

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira - Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Présenté par :

MAHIDDINE Mohamed

MAZOUZ Yanis

Thème

Effet des traitements thermique sur un joint de soudure obtenue en atmosphère humide

Soutenu le 11-06-2025 devant le jury composé de :

Pr. BRADAI M.A	Président
Pr. YOUNES. R	Rapporteur
Pr. RABOUEHI .H	Examinateuse
Dr. BOUKLOUCHE. I	Invité

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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 : M. Zouyed

Prénom : Yannis

Matricule : 181833009165

Spécialité et/ou Option : Génie des Matériaux

Département: Génie Mécanique

Faculté: Science et Technologie

Année universitaire : 2024/2025

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

Intitulé: Effet des Traitement Thermique sur un.....
..... sint..... de..... son..... la..... ob..... en.....
..... atmo..... pha..... he..... de.....

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
08/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

..... Z

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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 : *Mahieddine*

Prénom : *Mohamed*

Matricule : *161633007430*

Spécialité et/ou Option : *Genie Des Matériaux*

Département : *Genie Mécanique*

Faculté : *Science et Technologie*

Année universitaire : *2024/2025*

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

Intitulé: *Effet des Traitements Thermiques sur
la résistance de sonde de substrat en
atmosphère humide*

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
08/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) *Lu et approuvé*

..... *[Signature]*

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciement

Remerciement

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude envers Dieu, qui nous a accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier chaleureusement notre promoteur, Monsieur YOUNES RASSIM, pour ses conseils avisés, sa disponibilité constante et son soutien indéfectible. Son accompagnement nous a permis de mener à bien cette recherche avec sérénité et confiance, Et également, on associe nos remerciements à Monsieur KHIMA Salim, Monsieur BOUKLOUCHE Issam, Monsieur HARA Hamza, Madame BOUDJIT Sara, Madame HIDOUCHÉ Malika pour tous leurs conseils, et de nous avoir guidé tout le long de cette étude.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent également aux membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de lire ce mémoire et d'y apporter, par leurs remarques et suggestions, l'éclairage de leur riche expérience et de leur savoir.

Nous remercions également l'ensemble du personnel du Hall de Technologie de l'université de Béjaia pour leur accueil et leur collaboration.

Sur un plan plus personnel, nous dédions ce mémoire à nos pères, à nos chères mères ainsi qu'à nos frères et sœurs, pour leur amour, leur patience et leur soutien tout au long de notre parcours.

Enfin, nous remercions du fond du cœur toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail, même si leur nom n'est pas cité ici. Merci à vous tous !

Dédicace

Dédicace

Nous souhaitons débuter ces dédicaces par une pensée toute particulière à nos parents.

À notre père et à notre mère, véritables richesses de nos vies, nous adressons notre profonde gratitude pour leur patience, leur amour et leur soutien constants. Merci à eux, du fond du cœur.

A nos frères et nos sœurs

A tous les enseignants

A tous nos amis

Toute la promotion de la deuxième année Master

Génie des Matériaux 2024/2025.

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale..... 1

Chapitre I : Aspect Théorique

1	Introduction.....	3
2	Les procédés de soudage.....	3
2.1	Définition.....	3
2.2	Propriétés	3
2.3	Terminologie	3
2.3.1	La soudure (soudage automatique) :	3
2.3.2	Le soudage homogène :.....	4
2.3.3	La brasure :.....	4
2.4	Avantages du soudage	5
2.5	Les procédés de soudage :	5
2.6	Classification des procédés de soudage.....	6
2.6.1	Soudage à l'électrode enrobée :	7
2.6.2	Soudage électrique à l'arc sous flux gazeux ou TIG (Tungsten Inert Gas) :	8
2.6.3	Procèdes de soudage semi-automatique MIG-MAG :	9
2.6.4	Soudage par points :	10
2.7	Structure et propriétés des soudures	12
3	Les soudages en atmosphère humide :	13
3.1	Historique :	13
3.2	Définition :.....	14
3.3	Technique et installation de soudage sous-marin :	14
3.4	Importance du soudage sous-marin dans les applications marines	15
3.5	Avantages de la soudure sous-marine :	15
3.6	Risques et inconvénient liés au soudage sous-marin :	16
4	Traitements thermiques des joints soudés :.....	16
4.1	Objectif des traitements thermiques appliqués aux soudures :.....	18
4.2	Effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et chimiques :.....	18
5	Relation microstructure-propriétés :	19
5.1	Transformation des phases dans les matériaux soudés.....	20
5.1.1	Transformations en ZAC lors du chauffage :	21

