

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté Par :

BENMESSAOUD ANIS

BENHAMOUCHE AREZKI

Thème

**Caractérisation d'un joint de soudur obtenu sous
atmosphère humide**

Soutenu le 03/07/2024 devant le jury composé de :

M.	SAD EDDINE Abdelhamid	Président
M.	BRADAI Mohand Amokrane	Rapporteur
M.	YOUNES Rassim	Examineur

Année Universitaire 2023-2024



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

*Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom :

Prénom :

Matricule :

Spécialité et/ou Option :

Département :

Faculté :

Année universitaire :/.....

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé:

.....

.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le

...../...../.....

Signature de l'intéressé

Lu et approuvé

.....

Remerciements

On remercie dieu tout d'abord qui nous a donné la santé et la volonté de terminer ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères vont à Mr BRADAI M.A, notre promoteur, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, ses critiques constructives pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements vont aux membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

On tient également à exprimer notre profonde gratitude à nos parents et nos familles pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

On doit également remercier le personnel de hall de technologie de l'Université de Bejaia, et toutes les personnes qui ont apporté leur soutien à la réussite de ce mémoire.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :
A la mémoire de mon cher père, à ce grand homme qui a sacrifié sa
vie pour sa famille et qui a fait de nous des hommes et des femmes,
tu es plus là mais présent toujours dans nos cœurs vava, paix
éternelle à ta belle âme.*

*A la plus belle des femmes, ma vie et mon amour ma mère qui m'a
appris et élevé d'une très bonne éducation, ta présence à mes cotes a
toujours été ma source de force, que dieu vous protège.*

*A mes frères vous étai toujours présent à mes côtés pour me
soutenir, que ce travaille traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mes très chères sœurs pour l'amour qu'elles me réservent, je vous
aime.*

*A mon adorable chère Biba, pour son soutien moral, sa présence, et
ces encouragements.*

*A tout la famille AAI que des bons souvenirs avec vous les amis
A tous mes amis tout particulièrement mon cher ami avant d'être
binôme BENMESSAOU D ANIS.*

BENHAMOUCHE AREZKI

Dédicaces

*À ma mère et mon père, dont l'amour et le soutien inconditionnels
ont été ma source de force et d'inspiration tout au long de ce
parcours.*

*À mes frères pour leur camaraderie et leur encouragement
constants.*

À mes sœurs pour leur affection et leur compréhension infinies.

À mes amis pour leur amitié fidèle et leur soutien indéfectible.

*Et enfin, à mon binôme et ami : **BENHAMOUCHE AREZKI**, dont
la collaboration et l'amitié ont été essentielles à la réalisation de ce
mémoire.*

BENMESSAOUUD ANIS

Sommaire

Caractérisations d'un joint de soudeur obtenu sous atmosphère humide	1
<i>Remerciements</i>	ii
<i>Dédicaces</i>	iv
Sommaire.....	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SOUDAGE	2
I.1. Introduction	3
I.2. Soudage	3
I.3. Les procédés de soudage	3
I.3.1. Soudage à l'électrode enrobée	4
I.3.2. Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG	4
I.4. Éléments sur les phénomènes physiques du soudage.....	5
I.4.1 effet thermique	6
I.4.1.1 les déformations en soudage	6
I.5. Présentation du soudage sous l'eau	7
I.5.1 Les différentes techniques de soudage sous l'eau	8
I.5.2 Les avantages et les inconvénients du soudage sous l'eau	8
I.6. Modification microstructurales en zone affectée par la chaleur et les conséquences métallurgiques	8
I.6.1 Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur	9
I.6.2 Transformation en ZAC lors du chauffage	9
I.6.3 Transformation en ZAC lors du refroidissement	10
I.6.4 Transfert du métal dans l'arc soudage	11
I.6.4 Transfert par court-circuit	11
I.7. Les défauts des soudages.....	12
I.7.1 Les fissures.....	12
I.7.1.1 orientation des fissures	13
I.7.1.2 Les fissures longitudinales	13

I.7.1.3 Les fissures transversales	13
I.7.2 Les types des fissures	14
I.7.2.1 fissures de Gorge (Throat Cracks)	15
I.7.2.2 fissures de racine	15
I.7.2.3 fissures de cratère	16
I.7.2.4 fissures au raccordement	16
I.8.1 Effets connus du soudage sous l'eau sur les propriétés des soudeurs	17
I.8.1.1 Microstructure des soudures sous l'eau	17
I.8.1.2 Résistance à la corrosion des soudures sous l'eau	17
I.8.2 Importance du traitement thermique dans la métallurgie des soudures	18
I.8.3 Propriétés mécaniques	19
I.8.4 Propriétés électrochimique « corrosion »	19
CHAPITRE II : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES	21
II. Introduction	21
II.1 Matériaux utilisés	21
II.2 Paramètre de soudage	22
II.3 Présentation des échantillons	22
II.3.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques	22
II.3.1.1 Fraisage des échantillons	22
II.3.1.2 Découpage d'échantillon	22
II.3.1.3 Traitement thermique :	23
II.3.1.4 Polissage	25
II.4 Observation Métallographique	25
II .4.1 Observations au microscope optique	25
II.5 Caractérisation mécanique	26
II.5.1 Essais de dureté	26
II.6 Essai de résilience (Charpy)	27
CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	29
III.1 Introduction	30
III.2 Résultat Fluorescence X(XRF)	30
III.2.1 Fluorescence X(XRF) S1 (non traite)	30
III.2.2 Fluorescence X(XRF) S2 (traité)	31
III.3 Caractérisation structurale par diffraction de rayon X	32
III.3.1 Caractérisation structurale de l'acier de base S460N	32
III.3.2 Caractérisation structurale de S1 (zone soudée) :	33
III.3.3 Caractérisation structurale de S2 (substrat) :	34
III.3.4 Caractérisation structurale de S2 (zone soudée) :	35
III.4 Image microscopiques	36
III.4.1 Image microscopiques S1	36
III.4.2 Observation S1	36
III.4.3 Image microscopiques S2	36
III.4.4 Observation S2	37

III.5 Les résultats de la dureté	37
III.5.1 Les résultats de la dureté S1	37
III.5.2 Les résultats de la dureté S2	38
III.5.3 étude comparative.....	39
III.6 Caractérisation mécanique	40
III.6.1 Profil de rugosité S1 (substrat)	40
III.6.2 Profil de rugosité S1 (zone soudée).....	40
III.6.3 profils de rugosité S2 (substrat).....	41
III.6.4 Profil de rugosité S2 (zone soudée).....	41
III.7 essai de résilience	42
III.7.1 Résultat essai de résilience	42
Conclusion Générale	45
Références Bibliographiques	48

Liste des figures

Figure I.1 : circuit de soudage à l'arc enrobée	4
Figure I.2 : principe de soudage mig/mag	5
Figure I.3 : les phénomènes physiques du soudage.....	6
Figure I.4 : Différents modes de déformations.	7
Figure I.5 : homme faisant des travaux de soudage sous l'eau.	7
Figure I.6 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C.....	10
Figure I.7 : La fissure longitudinale.	13
Figure I.8 : La fissure transversale.	14
Figure I.9 : Les types de fissure.....	14
Figure II.1 : découpeuse buehler abrasimet 2.....	23
Figure II.2 : cycle des traitements thermiques.....	23
Figure II.3 : four électrique	24
Figure II.4 : polisseuse sous jet d'eau	25
Figure II.5 : microscope optique	26
Figure II.6 : machine d'essai dureté Innovatest Falcon 400g2.....	27
Figure II.7 : essai de Charpy.....	28
Figure II.8 : schéma de fonctionnement.....	28
Figure III.1 : DRX S1 (substrat) et quantifications des phases	33
Figure III.2 : DRX S1 (zone soudée).....	33
Figure III.3 : DRX S2 (substrat) et quantifications des phases	34
Figure III.4 : DRX S2 (zone soudée).....	35
Figure III.5 : joint de soudure S1.....	36
Figure III.6 : joint de soudure S1.....	36
Figure III.7 : joint de soudure S2.....	36
Figure III.8 : joint de soudure S2.....	36
Figure III.9 : joint de soudure S2.....	37
Figure III.10 : dureté HRC S1	37
Figure III.11 : dureté HRC S2.....	38

Figure III.12 : comparatif entre la dureté HRC S1 et S2.....	39
Figure III.13 : courbe de rugosité de S1 extrémité.....	40
Figure III.14 : courbe de rugosité de S1 joint de soudure	40
Figure III.15 : courbe de rugosité de S2 extrémité.....	41
Figure III.16 : courbe de rugosité de S2 joint de soudure	41
Figure III.17 : comparatif de résilience entre MB, S1 et S2.....	42

Liste des tableaux

Tableau II.1 : composition chimique de l'acier S460N	21
Tableau II.2 : paramètre de soudage des échantillons sous environnement marine	22
Tableau III.1 : Résultat FRX S1	31
Tableau III.2 : Résultat FRX S2.....	32
Tableau III.3 : Résultat essai de résilience	42

Introduction Générale

Introduction Générale

Parmi les procédés d'assemblage, le soudage occupe une place importante dans la fabrication de la plupart des produits et infrastructures modernes, c'est un procédé polyvalent applicable à de nombreux matériaux et dans de nombreux domaines industriels (aéronautique, automobiles, nucléaire, cryogénie, bateaux, trains, ponts, réservoir et tant d'autres machines...). Les techniques de soudage continuent d'évoluer, offrant de nouvelles possibilités et améliorant la qualité des assemblages.

La soudure sous-marine est une technique cruciale dans de nombreux domaines, de la construction navale à l'industrie pétrolière et gazière. Cependant, la soudure dans des environnements subaquatiques présente des défis uniques en raison des conditions environnementales rigoureuses et des contraintes physiques particulières. L'un des matériaux couramment utilisés pour de telles applications est l'acier à haute résistance et faible alliage (HSLA), en raison de sa combinaison de résistance mécanique et de résistance à la corrosion. Cette étude revêt une importance significative dans le contexte de diverses industries où la fiabilité et la durabilité des structures soudées sont essentielles. Comprendre le comportement des soudures sous-marines en acier à haute résistance et faible alliage permettra de guider les pratiques de fabrication et de maintenance, ainsi que de contribuer au développement de normes et de directives pour assurer des performances optimales dans des environnements subaquatiques exigeants.

Dans notre cas d'étude, le poste utilisé est de type pulse 300, équipé d'un moteur électrique à faible vitesse (10mm/s) pour entraîner le cordon. Un dispositif de régulation de gaz, comprenant des débitmètres à flotteur pour contrôler le débit d'oxygène et d'argon, ainsi que des manomètres pour contrôler la pression. L'électrode utilisée pour cette tâche est le barracuda (E42 21 Ni RR 51) dont le diamètre est de 4mm c'est une électrode rutile spécialement conçue pour le soudage humide.

L'objectif de ce mémoire de master est d'analyser les propriétés et d'étudier les caractérisations d'un joint de soudeur obtenu sous atmosphère humide pour deux échantillons en acier S460N.

Nous avons partagé notre travail en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, on aborde les principes généraux du soudage.

- Le deuxième chapitre expose les matériaux et les différentes techniques expérimentales utilisées.
- Le chapitre trois se concentre sur la présentation des résultats expérimentaux obtenus lors de divers essais réalisés pour la caractérisation et la microstructure du joint de soudeur en acier S460N.

Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera les points importants des résultats obtenus

Chapitre I :
GENERALITE SUR LE
SOUDAGE

Chapitre I :

GENERALITE SUR LE SOUDAGE

I.1. Introduction

Le soudage est un procédé de fabrication qui occupe une place importante dans divers secteurs industriels, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

I.2. Soudage

Dans le domaine de la construction métallique, le soudage représente un moyen d'assemblage important. Notamment, quand l'objectif est de créer un assemblage permanent, avec continuité de matière et sans jeu la soudure est utilisée au lieu d'un assemblage par boulon.

