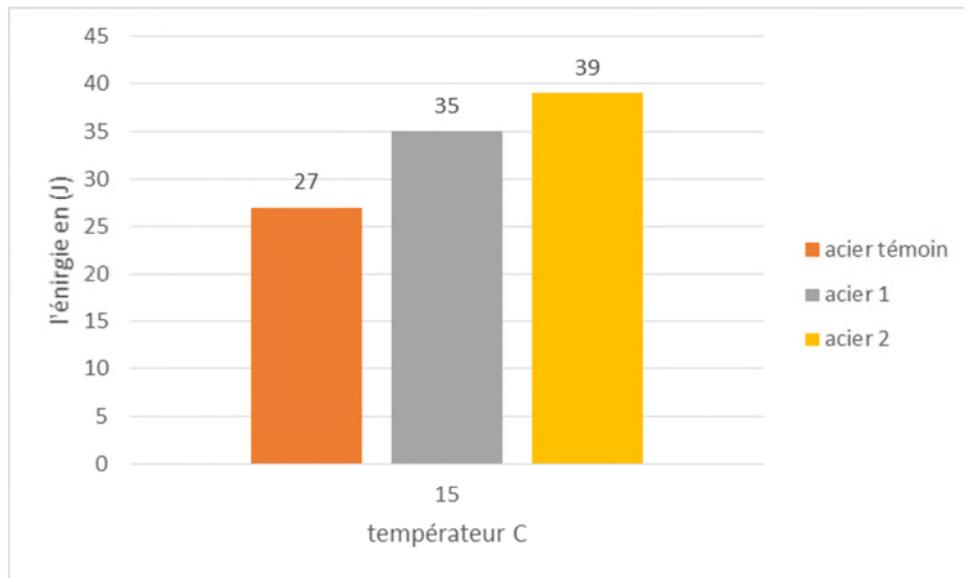


**Figure III.12:** DRX S2: Spectre rouge MB, Spectre bleu S2

Les schémas de diffraction de rayon X du joint du soudeur acier S460N pour les deux échantillons S1, S2 on présente la différente diffraction de rayons X des différentes zones (MB, JS) sont illustrés dans la figure III.11, III.12 comme on peut constater des pics d'austénite ont été observé dans le métal de base, on remarque que les deux spectre DRX du metal de base sont quasi identique, on peut dire que le métal est former essentiellement par austenite mais la taille de celle ci peut varie a cause du réglage de la torche qui fournira une enthalpie beaucoup plus importante, alors que dans les joint de grain on remarque la présence de plusieurs type de pics mais qui corresponde au même degrés 2 theta du MB, on peux de cela dire quil subsiste une bonne diffusion de phase en les deux métaux

### III.6. Les résultats essai de Charpy :

L'histogramme suivant nous montre les résultats d'essai de résilience obtenue pour nos différents échantillons acier S460N sans soudure, avec joint de soudure S1 et un joint de soudure S2. les essais ont été effectués à une température de 15 degrés Celsius.



**Figure III.13 :** Résistance au choc pour une température 15 degrés

Les résultats sont présentés sous forme d'histogramme décrivant les valeurs d'énergie par chaque acier avec une température de 15 degrés. On remarque que l'énergie de l'acier 1, l'acier 2 est plus grande par rapport à l'acier témoin, donc l'acier 1, l'acier 2 sont plus résistants au choc que le MB (acier témoin) et sont plus ductiles.

### III.7. Oxydation des joints de soudure

Le tableau suivant présente les valeurs de masse durant 12 jours.

**Tableau III.2 :** les pertes de masse des différents joints de soudure par le phénomène d'oxydation

Date(j)	Masse (g) S1	Masse(g) S2
1j	13.8118	11.1606
3j	13.8109	11.1599
6j	13.8265	11.1781
9j	13.8320	11.1787
12j	13.8483	11.1827