5.1.2	Transformations en ZAC lors du refroidissement :	22
5.2	Microstructure typique après soudage en atmosphère humide.....	23
5.2.1	Métal fondu solidifié (métal d'apport)	23
5.2.2	Zone Affectée Thermiquement (ZAT)	24
5.3	Corrélation entre les traitements thermiques et la performance des soudures.....	24
5.3.1	Rôle des traitements thermiques avant et après soudage	24
5.4	Applications pratiques	25
6	Les défauts de soudage	26
6.1	Les fissures	26
6.2	Les soufflures	27
6.3	Les inclusions	27
6.4	Retassures et criques de solidification :	28
6.5	Morsures et caniveaux :	29
6.6	Effondrements et trous.....	29
6.7	Débordements du cordon :.....	30
6.8	Défauts de pénétration.....	30
6.9	Défauts géométriques du cordon	31

Chapitre II : Matériaux Et Techniques Expérimentale

1	Introduction.....	32
2	Matériaux utilisés	32
2.1	Acier S460N :	32
2.2	Propriétés mécaniques :	32
2.3	Propriétés chimiques :	32
2.4	Soudabilité des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2 à -6	33
3	Procédé de soudage	33
3.1	Technique de soudage utilisé :	33
4	Partie pratique	35
4.1	Préparation des échantillons :	35
4.1.1	Découpage :	35
4.1.2	Usinage :	36
4.1.3	Traitement thermique :	36
4.1.4	Polissage :	37
5	Techniques de caractérisation des matériaux	38
5.1	Diffraction au rayons X (DRX) :	38
5.1.1	Définition :	38

5.2	Rugosité :	38
5.3	Observations au microscope optique :	39
6	Caractérisation mécanique	40
6.1	Essais de dureté	40
6.1.1	Buts et objectifs de l'assai de dureté :	40
6.2	Essai de résilience (Charpy)	41
6.3	La corrosion :	41
6.3.1	Technique de la masse perdue :	41
6.3.2	Manipulation de la technique de masse perdue :	41
6.3.3	Manipulation :	42

Chapitre III : Résultats Et Discussion

1	Introduction.....	44
2	Caractérisation structural et microstructurale.....	44
2.1	Caractérisation structural par DRX d'échantillon non traité thermiquement et traité thermiquement :	44
2.1.1	Résultats d'analyse par DRX d'échantillon non traité thermiquement :	44
2.1.2	Résultats d'analyse par DRX d'échantillon traité thermiquement à 600° C :	45
2.1.3	Comparaison entre l'échantillon traité et non traité :	46
2.2	Résultats rugosité :	46
2.2.1	Echantillon non traité :	46
2.2.2	Echantillon traité :	47
3	Caractérisation microstructurale obtenue par microscope électronique à balayage des échantillons non traite et traite thermiquement :	48
3.1	Echantillon non traité :	48
3.2	Echantillon traité :	48
4	Caractérisation mécanique	49
4.1	Résultats Micro-dureté :	49
4.1.1	Echantillon non traité thermiquement :	50
4.1.2	Echantillon traité thermiquement :	51
4.2	Résultats résilience :	52
4.3	Résultats du test d'immersion :	54
Conclusion Générale		58

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Aspect Théorique

Figure 1:Principe de soudage automatique	4
Figure I.2:Soudage homogène.....	4
Figure I.3:Soudage hétérogène.....	5
Figure I.4:Classification des procédés de soudage.....	6
Figure I.5: Procédé de soudage à électrode enrobée	7
Figure I.6: Procédé de soudage à l'arc sous flux gazeux	8
Figure I.7: Procédé de soudage à l'arc sous flux gazeux	10
Figure I.8: Procédé de soudage par point	11
Figure I.9: Distribution de la chaleur sur la pièce lors du soudage.....	12
Figure I.10: Aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur (schématique) et définition des paramètres θ_M , Δt (700, 800).....	13
Figure I.11: La zone affectée thermiquement après soudage	13
Figure I.12: Soudage à l'arc dans l'atmosphère humide	14
Figure I.13: Schéma illustrative du soudage à l'arc dans l'atmosphère humide.....	15
Figure I.14: Diagramme fer-carbone.....	16
Figure I.15:Transformation de phase dans les pièces soudées	20
Figure I.16: Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C.....	22
Figure I.17:Les différents types de fissure	27
Figure I.18: Les différents types de soufflures.....	27
Figure I.19: Les types d'inclusions	28
Figure I.20:Retassure	29
Figure I.21: Morsures et caniveaux	29
Figure I.22:Les types d'effondrements	30
Figure I.23:Débordement	30
Figure I.24: Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention	30
Figure I.25: Convexité et concavité	31
Figure I.26:Surépaisseur.....	31