On distingue deux types de soudure :

- a- **La soudure Autogène** : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- b- **La soudure Hétérogène** : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

I.3. Les procédés de soudage

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, avions, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs... Lorsqu'on assemble deux pièces de métal, on doit tenir compte de leurs propriétés physiques, de l'usage auquel le produit final est destiné et des installations de production disponibles. C'est pourquoi il existe plusieurs méthodes de soudage par fusion ou par pression, adaptées à chaque cas de figure. Parmi les procédés de soudage les plus employés aujourd'hui, on peut mentionner le soudage aux gaz, le soudage aluminothermique, le soudage à l'arc, le soudage par résistance, le soudage laser et le soudage par faisceau d'électrons. [1]

I.3.1. Soudage à l'électrode enrobée

Le soudage à l'électrode enrobée (également Le soudage manuel à l'arc avec une électrode enrobée ou Manual Métal Arc), est un procédé flexible et utilisable dans toutes les positions de soudage, Il s'agit du type de soudage le plus répandu.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc électrique jaillissant entre les pièces à souder et une électrode fusible fournissant le métal d'apport. La soudure à l'arc électrique est une soudure de type autogène, pour l'assemblage de pièces en acier. Les assemblages ainsi obtenus sont très résistants puisque l'acier est mis en fusion et les deux éléments soudés ne forment plus qu'une seule masse en acier après soudage.

Pour obtenir cette fusion il faut une température très élevée supérieure à 3000°C. Celle-ci est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode constituée de métal d'apport) en créant un «arc électrique » qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois de la lumière et une chaleur intense.

Circuit électrique pour le soudage à l'arc

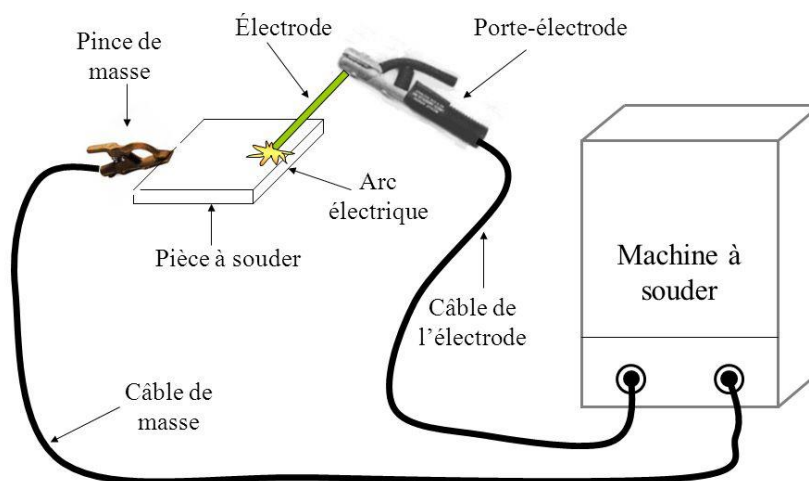


Figure I.1 : circuit de soudage à l'arc enrobée

I.3.2. Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG

Il s'agit d'un procédé semi-automatique avec fil métallique qui convient pour la soudure manuelle, mécanisée et robotisée.

La soudure MIG sous protection de gaz inerte est un procédé de soudage très utilisé de nos jours. Pour ce procédé, on crée un arc électrique entre la pièce à souder et le fil d'apport (de \varnothing 0,6 à \varnothing 2,4 mm). Lorsque l'arc est obtenu, on dévide ce fil d'apport à vitesse constante et

continu dans le bain de fusion généré par l'énergie puissante de cet arc. On obtient un cordon de soudure par mélange du métal d'apport et du métal de base, en fusion pendant l'arc. Il est réalisé sous protection gazeuse (active pour le procédé de soudure MAG et inerte pour le procédé de soudure MIG). La soudure MIG-MAG est utilisée dans une variété d'applications industrielles et de fabrication, notamment dans les industries automobiles, aérospatiales, de la construction navale, de la fabrication de structures métalliques et bien d'autres. Lors de la soudure, il est idéal d'orienter votre travail dans des positions où la gravité permet de contrôler le bain de fusion.

Les paramètres influant sur la réalisation du cordon sont :

- La vitesse de fil (l'intensité) ;
- La dimension et les matériaux à souder ;
- Le débit en gaz ;
- Le diamètre du fil électrode ;
- La position de soudage ;
- La préparation [2].

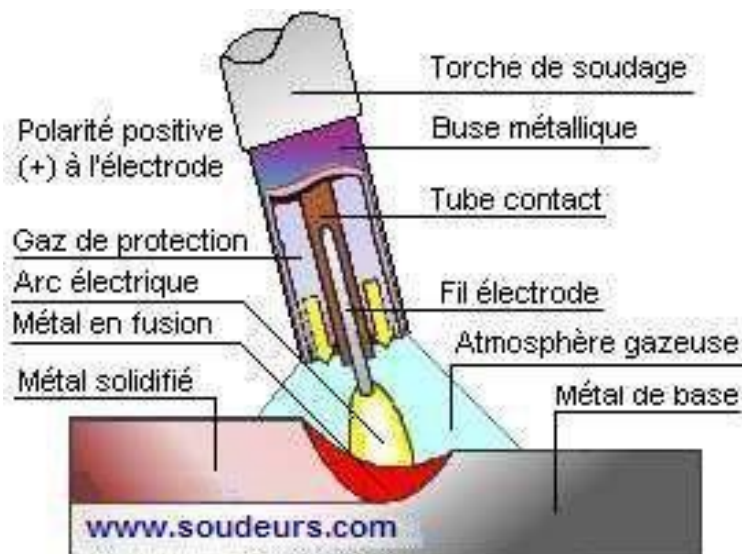


Figure I.2 : principe de soudage mig/mag

I.4. Éléments sur les phénomènes physiques du soudage

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.

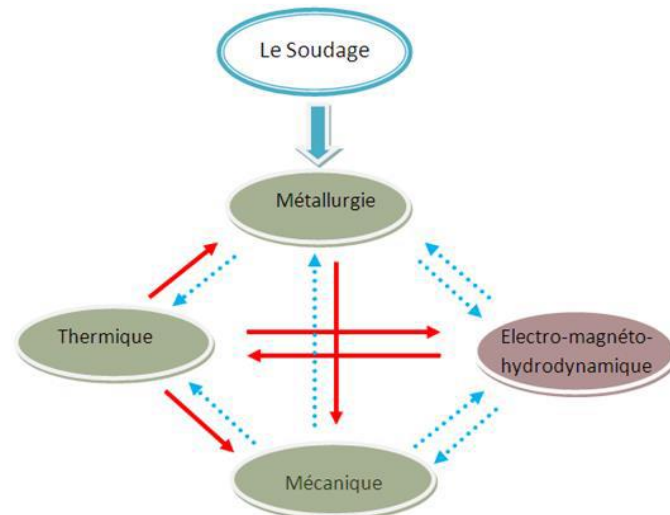


Figure I.3 : les phénomènes physiques du soudage

I.4.1 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.

Les principaux paramètres caractérisant le régime thermique de soudage peuvent s'exprimer, pour un assemblage et un procédé de soudage donné, en fonction de la durée de refroidissement entre 800 °C et 500 °C.

L'ensemble des phénomènes physiques, métallurgiques ou mécaniques qui se produisent lors de l'exécution d'un joint soudé ou d'un rechargement aussi bien dans la zone fondue que dans l'ensemble de la structure soudée dépendent de la grandeur de l'apport calorifique « Heat Input », $H = P/V$ rapport entre la puissance nette de la source de chaleur et la vitesse V de soudage.[3]

I.4.1.1 Les déformations en soudage

Les déformations résultent des déformations des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Ces déformations résultant d'une répartition thermique non uniforme seront également variables dans les pièces assemblées comme le montre la figure (1.4.)

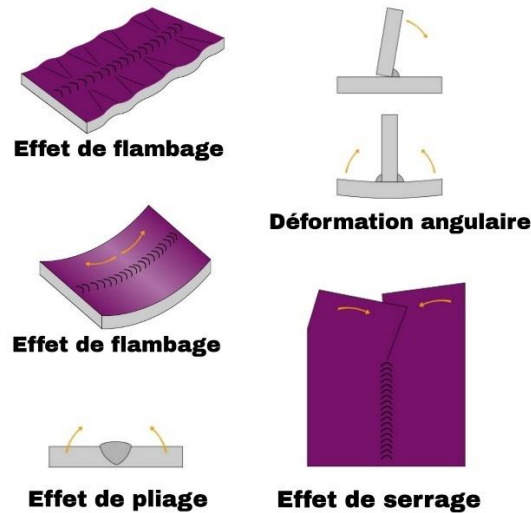


Figure I.4 : Différents modes de déformations. [3]

I.5. Présentation du soudage sous l'eau

Le soudage sous l'eau semble être un défi, c'est la combinaison de deux compétences spécialisées le soudage et la plongée nécessite beaucoup de pratique et ne convient pas à tout le monde ce type de travaille met au défi un véritable expert et l'encourage à montrer ses compétences. [4]



Figure I.5 : homme faisant des travaux de soudage sous l'eau.

- a) - Processus complexes** : Le soudage sous l'eau implique des techniques spéciales pour travailler dans des environnements aquatiques.
- b) - Protection contre la corrosion** : Il est essentiel dans la réparation des structures immergées comme les pipelines et les plateformes pétrolières.
- c) - Formation spécialisée** : Ces tâches complexes. Les soudeurs doivent être formes à la plongée et au soudage pour effectuer.

I.5.1 Les différentes techniques de soudage sous l'eau

- **Electrode enrobée**
Utilise une électrode spéciale pour protéger le soudeur de l'eau.
- **Oxyacétylénique**
Utilise un mélange de gaz inflammable pour produire la chaleur nécessaire.
- **Soudage hyperbare**
Se déroule dans un environnement à haute pression pour éviter les complications de la plongée.

I.5.2 Les avantages et les inconvénients du soudage sous l'eau

Avantages

- Capacité à effectuer des réparations sans drainer l'eau ;
- Réduit les coûts de temps et d'argent pour les opérations sous-marines ;
- Essentiel pour les projets de construction dans des environnements aquatiques.

Inconvénients

- Les soudeurs doivent s'habituer à travailler dans des environnements extrêmes ;
- Nécessite une formation et une qualification spéciales ;
- Les problèmes logistiques peuvent prolonger les délais.

I.6. Modification microstructurales en zone affectée par la chaleur et les conséquences métallurgiques

Les cycles thermiques provoqués par les opérations de soudage transforment les phases en état solide dans la zone affectée thermiquement (ZAT) et en état liquide dans la zone fondue (ZF). La composition chimique locale du matériau de base et les conditions de soudage telles que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la torche et les conditions de refroidissement déterminent ces modifications métallurgiques. Ces transformations, en revanche, modifient les propriétés thermiques du matériau et entraînent l'absorption ou le dégagement de chaleur, appelées chaleurs latentes de transformation.

La variation des propriétés mécaniques en fonction de la température et la dilatation thermique du matériau montrent l'impact de l'histoire thermique sur la mécanique. La dissipation

intrinsèque causée par les déformations plastiques montre l'impact de l'état mécanique sur le champ de température. Cependant, la dissipation mécanique est inférieure à la puissance énergétique du processus de soudage lors de la simulation d'une opération de soudage par fusion.

Les contraintes et les déformations résiduelles sont causées par l'histoire thermique et les modifications microstructurales causées par le soudage. Il y a plusieurs phénomènes qui en sont à l'origine :

Les dilatations différentielles causées par le 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. [5]

I.6.1 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 : [6]

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

I.6.2 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'Easterling, il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. (Figure I.6.)