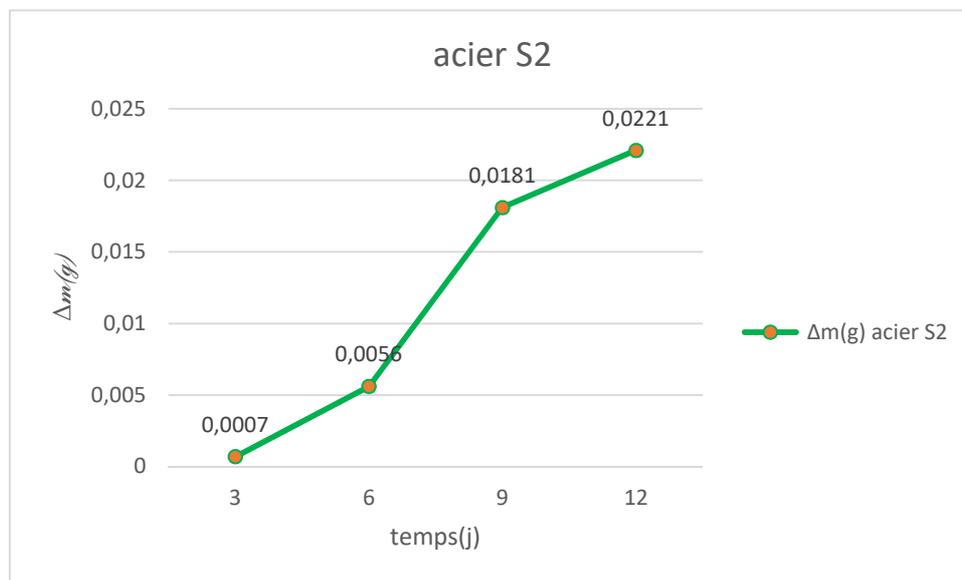
La figure ci-dessous représente le profil de différence de masse en fonction de temps pour l'échantillon S1



**Figure III.14 :** la différence de masse en fonction de temps.

On remarque dans la Figure III.14 que la différence de masse dans les premier 3 jour une légère augmentation cela indique une réaction d'oxydation, ensuite une augmentation jusqu'à la durée 12 jour Ceci conséquence il Ya dépôt sur l'acier.

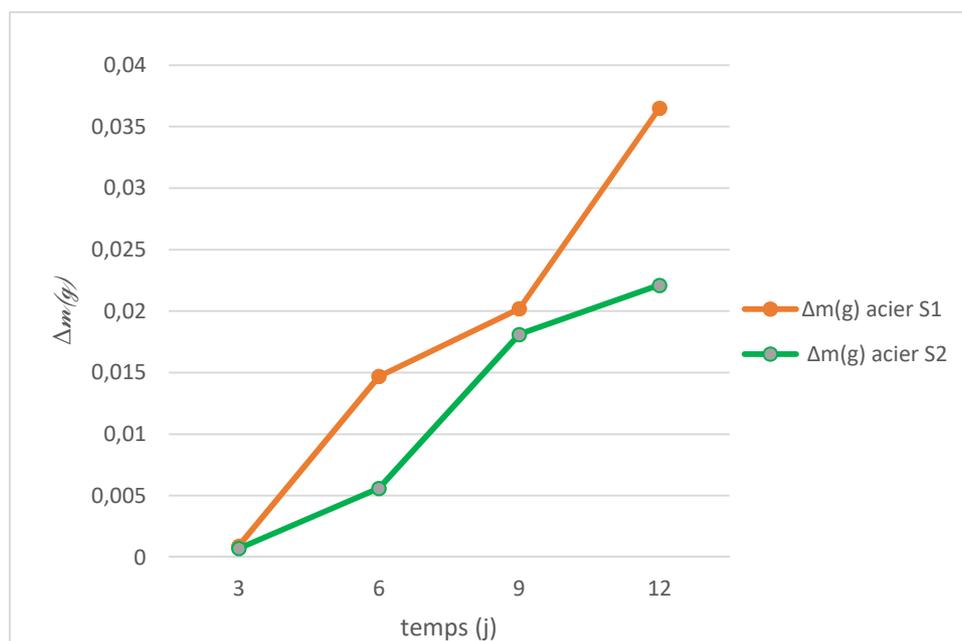
La figure ci-dessous représente le profil de différence de masse en fonction de temps pour l'échantillon S2



**Figure III.15 :** la différence de masse en fonction de temps

On remarque dans la Figure III.15 que la différence de masse dans les premier 3 jour une valeur léger augmentation, cela indique une réaction d'oxydation, ensuite une augmentation brusque jusqu'à la durée 9 jour ensuite une augmentation à 12 jour. Ceci est conséquence il Ya dépôt sur l'acier.