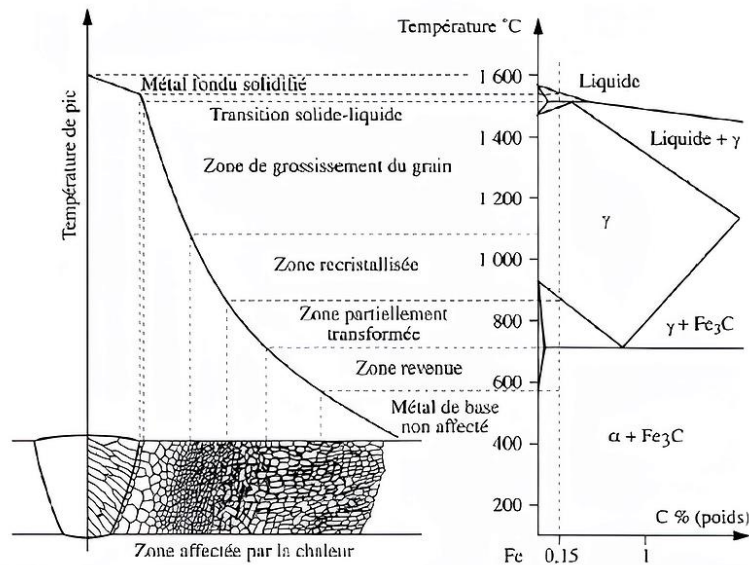


Figure I.6 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C.

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 subcritique, 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 A3 et jusqu'à 1 495 °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 coexistent une phase ferrique solide (δ) 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.

I.6.3 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_{α} . Cette zone appelée Zone Affectée Thermiquement ZAT est comprise entre la ligne de fusion dans le métal de base et la température T_{α} .

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 permette 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 TRC).

I.6.4 Transfert du métal dans l'arc soudage

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. [7]

I.6.4 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 \emptyset 0,6mm, \emptyset 0,8 mm et \emptyset 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.

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. [8]

I.7. Les défauts des soudages

Toutes les soudures présentent des défauts et des déformations, Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Les défauts ou les discontinuités dont la taille est très importante sont appelés les défauts inacceptables.

I.7.1 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. 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. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales en fonction de leur orientation.

I.7.1.1 Orientation 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.7.1.2 Les fissures longitudinales

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par d'hydrogène dessous (Figure I.7).

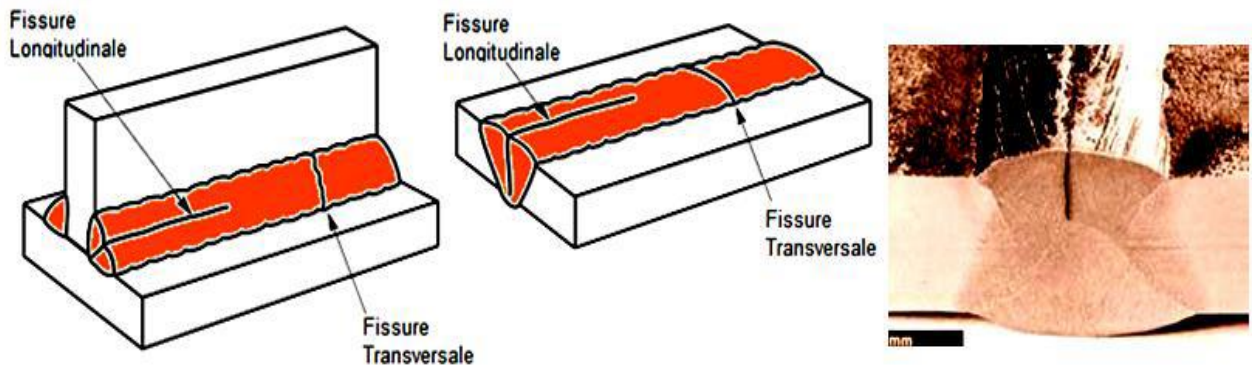


Figure I.7 : La fissure longitudinale.

I.7.1.3 Les fissures transversales

Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure. Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal.

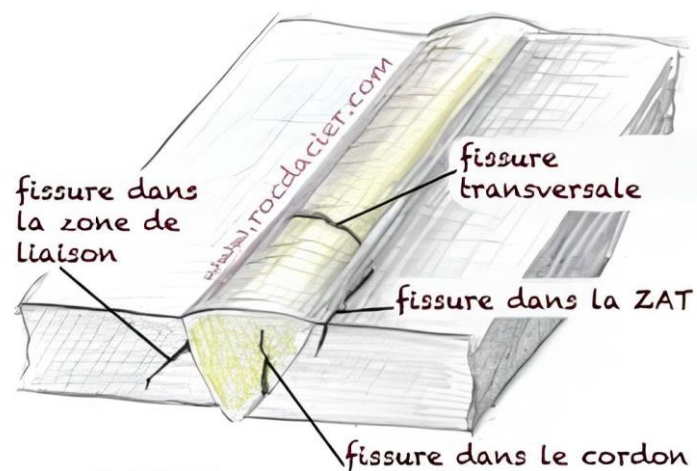


Figure I.8 : La fissure transversale. [9]

I.7.2 Les types des fissures

La figure (I.9) Résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

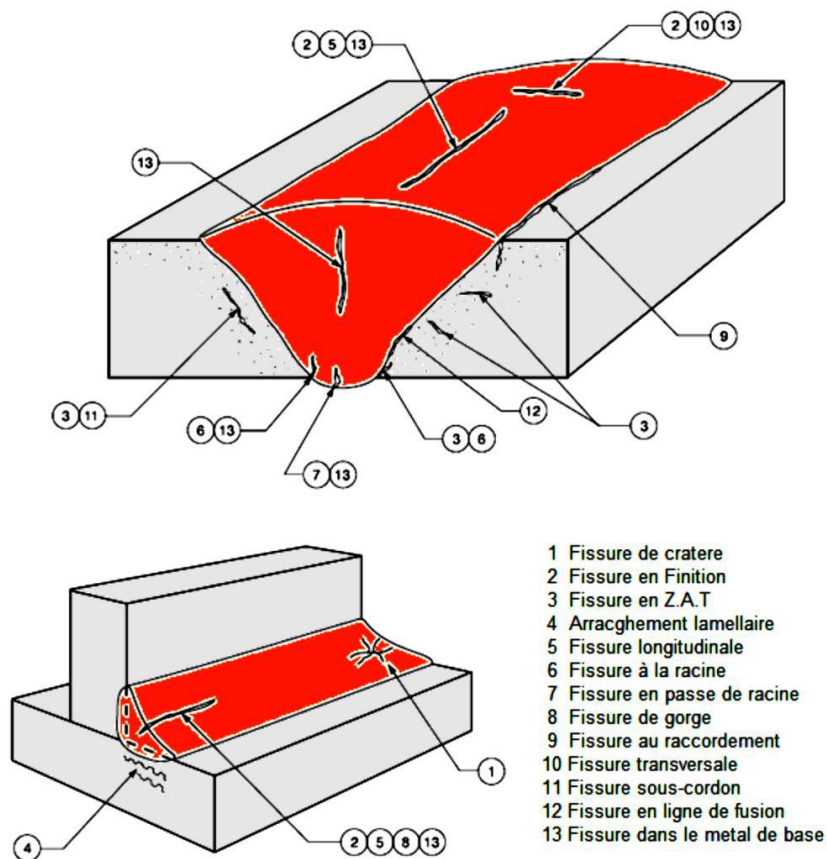


Figure I.9 : Les types de fissure.

Les autres défauts de forme sont particulièrement nombreux, on citera rapidement quelques défauts :

- Sillons aux caniveaux et morsures en surface ;

- Retassures de cratère ;
- Manque de fusion ;
- Manque de pénétration ;
- Excès de pénétration (Excès de matière) ;
- Recouvrements non fusionnés (Débordements) ;
- Dénivellement ;
- Effondrement à la racine ;
- Projections sur le métal de base. [10]

I.7.2.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks)

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Figure I.10.). Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud [10]

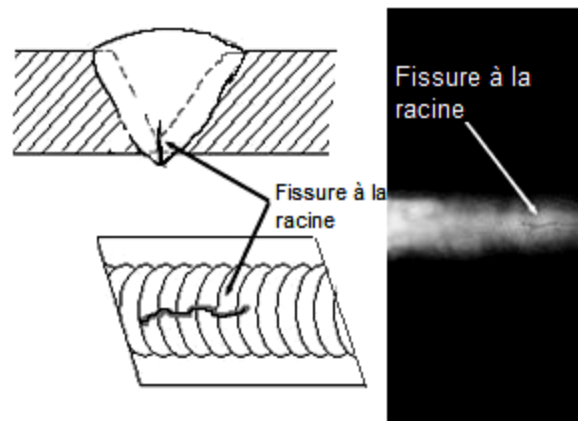


Figure I.10 : Fissure de Gorge (Throat Cracks).

I.7.2.2 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.

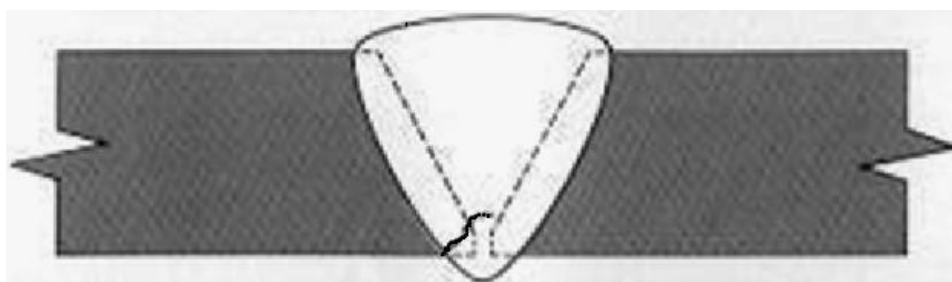


Figure I.11 : Fissure de racine

I.7.2.3 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. 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 (Figure I.12.). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère.[10]



Figure I. 12 : Fissure de cratère

I.7.2.4 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 (Figure I.13.). 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.[10]

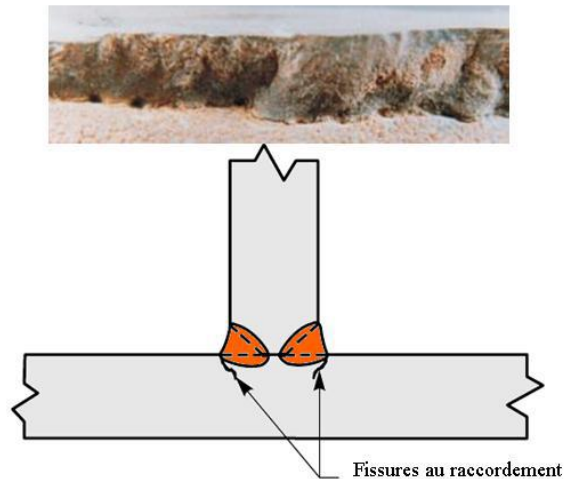


Figure I. 13 : Fissure de raccordement

I.8.1 Effets connus du soudage sous l'eau sur les propriétés des soudeurs

I.8.1.1 Microstructure des soudures sous l'eau

- **Graines fines**

Les soudures sous-marines présentent une microstructure avec des grains fins en raison de leur refroidissement rapide dans l'eau.

- **Inclusions et porosités**

La résistance des soudures sous-marines est influencée par la présence d'inclusions et de porosités.

- **Transformation de phase**

Il est possible que le métal fondu subisse des transformations de phase complexes, ce qui entraîne la formation de microstructures hétérogènes

- **Hydrogène dissous**

La dissociation de l'hydrogène dans le bain de fusion peut entraîner la création de fissures

I.8.1.2 Résistance à la corrosion des soudures sous l'eau

- **Milieu agressif** : La pression hydrostatique élevée et l'environnement aquatique rendent le lieu très corrosif pour les soudures.
- **Problème de passivation** : Les conditions de soudage sous-marin empêchent la formation d'une couche de passivation protectrice.

- **Piqûres de corrosion** : Les imperfections microstructurales encouragent l'émergence de piqûres de corrosion situées.
- **Fissuration par corrosion** : De la fissuration peut survenir en raison de la combinaison des contraintes résiduelles et de l'environnement corrosif.

I.8.2 Importance du traitement thermique dans la métallurgie des soudures

Le traitement thermique est un ensemble de procédés industriels qui consiste à modifier les propriétés physique, mécanique et/ou chimique de matériaux principalement des aciers et des alliages métalliques. L'objectif est d'obtenir des pièces avec des caractéristiques mécaniques différentes des pièces initiales, ou il existe différents types de traitement thermique après soudage sont utilisés pour diverses raisons et divers matériaux :

a) Relaxation des contraintes : la relaxation des contraintes est généralement réalisée par un traitement thermique après soudage. La relaxation des contraintes est utilisée pour éliminer toutes les contraintes internes ou résiduelles qui peuvent survenir lors de l'opération de soudage. La relaxation des contraintes après soudage peut être nécessaire pour réduire le risque de brisure directe, éviter une déformation ultérieure lors de l'usinage ou éliminer le risque de corrosion sous contrainte.

b) Obtenir une structure métallurgique appropriée : pour obtenir une structure métallurgique appropriée pour certains aciers alliés, un traitement de trempe thermique peut être nécessaire. Ce traitement est effectué après le refroidissement de la soudure, mais dans certaine situation, il peut être nécessaire de l'effectuer avant le refroidissement.

c) Normalisation après soudage : la normalisation après soudage peut être nécessaires pour les structures de soudure extrêmement grossières en acier comme celles créées par le processus de soudage sous laitier électrolytique est affinée grâce à ce traitement qui réduit les contraintes après soudage et élimine les zones dures dans la zone thermiquement affectée.

d) Retrouver les propriétés d'origine : parfois les alliages à durcissement par précipitation, tels que les alliages d'aluminium pouvant être traités thermiquement, doivent subir un traitement thermique après soudage pour retrouver leurs propriétés d'origine. Bien qu'un traitement thermique en solution complète et un traitement de vieillissement artificiel permettent une meilleure récupération des propriétés après soudage, dans certains cas, seul un traitement de vieillissement est utilisé. Pour s'assurer qu'elles sont correctement respectées conformément aux exigences du mode opératoire de soudage et/ou du code, l'inspecteur de

soudage doit comprendre les exigences lorsque les opérations de soudage impliquent un préchauffage et/ou un traitement thermique après soudage. [11]

I.8.3 Propriétés mécaniques

- **Résistance mécanique**

En raison de la pression hydrostatique et du refroidissement rapide, les soudures sous l'eau ont généralement une résistance mécanique supérieure à celles réalisées à l'air libre.

- **Dureté**

Les soudures sous-marines ont tendance à être plus dures, ce qui peut les rendre plus fragiles.

- **Ténacité**

Il est possible de diminuer la durabilité des soudures sous-marines en raison de la microstructure complexe causée par les conditions de soudage extrêmes.

I.8.4 Propriétés électrochimiques « corrosion »

La corrosion d'un métal est la détérioration progressive du matériau causée par une réaction chimique et/ou électrochimique avec l'environnement. C'est un processus naturel qui convertit le métal en une forme chimique stable. Le fer retourne à sa forme d'oxyde de fer (minerais de fer) et le cuivre réagit avec les molécules contenant du soufre pour revenir à sa forme sulfure.

La majorité des métaux sont présents sous forme stable de composants dans la nature. Un atome de métal perd un ou plusieurs électrons de sa structure pour atteindre une forme stable avec moins d'énergie. Ces électrons se combineront avec l'oxygène, le soufre ou les chlorures présents dans l'environnement. Le métal s'oxyde lors de ce processus électrochimique. Il doit y avoir une différence de potentiel entre deux points pour que les électrons puissent se déplacer. Le degré de corrosivité d'un métal dépend des facteurs externes qui favorisent le transfert d'électrons (tels que la température, la pression, la friction, etc.).

Chapitre II :

MATERIAUX ET

METHODES

EXPERIMENTALES

Chapitre II :

MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

II. Introduction

Nous exposons dans ce chapitre le matériau utilisé, ainsi que les diverses méthodes et techniques expérimentales employées pour évaluer l'effet du courant de soudage sur les caractéristiques mécaniques du joint soudé, telles que la dureté, les observations au microscope optique et la résistance. De plus, nous exposons les différentes étapes lors de la préparation de nos échantillons, telles que le fraisage, le découpage, le traitement thermique et le polissage. Les tests et les outils d'analyse utilisés pour approfondir notre compréhension de l'impact du processus de soudage.

II.1 Matériaux utilisés

Le matériau utilisé est de l'acier S460N faiblement allié à haute résistance, et à haute limite d'élasticité.

S : Acier de construction

460 : Limite d'élasticité en MPA

N : Acier normalisé.

Composition chimique de l'acier S460N	Élément d'alliage	Pourcentage [%]
	C	0.16
	Si	0.53
	Mn	1.6
	P	0.030max
	S	0.025max
	Mo	0.03
	Ti	0.05max
	Ceq	0.464

Tableau II.1 : composition chimique de l'acier S460N

II.2 Paramètre de soudage

Le joint de soudure a été obtenu selon les paramètres utilisés par les normes EN 10204, ils sont résumés dans le tableau suivant :

Réglage	1
Intensité	195
Courant	26
Q (KJ/mm)	0.62
Angle de soudage	60
Type de courant	AC

Tableau II.2 : paramètre de soudage des échantillons sous environnement marin

II.3 Présentation des échantillons

II.3.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques

Nous avons procédé au prélèvement d'un échantillon d'acier S460N, qui a été soudé dans des conditions immergées en milieu marin afin d'évaluer la résistance et la durabilité de l'acier dans des environnements marins agressifs. Cet échantillon présente des dimensions, mesurant 19 mm de largeur, 22 mm de longueur et une épaisseur de 13 mm.

II.3.1.1 Fraisage des échantillons

Cette étape consiste à utiliser une fraiseuse universelle pour réaliser un surfaçage précis de l'échantillon. L'objectif principal de cette opération est de corriger la surface de soudure afin d'obtenir une épaisseur uniforme de 11 mm.

II.3.1.2 Découpage d'échantillon

Après le surfaçage de l'échantillon d'acier S460N, nous envisageons de diviser la pièce en deux échantillons distincts. Cette division nous permettra d'effectuer un comparatif entre les effets des traitements thermiques sur les propriétés de l'acier.



Figure II.1 : découpeuse buehler abrasimet 2

II.3.1.3 Traitement thermique :

Les systèmes thermiques comprennent plusieurs opérations combinées de chauffage et de refroidissement visant à :

- D'améliorer les propriétés des matériaux et de les rendre plus adaptés à un usage spécifique, en effectuant les ajustements suivants :
 - La résistance à la rupture et la limite élastique augmentent. R_m , R_e , $A\%$ en améliorant la résistance de l'élément.
 - En augmentant la dureté, les pièces peuvent être plus résistantes à l'usure ou aux chocs.
- Pour régénérer un métal avec un grain grossier, il est nécessaire d'affiner les grains et d'homogénéiser la structure, comme c'est le cas pour les matériaux qui ont subi le forgeage.
- Éliminer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant qu'ils ne subissent une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

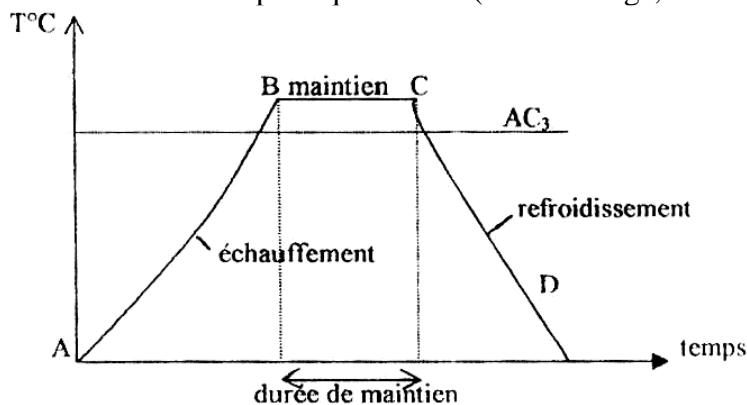


Figure II.2 : cycle des traitements thermiques

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation
- BC : Maintient à une température de 850°C.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
Assez rapide (dans l'huile).

Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température de 850 °c. Il est essentiel de procéder au chauffage rapidement afin d'obtenir une consommation d'énergie réduite et une productivité élevée. Pour cela, on a employé un four électrique Afin d'atteindre la température prévue en 3 heures.

Type de fours utilisé

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci.

Dans notre situation, nous avons placé notre pièce dans le four qui a déjà atteint la température requise (850 °C) pendant 3 heures pour effectuer le traitement thermique nécessaire.



Figure II.3 : four électrique

Refroidissement des pièces

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée. Pour ce là, le refroidissement s'effectue dans un bac utilisant l'huile pendant quelques heures.

II.3.1.4 Polissage

Après avoir découpé et rectifié les deux échantillons d'acier S460N, nous procédons à une étape de polissage. Cette opération vise à rendre la surface des échantillons parfaitement plane et brillante, presque miroir, ce qui est essentiel pour garantir des mesures précises lors des tests. Le processus de polissage comprend l'utilisation de plusieurs papiers abrasifs de différentes granulométries, allant du plus dur au plus doux, dans une séquence soigneusement planifiée. Nous commençons par un papier abrasif de granulométrie 200, puis progressons graduellement jusqu'à atteindre une granulométrie de 2000. Cette progression assure un polissage progressif et uniforme de la surface, éliminant les irrégularités et les imperfections pour obtenir une finition impeccable.



Figure II.4 : polisseuse sous jet d'eau

II.4 Observation Métallographique

II.4.1 Observations au microscope optique

L'étude de l'acier S460N et de son joint de soudure a été réalisée en utilisant un microscope optique de type Zeiss AxioLab avec une méthode d'observation assistée par caméra pour une visualisation précise du joint de soudure de l'échantillon. Le Nital a été appliqué sur les surfaces polies des échantillons. Ce dernier est un mélange d'acide nitrique et d'alcool éthylique, utilisé couramment dans la métallographie pour révéler la microstructure des aciers.

L'observation microscopique permet une analyse approfondie de la structure métallurgique de l'acier, offrant des informations sur sa composition, sa qualité de soudure et ses imperfections.



Figure II.5 : microscope optique

II.5 Caractérisation mécanique

II.5.1 Essais de dureté

L'essai de dureté est aujourd'hui l'une des méthodes d'essais des matériaux mécaniques les plus utilisées, notamment pour les aciers.

Cette méthode d'essai permet, d'une part, d'établir des relations qualitatives avec d'autres propriétés des matériaux (par exemple, la résistance, la rigidité, la densité) ou avec le comportement des matériaux sous certaines contraintes (par exemple, la résistance à l'usure).

D'autre part, l'essai de dureté est un procédé relativement simple et rapide à mettre en œuvre, qui est peu destructif, c'est-à-dire qu'il ne laisse que de petites blessures superficielles à la surface de l'éprouvette. [12]

Dans notre étude nous avons effectué nos tests sur un équipement de référence type Rockwell : Innovatest Falcon 400G2, qui est la deuxième génération d'une gamme essentielle de duromètres Micro Vickers / Vickers / Brinell. Il combine les méthodes traditionnelles d'essais de dureté avec les dernières innovations technologique et une conformité aux normes DIN EN ISO ASTM et JIS en vigueur tout en offrant un confort d'utilisation maximal.



Figure II.6 : machine d'essai dureté Innovatest Falcon 400g2

II.6 Essai de résilience (Charpy)

L'essai de résilience est une méthode utilisée pour mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. Dans ce contexte, nous utilisons un appareillage spécifique appelé "mouton pendule" de la série JB-750S.