La figure ci-dessous représente le profil de différence de masse on fonction de temps des deux échantillons (Etude comparative) :



**FigureIII.15** : étude comparative de différences de masse en fonction de temps pour deux

Échantillons S1, S2.

On remarque que les valeurs de différence de masse dans les premier 3jour à de la même valeur ensuite une augmentation progressivement par conséquence il Ya dépôt sur l'acier qui entraine automatique une augmentation, c'est la preuve de l'existence de corrosion.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Ce travail porte sur la caractérisation microstructurale et mécanique du joint soudé obtenue par fusion marin d'un acier S460N.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à des essais mécaniques et des observations métallographiques qui ont été effectués sur deux échantillons acier S460N.

Pour aboutir à nos objectifs, on a utilisé plusieurs techniques de caractérisation :

- ❖ La microscopie optique
- ❖ L'essai de dureté
- ❖ L'essai de résiliences
- ❖ La diffraction de rayons X

A partir de ces techniques, nous avons pu arriver aux résultats suivants :

- ❖ L'étude microstructurale a révélé les trois principales zones (MB, ZAT et ZF) et leurs phases,
- ❖ L'étude de la dureté a montré la différence de dureté dans les trois zones du joint soudé,
- ❖ L'étude de la résilience montre l'acier le plus résiste ou choc est connu par sa bonne résistance mécanique et de son excellente ténacité
- ❖ L'étude par diffraction X a révélé la principale phase de l'acier étudié et qui est l'austénite.

# Annexes

## Références bibliographiques

---

[1] **S.BENSADA**. Fonderie et soudage. Cour, université de Biskra.

[2] **S.Bensaada**, cours le soudage 18 page, Univer-biskra.dz.

[3] thecnologie-indistrielle/ soudage-partie1.

[4] **A.DJELIL**. Etude mécanique et microstructurale de structure en acier  
Inox 304L soudée par TIG.2013/2014.

[5] **André Bayer**, chef de projet recherche – CTICM – Mars 2020.

[6] techniques –ingénieure soudage électrode enrobée.

[7] **A.AKACHAT**. Etude du procédé de soudage semi-automatique MIGMAG d'un joint  
soudé en acier ST37.2018.

[8] **DJELIL Ammar** .Etude mécanique et microstructurale de structure en acier  
Inox 304L soudée par TIG.2013/2014.

[9] <http://www.zpag.net.soudage> déformation.

[10] <https://www.formation-soudure> le soudage MIG MAG s d service-2016.

## Références bibliographiques

---

[11] **HADDOU Hanane** .Automatisation du diagnostic des défauts de soudage.2018.

[12] <https://www.controle-visuel.com> contrôle-soudures.

[13] [http://m.fr.marine steels.com](http://m.fr.marine-steels.com) s460-low-ally-stee.

[14] [construction.arcelormittal.com/Fr /nuances-d' Acier /s-460](http://construction.arcelormittal.com/Fr/nuances-d'Acier/s-460).

[15] [www.emcot est.com/Fr/l'univers-des essais –de dureté](http://www.emcot-est.com/Fr/l'univers-des-essais-de-durete).

# Résumé

---

## Résumé :

L'objet de cette étude consiste à mettre en évidence le comportement mécanique et L'observation métallographique de deux échantillons acier S460N.

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

On étudie l'évolution structurale des joints soudés et la zone affectée thermiquement (Z.A.T).

Le type de soudage effectué est le soudage sous atmosphère marine, et on abordera les Propriétés du joint de soudure.

## Abstract:

The purpose of this study is to highlight the mechanical behavior and Metallographic observation of two S460N steel samples.

I were interested in the solder joint on the two samples more specifically on the mechanical properties such as resilience and hardness and corrosion.

Study the structural evolution of welded joints and the heat-affected zone (Z.A.T).

The type of welding carried out is welding under marine atmosphere, and we will discuss the Solder joint properties.

## ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو إبراز السلوك الميكانيكي والمراقبة المعدنية لعينتين من الفولاذ

S460N

مهتم بمفصل اللحام في العينتين بشكل أكثر تحديداً بشأن الخواص الميكانيكية مثل المرونة والصلابة والتآكل

(Z.A.T) ندرس التطور الهيكلي للوصلات الملحومة والمنطقة المتأثرة بالحرارة

نوع اللحام المنفذ هو اللحام تحت الغلاف الجوي البحري، وسوف نناقش

خصائص مفصل اللحام