Cet équipement est doté d'un dispositif de serrage et de centrage des éprouvettes, ainsi que d'un cadran permettant de mesurer l'énergie en joules absorbée par l'éprouvette après sa rupture. Les éprouvettes utilisées ont des dimensions de 55x10x10mm avec une entaille en V à 45 degrés. L'énergie absorbée par l'éprouvette est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$W = P \times (h_0 - h_1)$$

Où :

P représente le poids du pendule.

h_0 est la hauteur initiale à laquelle le pendule est placé.

h_1 est la hauteur à laquelle le pendule remonte après la rupture de l'éprouvette.

La résilience, exprimée en joules par centimètre carré (J/cm^2), est calculée comme le rapport de l'énergie absorbée W à la section de l'éprouvette à l'endroit de la rupture. Ce paramètre est essentiel pour évaluer la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie en cas de chargement soudain, ce qui est critique pour la résistance aux chocs et aux impacts dans diverses applications industrielles.

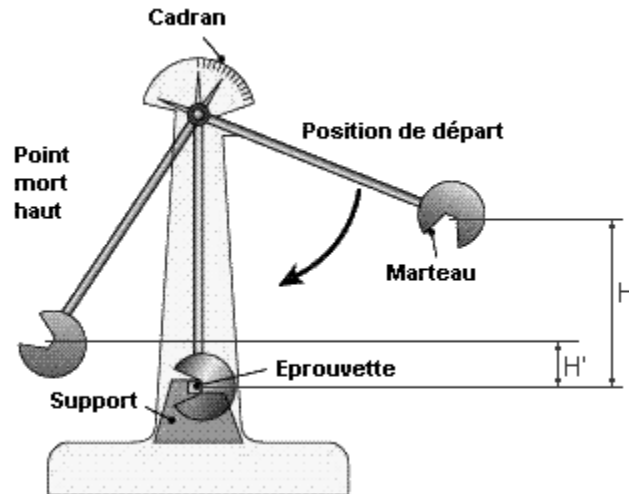


Figure II.7 : essai de Charpy

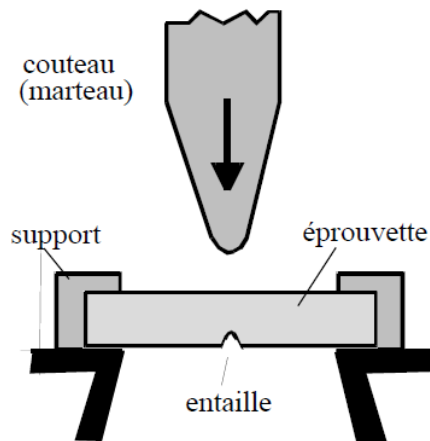


Figure II.8 : schéma de fonctionnement

Chapitre III :
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

Chapitre III :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre , nous allons exposer et discuter de tous les résultats obtenus lors de divers essais, après avoir procédé au polissage des deux échantillons d'acier S460N et à un traitement thermique à une température de 850 °C sur l'échantillon S2, nous avons effectué des tests mécaniques de dureté ainsi que des observations au microscope optique, des essais de rugosité et des tests DRX sur les deux échantillons S1(échantillon non traité) et S2(échantillon traité), dans deux emplacements différents pour chaque échantillon.

III.2 Résultat Fluorescence X(XRF)

III.2.1 Fluorescence X(XRF) S1 (non traite)

Voici un tableau de résultat de FRX obtenu par équipement **spectromètre xrf portable, Niton xl2 100g**, au niveau du centre PTAPC de Bejaia, il présente un tableau comparatif du joint de soudure et extrémité de l'échantillon s1 :

	Joint de soudure	Métal de base
Ti Titanium	10,52% +/-87,2 PPM	0
Mn Manganèse	0,09% +/-0,028PPM	1,55 % +/-205,9 PPM
Cu Copper	1105,1 PPM +/-127,2 PPM	1440,4 PPM +/-421,0PPM
Cr Chromium	781,4 PPM +/-65,7 PPM	789,8 PPM +/-205,9 PPM
Fe Iron	88,52% +/-0,610 PPM	98,20 % +/-87,2 PPM

Mo Molybdenum	264,9 PPM +/-21,5 PPM	288,5 PPM +/-67,9 PPM
C Carbone	1,02% +/-0,028PPM	1,19% +/-0,028PPM

Tableau III.1 : Résultat FRX S1

Les résultats de l'analyse chimique du joint de soudure indiquent une composition principalement constituée de fer à 88,52% avec une précision de $\pm 0,610$ PPM, une présence de carbone à 1,02% avec une précision de $\pm 0,028$ PPM, et une quantité de titane à 10,52% avec une précision de $\pm 87,2$ PPM. Ces résultats d'analyse chimique fournissent des indications importantes sur la composition du joint de soudure, Ce qui peut être essentiel pour comprendre ses propriétés et son comportement dans diverses conditions. Par exemple, la forte teneur en fer suggère une structure métallique dominante, Ce qui peut influencer la résistance mécanique et la conductivité thermique du matériau. La présence de carbone peut affecter la dureté ET la soudabilité du joint, tandis que le titane, s'il est ajouté délibérément comme élément d'alliage, peut améliorer la résistance à la corrosion et la ductilité. Des études ultérieures pourraient se concentrer sur des aspects tels que la microstructure du joint de soudure, les défauts potentiels, la résistance à la corrosion dans des environnements spécifiques, ET les propriétés mécaniques sous différentes contraintes.

III.2.2 Fluorescence X(XRF) S2 (traité)

	Joint de soudure	Métal de base
Ti Titanium	10,52% +/-87,2 PPM	850,1 PPM +/-89,8 PPM
Mn Manganèse	1,00% +/-0,025%	0,69% +/-0,034%
Ni Nickel	1254,0 PPM +/-155,7 PPM	0
Cu Copper	1010,6 PPM +/-120,4 PPM	1311,1 PPM +/-132,8 PPM
Pb Lead	151,8 PPM +/-31,4 PPM	153,4 PPM +/-32,9 PPM

Cr Chromium	693,0 PPM $\pm 63,2$ PPM	878,5 PPM $\pm 66,9$ PPM
Fe Iron	87,59% $\pm 0,610\%$	97,97% $\pm 0,605\%$
C Carbone	1,10% $\pm 21,2$ PPM	1,00% $\pm 63,2$ PPM

Tableau III.2 : Résultat FRX S2

L'analyse chimique du joint de soudure montre que le fer est principalement présent à 87,59 % avec une précision de $\pm 0,610$ PPM, le carbone est présent à 1,10 % avec une précision de $\pm 21,2$ PPM et le titane est présent à 10,52 % avec une précision de $\pm 87,2$ PPM. Ces conclusions de l'analyse chimique donnent des informations cruciales sur la composition du joint de soudure, ce qui peut être crucial pour appréhender ses caractéristiques et son comportement dans différentes situations. Par exemple, une présence élevée de fer indique une structure métallique prédominante, ce qui peut avoir un impact sur la résistance mécanique et la conductivité thermique du matériau. La présence de carbone peut avoir un impact sur la résistance et la soudabilité du joint, tandis que l'ajout intentionnel de titane en tant qu'élément d'alliage peut améliorer la résistance à la corrosion et la ductilité. Il est possible que des recherches futures se focalisent sur des éléments tels que la structure microstructurale du joint de soudure, les éventuelles imperfections, la résistance à la corrosion dans des environnements spécifiques, ainsi que les caractéristiques mécaniques sous diverses conditions.

III.3 Caractérisation structurale par diffraction de rayon X

III.3.1 Caractérisation structurale de l'acier de base S460N

La figure suivante présente quatre spectres au rayon X, métal de base obtenue avec réglage **S1** (non traité) et Métal de base spectre joint obtenue avec réglage **S2** (traité).

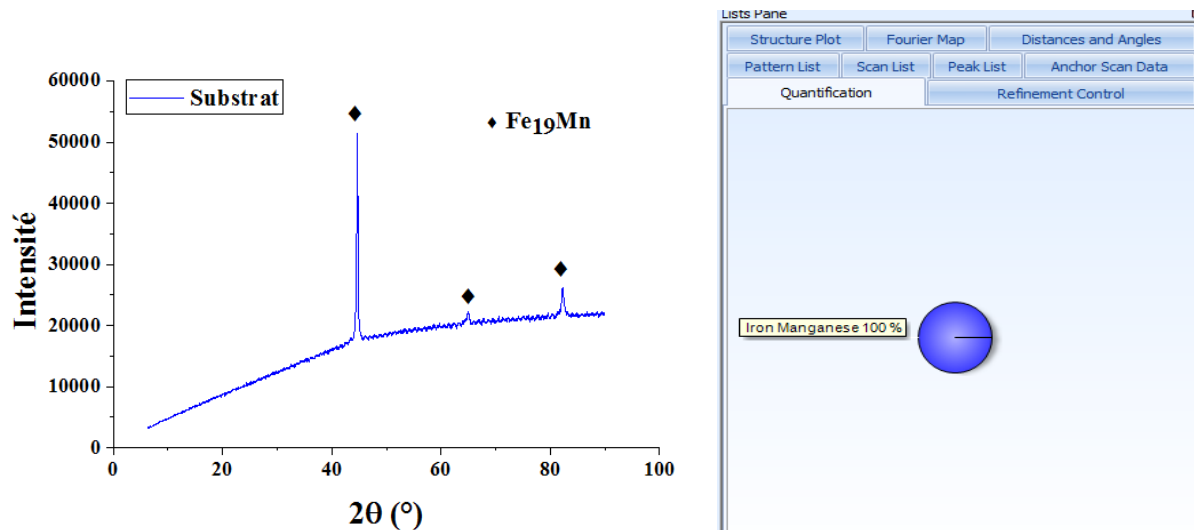


Figure III.1 : DRX S1 (substrat) et quantifications des phases

Le spectre DRX (Diffraction des Rayons X) révélant des pics à des angles caractéristiques de 41.2°, 62° et 85° indique la présence de certains composants cristallins dans l'échantillon S1. Ces angles correspondent généralement aux plans de diffraction des cristaux présents dans le matériau analysé. Étant donné que l'échantillon S1 est composé principalement de Fe₁₉Mn à 100%, les pics observés peuvent être attribués à cette phase majoritaire. La présence de pics nets et bien définis suggère une structure cristalline bien ordonnée, ce qui est cohérent avec la nature métallique du matériau. La phase Fe₁₉Mn est une phase de structure cristalline précise, connue pour ses propriétés de résistance mécanique et de ténacité.

III.3.2 Caractérisation structurale de S1 (zone soudée) :

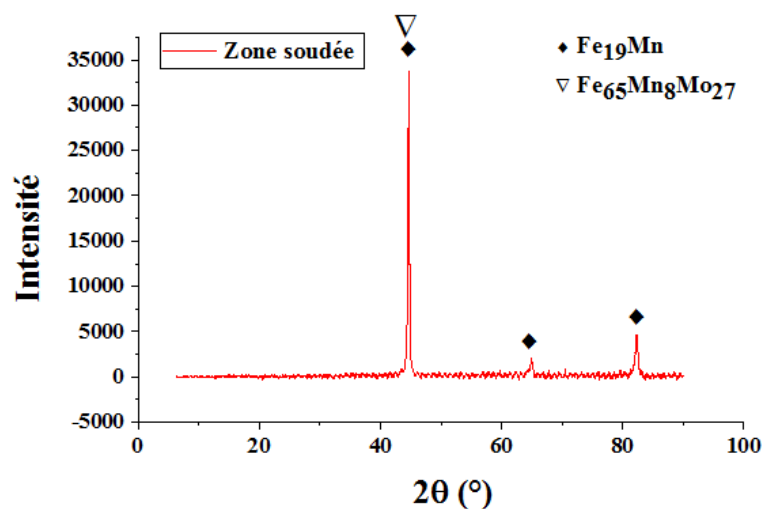


Figure III.2 : DRX S1 (zone soudée)

Le spectre DRX (Diffraction des Rayons X) révélant des pics à des angles caractéristiques de 43° , 45° et 82° indique la présence de certains composants cristallins dans l'échantillon S1 dans la zone soudée. Ces angles correspondent généralement aux plans de diffraction des cristaux présents dans le matériau analysé. Étant donné que l'échantillon S1 est composé principalement de Fe65Mn8Mo27 et Fe19Mn, la présence de ces deux phases dans la zone soudée peut indiquer que la composition chimique de l'acier S460N a été modifiée localement par la chaleur et les conditions de soudage. La formation de ces phases peut être due à des interactions entre les éléments d'alliage (Fer, Manganèse, Molybdène) à haute température, typique des zones soudées. Ce qui explique que la phase Fe19Mn est une phase de structure cristalline précise, connue pour ses propriétés de résistance mécanique et de ténacité. Et la phase Fe65Mn8Mo27 indique que la région soudée a probablement subi des transformations favorisant la formation d'une phase enrichie en molybdène et manganèse. Cette phase apporterait une grande dureté et résistance à l'usure à la zone soudée.

III.3.3 Caractérisation structurale de S2 (substrat) :

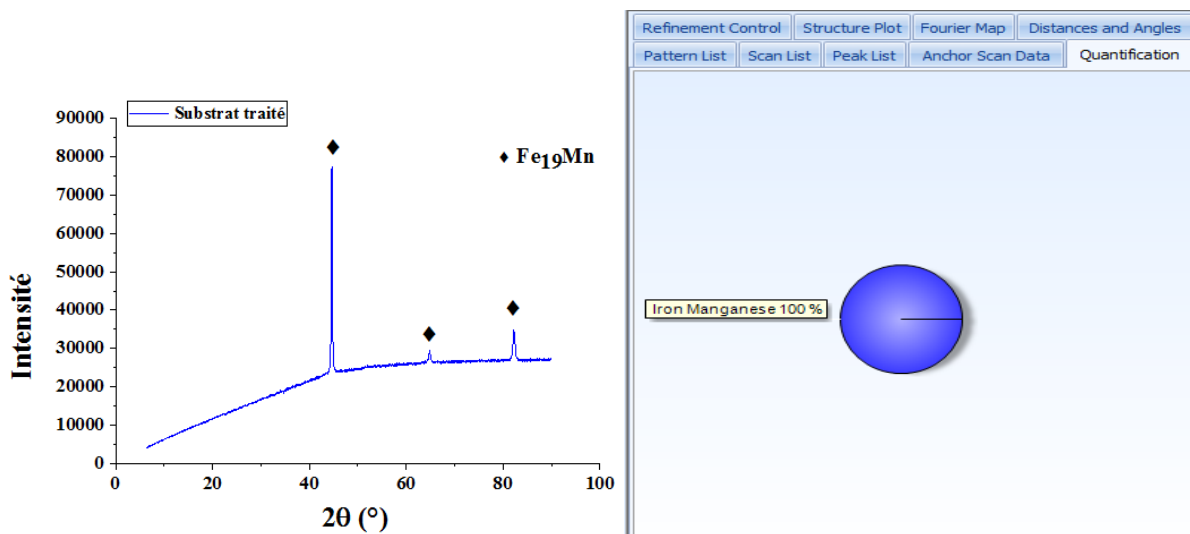


Figure III.3 : DRX S2 (substrat) et quantifications des phases

Les pics à des angles caractéristiques de 43° , 65° et 82° dans le spectre DRX (Diffraction des Rayons X) révèlent la présence de certains composants cristallins dans l'échantillon S2. Dans la plupart des cas, ces angles sont les plans de diffraction des cristaux présents dans le matériau étudié. L'échantillon S2 est principalement constitué de Fe19Mn à 100%, ce qui permet d'attribuer les pics observés à cette phase dominante. Une structure cristalline bien organisée est suggérée par la présence de pics nets et bien définis, ce qui est en accord avec la nature

métallique du matériau. La phase Fe_{19}Mn est une phase cristalline spécifique, réputée pour sa résistance mécanique et sa durabilité.

III.3.4 Caractérisation structurale de S2 (zone soudée) :

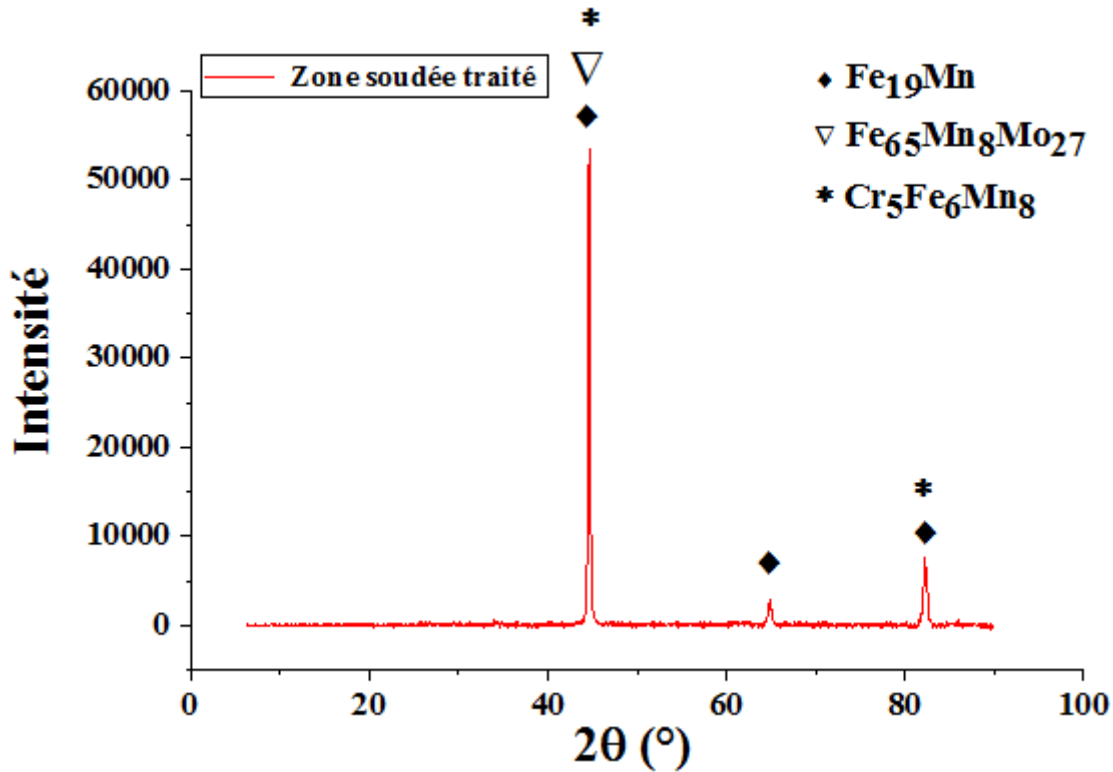


Figure III.4 : DRX S2 (zone soudée)

D'après le schéma de diffraction de rayon X de la zone soudée S460N pour l'échantillon S2, on constate une modification du résultat microstructural, avec la présence de deux phases déjà présentes dans la même zone de l'échantillon S1, à savoir Fe_{19}Mn , qui est la phase principale. Tant dis que la deuxième phase c'est le $\text{Fe}_{65}\text{Mn}_8\text{Mo}_{27}$ avec un pourcentage considérable. Et l'émergence d'une phase $\text{Cr}_5\text{Fe}_6\text{Mn}_8$ qui représente une petite phase. De plus, la microstructure du revêtement a connu une augmentation de l'intensité.

III.4 Image microscopiques

III.4.1 Image microscopiques S1

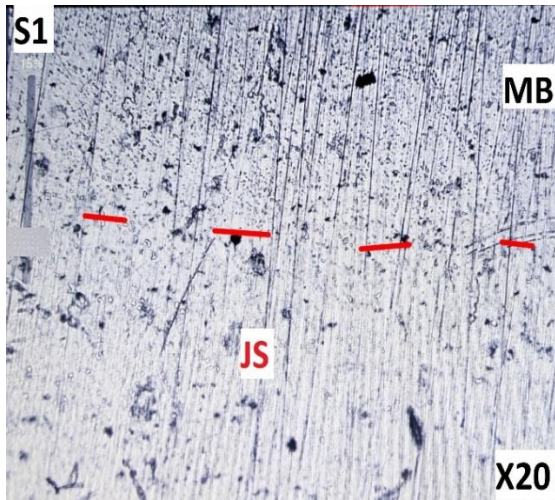


Figure III.5 : joint de soudure S1

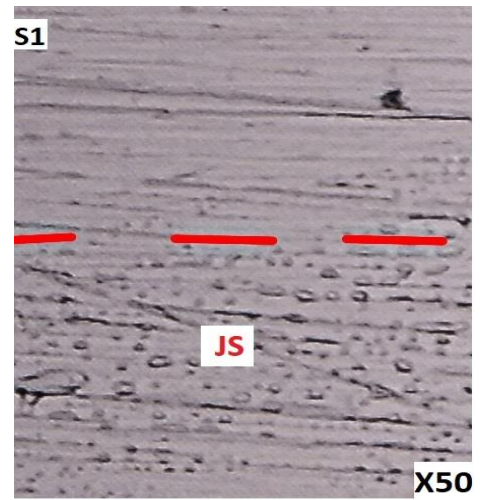


Figure III.6 : joint de soudure S1

III.4.2 Observation S1

Après le polissage et l'attaque chimique nous avons vu l'échantillon **S1** acier **S460N** à différentes grossissement microscopique **X20**, **X50** à voir le joint de soudure.

La figure III.5 dans cette structure, on peut observer deux zones plus nettes obtenue par le **MO** avec un grossissement **X20**, ainsi que la formation de porosité dans les zones de **MB**. La figure III.6 montre la microstructure de joint de soudure avec un grossissement **X50**, l'observation du joint de soudure nous montre la présence de gros grains dans la zone **JS** par rapport au métal de base et montre bien la liaison entre les deux zones, et met en évidence la différence de morphologie granulaire entre les deux zones.

III.4.3 Image microscopiques S2

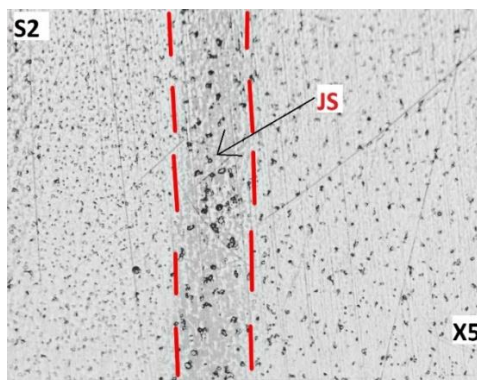


Figure III.7 : joint de soudure S2

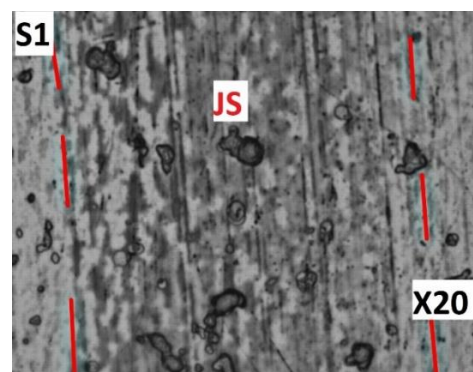


Figure III.8 : joint de soudure S2

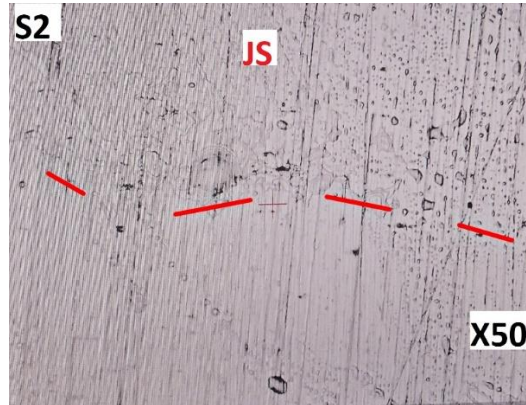


Figure III.9 : joint de soudure S2

III.4.4 Observation S2

La microstructure de la liaison entre les deux zones **MB** et **JS** est illustrée dans la figure III.7, avec un grossissement **X5**. On observe la présence de grains plus fins. La microstructure obtenue par **MO** de joint de soudeur est illustrée dans la figure III.8. On peut observer clairement les trois zones **ZAT**, **JS** et **MB** avec un grossissement **X20**. La zone de liaison entre **JS** et **MB** est clairement représentée dans la figure III.9, ce qui met en évidence la différence de morphologie granulaire entre les deux zones. On observe également une variété de tailles de gros grains dans les deux zones, avec un grossissement **X50**.

III.5 Les résultats de la dureté

III.5.1 Les résultats de la dureté S1

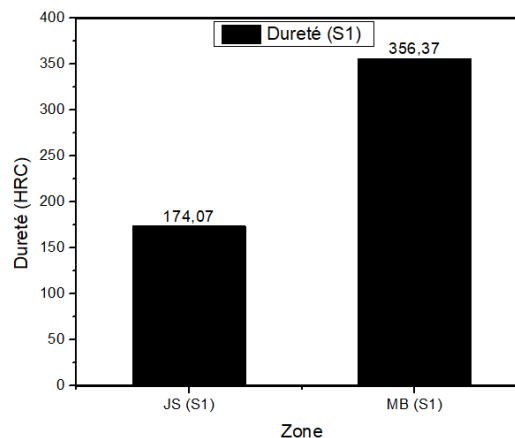


Figure III.10 : dureté HRC S1

La figure III.10 montre les duretés HRC des échantillons obtenus avec les paramètres S1, On remarque qu'il subsiste deux paliers :

- Le premier palier JS, on observe une dureté de valeur de 174.07 HRC, La dureté réduite dans la zone de soudure pourrait être due à des facteurs tels que la présence de microfissures, une solidification rapide, ou une composition chimique modifiée par le processus de soudage.
- La deuxième zone est celle qui représente la zone MB, on remarque une HRC moyenne de 356.37 HRC, ce qui est logique vu que matériel d'apport a été fusion dans le bain marin. Une dureté de 356,37 HRC indique que le métal de base possède une structure microcristalline qui n'a pas été altérée par le processus de soudage et qui conserve ses propriétés mécaniques optimales. Cette dureté élevée est attendue pour l'acier S460N, qui est conçu pour offrir une haute résistance et dureté.

III.5.2 Les résultats de la dureté S2

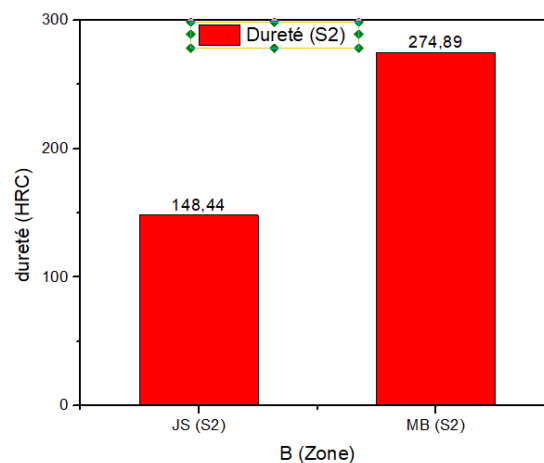


Figure III.11 : dureté HRC S2

Les duretés HRC des échantillons obtenus avec les paramètres S2 sont illustrées dans la figure III.11. On constate qu'il y a encore deux étapes :

- La zone initiale correspond à JS, elle est résumée avec une valeur de 148.44 HCR. Cette dureté suggère que le traitement thermique a eu un impact sur la microstructure de la zone soudée, potentiellement en réduisant les tensions internes ou en modifiant la structure cristalline. Comparée à la dureté initiale avant traitement (174,07 HRC), la dureté du joint de soudure a diminué après le traitement thermique, indiquant une possible recristallisation ou adoucissement.
- La seconde section de la MB. Il est observé une augmentation de la dureté de 148.44 HRC à 274.89 HCR. Cette valeur indique que le traitement thermique a également affecté la

microstructure du métal de base. Le métal de base montre une diminution de dureté, ce qui peut être dû à des changements dans la taille des grains ou à une réduction des dislocations.

III.5.3 Etude comparative

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

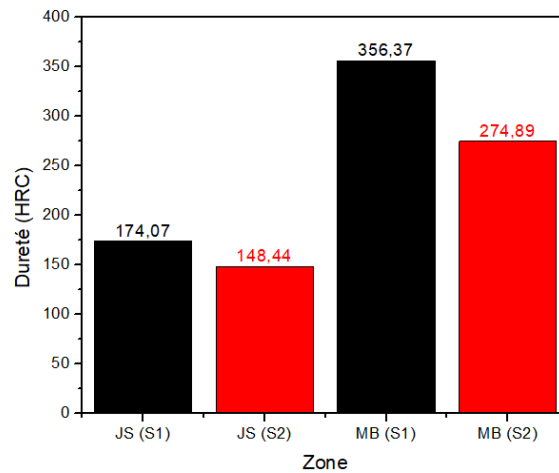


Figure III.12 : comparatif entre la dureté HRC S1 et S2

Les résultats de dureté HRC (Rockwell C) fournissent des indications précieuses sur les propriétés mécaniques du cordon de soudure, en particulier lorsqu'il est exposé à une atmosphère marine et à un traitement thermique subséquent. Initialement, la dureté du métal de base présentait une dureté de 356.37 HRC, ce qui était notablement plus élevé que le cordon de soudure, mesurée à 174.07 HRC. Cette différence peut être attribuée aux variations de composition chimique et de microstructure entre le cordon de soudure et le métal de base. Cependant, après le traitement thermique à 850°C, on observe une réduction significative de la dureté du cordon de soudure à 148 HRC, tandis que la dureté du métal de base diminue également à 274.89 HRC. Cette diminution de dureté peut être due à la relaxation des contraintes résiduelles et à la redistribution des phases dans le matériau après le traitement thermique. Dans une atmosphère marine, les composants du cordon de soudure sont souvent exposés à des conditions corrosives, ce qui peut également influencer les propriétés mécaniques.

III.6 Caractérisation mécanique

III.6.1 Profil de rugosité S1 (substrat)

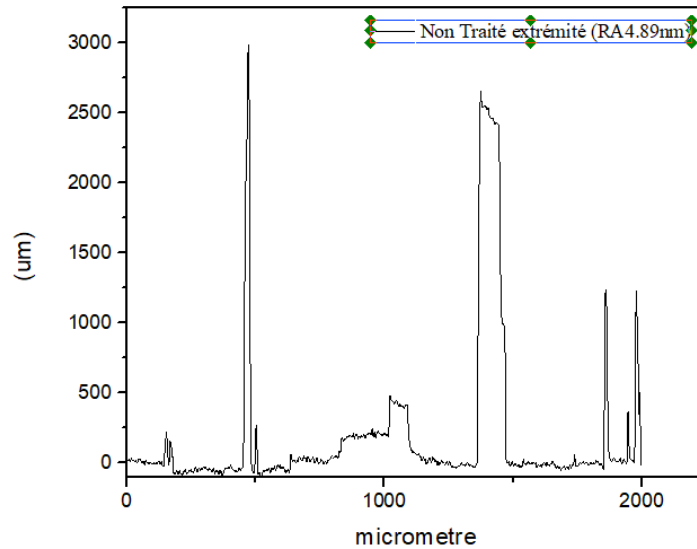


Figure III.13 : courbe de rugosité de S1 extrémité

Après avoir effectué le test de profilomètre sur l'appareil « Vicco Dektak 150 » sur l'échantillon S1 (non traité), on observe une légère stabilité de l'état de surface avec une valeur de $RA=4.89nm$.

III.6.2 Profil de rugosité S1 (zone soudée)

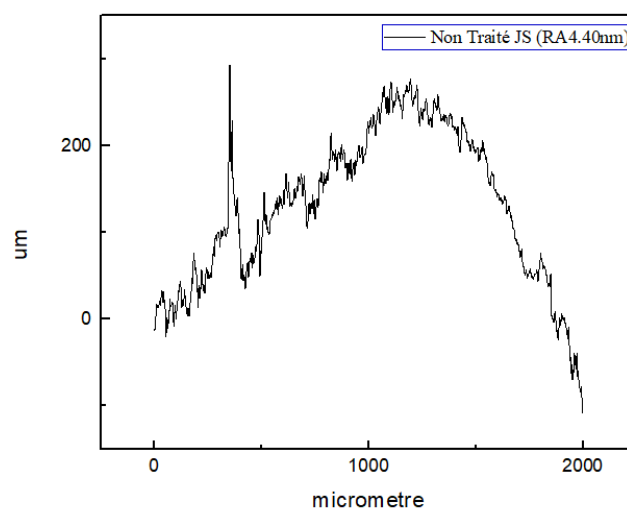


Figure III.14 : courbe de rugosité de S1 joint de soudure

Après avoir réalisé le même test sur la pièce S1, une valeur de Ra de $4,40nm$ a été observée. Il est possible de conclure que cette valeur a baissé par rapport à l'extrémité de la même pièce,

qui possède une valeur de Ra de 4,89nm. Cela s'explique par la réduction de la concentration de Mn, Cu, Cr et MO dans le joint de soudure, ce qui a directement affecté la rugosité de la surface. D'autre part, l'incorporation de Vanadium dans le joint de soudure provoque des changements de texture et des anomalies de surface. On à pas de vanadium PPM ça veut dire très petite quantité.

III.6.3 Profils de rugosité S2 (substrat)

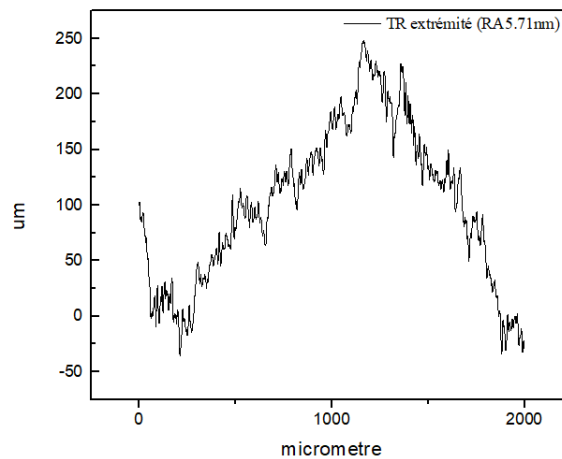


Figure III.15 : courbe de rugosité de S2 extrémité

Une fois le test effectué sur l'extrémité S2, on constate une valeur de Ra de 5,71nm. L'instabilité et l'augmentation sont remarquable par rapport à l'extrémité S1, dont la valeur de Ra=4.89nm est observée. Le traitement thermique a entraîné l'apparition de nouveaux composants tels que le Pb et le Vanadium, ce qui a directement affecté la rugosité de l'état de surface et sa stabilité.

III.6.4 Profil de rugosité S2 (zone soudée)

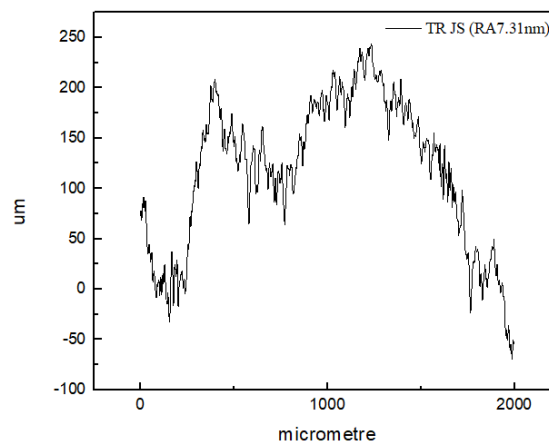


Figure III.16 : courbe de rugosité de S2 joint de soudure

Une fois que le test a été effectué sur l'échantillon S2 zone soudée, une valeur de Ra de 7.31nm est observée. Une légère instabilité et une hausse sont observées par rapport à l'échantillon S1 zone soudée, dont la valeur de Ra était de 4.40nm. Cette hausse est causée par l'émergence de nouveaux éléments tels que le plomb et le nickel en grande quantité. Lors de traitement thermique à 850 °C a entraîné la fusion des composants, ce qui a modifié la structure des matières et a affecté la résistance et la rugosité de surface. Cette évolution peut être expliquée par les interactions complexes entre ces éléments et leurs effets sur la microstructure du matériau.

III.7 Essai de résilience

III.7.1 Résultats des essais de résilience

Zone	Résilience (J/cm ²)
Métal de base sans soudure (MB)	190
Métal soudé non traité (S1)	121
Métal soudé traité thermique (S2)	162

Tableau III.3 : Résultat essai de résilience

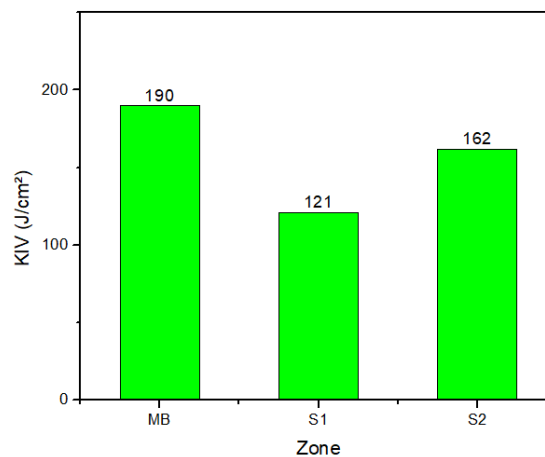


Figure III.17 : comparatif de résilience entre MB, S1 et S2

La valeur 190 J/cm² représente la résilience du métal de base sans aucune soudure ni traitement thermique. Cette résilience élevée indique que le métal de base a une bonne capacité à absorber l'énergie d'impact, ce qui signifie qu'il est relativement tenace et résistant aux chocs.

Après soudage, mais sans traitement thermique, la résilience est mesurée à 121 J/cm². Cette diminution de résilience par rapport au métal de base sans soudure (190 J/cm²) indique que le soudage a affaibli la capacité du matériau à absorber l'énergie d'impact. Cela peut être dû à des défauts introduits par le processus de soudage, comme des microfissures ou des zones de fragilité.

Après un traitement thermique à 850 degrés, la résilience du métal soudé est mesurée à 162 J/cm². Cette augmentation par rapport au métal soudé non traité (121 J/cm²) montre que le traitement thermique a amélioré la capacité du matériau à absorber l'énergie d'impact. Le traitement thermique peut avoir réduit les défauts microstructuraux et les contraintes résiduelles introduites par le soudage, améliorant ainsi la résilience.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré de manière exhaustive la caractérisation des joints de soudure obtenus sous atmosphère humide. Les divers aspects étudiés comprennent la composition chimique, la structure microstructurale, les propriétés mécaniques et la rugosité de surface.

- **Analyses par Fluorescence X (XRF) :** Ces analyses ont montré des différences significatives dans la composition des joints de soudure par rapport aux métaux de base, avec des variations notables en titane, manganèse, cuivre, fer, molybdène et carbone. Ces différences influencent directement les propriétés mécaniques des soudures.
- **Diffraction des Rayons X (DRX) :** Les résultats ont révélé des phases cristallines spécifiques dans les zones soudées et non soudées. Par exemple, la phase Fe₁₉Mn est dominante dans les substrats non traités, tandis que des phases comme Fe₆₅Mn₈Mo₂₇ et Cr₅Fe₆Mn₈ apparaissent dans les zones soudées, indiquant une modification microstructurale due au soudage.
- **Observations Microscopiques :** Ces observations ont identifié des variations dans la taille et la morphologie des grains entre les zones soudées et non soudées, avec une présence notable de porosité dans les zones soudées. Ces variations sont cruciales pour comprendre la liaison entre les différentes zones et l'intégrité des soudures.
- **Essai de Dureté :** Les résultats ont montré que les zones soudées ont une dureté inférieure à celle des métaux de base, suggérant des modifications microstructurales et la présence de microfissures. Cependant, un traitement thermique à 850°C a amélioré la dureté, soulignant l'importance des traitements post-soudage.
- **Profil de rugosité :** Les résultats profilométriques révèlent que l'échantillon traité présentent une rugosité de surface plus élevée et instable, Cette augmentation de la rugosité et de l'instabilité est due à l'apparition de nouveaux composants induits par le traitement thermique, qui modifient la structure et la résistance des matériaux.
- **Essai de Résilience :** Ces essais ont mis en évidence une diminution de la capacité d'absorption d'énergie des joints soudés par rapport aux métaux de base. Le traitement thermique a toutefois amélioré cette propriété, suggérant son importance pour optimiser la résilience des soudures.

En conclusion, l'étude a fourni des insights précieux sur les défis et opportunités liés à la soudure sous atmosphère humide. Les variations de composition chimique, les modifications microstructurales et les propriétés mécaniques altérées nécessitent une attention particulière pour garantir la fiabilité des joints soudés. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'optimisation des paramètres de soudage et des traitements thermiques pour améliorer la qualité des soudures dans des environnements humides, ce qui serait bénéfique pour de nombreux secteurs industriels, notamment ceux exposés à des conditions maritimes.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Christophe, D.R. (2003). ROCDACIER SOUDAGE. Creusot.
- [2] Bergoug A. (2019). Contrôle Non Destructif des joints de soudure. (Mémoire de master, Université Badji Mokhtare, Annaba)
- [3] **A.Kechau**, Etude de soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage, Thèse de Doctorat Présentée par université de liège, France 2013
- [4] Smith, J. D. (2018). The Advancements in Underwater Welding Techniques (Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA).
- [5] Hal archive Étude expérimentale et numérique du soudage multipasse : application à un acier de construction navale Constant Ramard
- [6] **L. Devillers. D. Kaplan.** J-P. Jansen, simulation thermique des zones affectées par la chaleur en soudage multi passe des aciers de construction. Edition Sedom, 1987
- [7] **A. Kechau**, Etude de soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage, Thèse de Doctorat Présentée par université de liège, France 2013
- [8] **AMIRA MOHAMED EL AMINE ET MEDJOU DJ LYES.** Caractérisation mécanique d'un jointe de soudure obtenue par procédé TIG. 2020/2021.
- [9] **BENEDDEB Mostefa.** Étude les défauts de soudage des pipelines, mémoire fin d'étude master II université de Mohamed Khider Biskra, 2011 /2012
- [10] Documents (PDF) défauts de soudage des pipelines Yamani Institute of Technology.
- [11] Totten, G. E. (2013). Handbook of Metal Heat Treatment Processes. 2nd ed. New York, NY: ASM International.
- [12] Nguyen, T. H. (2017). Comparative Analysis of Hardness Testing Techniques in Industrial Applications (Mémoire de master, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC).

Résumé

Le but de cette recherche est de mettre en évidence le comportement mécanique et l'étude métallographique de deux échantillons d'acier S460N. Le sondage humide est effectué à l'aide d'un poste de type pulse 300, équipé d'une électrode rutil de barracuda (E42 21Ni RR 51). Nous avons divisé notre travail en trois chapitres : les principes généraux du soudage, les matériaux et les méthodes expérimentales, ainsi que les résultats et les discussions. Nous concluons par une synthèse globale.

Nous avons examiné les caractéristiques mécaniques du joint de soudure sur les deux échantillons, en mettant l'accent sur sa résistance et sa dureté.

On étudie l'évolution structurale des soudures ainsi que la zone affectée thermiquement (ZAT). Le type de soudage employé est le soudage sous atmosphère marine, et nous étudierons les caractéristiques du joint de soudure.

Abstract

The aim of this study is to highlight the mechanical behavior and the metallographic study of two samples of S460N steel. Wet probing is carried out using a pulse 300 type station, equipped with a barracuda rutil electrode (E42 21Ni RR 51).

We have divided our work into three chapters: general principles of welding, materials and experimental methods, as well as results and discussions. We will conclude with an overall summary.

We examined the mechanical characteristics of the solder joint on both samples, focusing on its strength and hardness.

We study the structural evolution of the welds as well as the heat affected zone (ZAT).

The type of welding used is marine atmosphere welding, and we will study the characteristics of the weld joint.

ملخص:

الهدف من هذا البحث هو توضيح السلوك الميكانيكي والتحليل المعدني لعينتين من الفولاذ S460N. يتم إجراء الفحص الرطب باستخدام محطة من النوع النبضي 300، مزودة بقطب كهربائي من الروتيل باراكودا (E42 21 Ni RR 51).

وقد قسمنا عملنا الى ثلاثة فصول، المبادئ العامة للحام، والمواد والطرق التجريبية، بالإضافة إلى النتائج والمناقشات وسنختتم بملخص عام.

في كلتا العينتين، قمنا بدراسة الخواص الميكانيكية لمفصل اللحام، مع التركيز على القوة والصلابة. تمت دراسة التطور الهيكلي للحامات والمنطقة المتأثرة بالحرارة (ZAT).

اللحام البحري هو نوع اللحام المستخدم وسننظر في خصائص وصلة اللحام.

Résumé

Le but de cette recherche est de mettre en évidence le comportement mécanique et l'étude métallographique de deux échantillons d'acier S460N. Le sondage humide est effectué à l'aide d'un poste de type pulse 300, équipé d'une électrode rutil de barracuda (E42 21Ni RR 51). Nous avons divisé notre travail en trois chapitres : les principes généraux du soudage, les matériaux et les méthodes expérimentales, ainsi que les résultats et les discussions. Nous concluons par une synthèse globale.

Nous avons examiné les caractéristiques mécaniques du joint de soudure sur les deux échantillons, en mettant l'accent sur sa résistance et sa dureté.

On étudie l'évolution structurale des soudures ainsi que la zone affectée thermiquement (ZAT). Le type de soudage employé est le soudage sous atmosphère marine, et nous étudierons les caractéristiques du joint de soudure.

Abstract

The aim of this study is to highlight the mechanical behavior and the metallographic study of two samples of S460N steel. Wet probing is carried out using a pulse 300 type station, equipped with a barracuda rutil electrode (E42 21Ni RR 51).

We have divided our work into three chapters: general principles of welding, materials and experimental methods, as well as results and discussions. We will conclude with an overall summary.

We examined the mechanical characteristics of the solder joint on both samples, focusing on its strength and hardness.

We study the structural evolution of the welds as well as the heat affected zone (ZAT).

The type of welding used is marine atmosphere welding, and we will study the characteristics of the weld joint.

ملخص:

الهدف من هذا البحث هو توضيح السلوك الميكانيكي والتحليل المعدني لعينتين من الفولاذ S460N. يتم إجراء الفحص الرطب باستخدام محطة من النوع النبضي 300، مزودة بقطب كهربائي من الروتيل باراكودا (E42 21 Ni RR 51).

وقد قسمنا عملنا الى ثلاثة فصول، المبادئ العامة للحام، والمواد والطرق التجريبية، بالإضافة إلى النتائج والمناقشات وسنختتم بملخص عام.

في كلتا العينتين، قمنا بدراسة الخواص الميكانيكية لمفصل اللحام، مع التركيز على القوة والصلابة.

تمت دراسة التطور الهيكلي للحامات والمنطقة المتأثرة بالحرارة (ZAT).

اللحام البحري هو نوع اللحام المستخدم وسننظر في خصائص وصلة اللحام.