Chapitre II : Matériaux Et Techniques Expérimentale

Figure II.1:Poste à souder pulse 300	34
--	----

Figure II.2:Découpage de l'éprouvette à l'aide d'une scie à métaux	35
Figure II.3: Usinage des pièces à la fraise.....	36
Figure II.4:Température du four réglé à 600°.....	37
Figure II.5:Premier échantillon mis dans le four.....	37
Figure II.6:Polisseuse avec lubrification à l'eau	37
Figure II.7:Diffractomètre monocristal Bruker AXS D8 Venture (2015)	38
Figure II.8:Profilomètre à palpage motorisé et colonne manuelle – PGS100.....	39
Figure II.9:Microscope optique DM-111	39
Figure II.10:Testeur de dureté micro-Vickers.....	40
Figure II.11:Schéma illustratif de l'essai Charpy	41
Figure II.12:Technique de la masse perdue	42

Chapitre III : Résultats Et Discussion

Figure III.1:Résultats DRX de l'échantillon non traité	44
Figure III.2:Résultats DRX de l'échantillon traité.....	45
Figure III.3: Résultat rugosité de l'échantillon non traité	47
Figure III.4: Résultat rugosité de l'échantillon traité	48
Figure III.5: Image obtenu avec MEB du joint de soudure de l'échantillon non traité.....	48
Figure III.6: Joint de soudure de l'échantillon traité thermiquement.....	49
Figure III.7:Le profil de dureté HV de l'échantillon non traité	50
Figure III.8:Le profil de dureté HV de l'échantillon traité à 600 °C	51
Figure III.9:Résultats du test de résilience des deux éprouvettes dans différentes températures	53
Figure III.10:La perte de masse en fonction du temps pour les deux échantillons (traité et non traité)	54
Figure III.11:Grossissement x10 se la surface du joint de soudure de l'échantillon non traité.	55
Figure III.12:Grossissement x50 se la surface du joint de soudure de l'échantillon non traité.	56
Figure III.11:Grossissement x10 se la surface du joint de soudure de l'échantillon traité.....	56
Figure III.12:Grossissement x50 se la surface du joint de soudure de l'échantillon traité.....	56

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Aspect Théorique

Tableau I.1:l'influence des phases microstructurales sur les propriétés mécaniques	19
Tableau I.2: L'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques	25
Tableau I.3:Les causes et les moyens de prévention des fissurations à chaud et à froid.....	26
Tableau I.4: Les types d'inclusion.....	28

Chapitre II : Matériaux Et Techniques Expérimentale

Tableau II.1 :Propriétés chimique du métal de base	32
Tableau II.2:Composition chimique électrode enrobée de type Barracuda (E42 2 1 Ni RR 51)	33
Tableau II.3:Paramètres de soudage des échantillons sous environnement marin	35

Chapitre III : Résultats Et Discussion

Tableau III.1: résultats de rugosité des deux échantillons	
Tableau III.2:Les valeurs de dureté HV (Vickers) des deux échantillons.....	49
Tableau III.3:Résultats du test de résilience des deux éprouvette dans différentes températures	51
Tableau III.4:Résultats du test d'immersion	54

Introduction générale

Introduction générale

Le domaine maritime occupe une place primordiale et joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs, tels que le transport, la construction et l'exploitation. Il englobe un large éventail d'activités, allant de la conception et de l'entretien jusqu'à l'exploitation des structures marines, comme les navires, les plateformes offshore, les sous-marins et les infrastructures portuaires. L'un des principaux défis de ce domaine réside dans l'assemblage des composants, qui doivent être spécialement conçus pour résister à des conditions extrêmes ainsi qu'à diverses contraintes environnementales et mécaniques.

Parmi les différentes méthodes d'assemblage utilisées dans l'industrie, le soudage tient une place centrale en raison de sa grande polyvalence et de son large éventail d'applications. Il est couramment employé dans des domaines aussi divers que l'aéronautique, le nucléaire, la construction navale, les structures offshore, entre autres. Le soudage consiste à unir de manière permanente deux ou plusieurs pièces, afin d'assurer la continuité de la structure, soit par la chaleur, soit par la pression, ou encore par une combinaison des deux. Cette opération peut être réalisée avec ou sans l'ajout d'un matériau d'apport, dont la température de fusion est généralement proche de celle du matériau de base.

Dans des conditions particulières, notamment en milieu marin, on a recours au soudage sous l'eau. Ce procédé est indispensable pour les interventions de maintenance ou de réparation sur des structures immergées, comme les coques de navires, les pipelines sous-marins ou les installations offshore. Le soudage sous l'eau présente des contraintes spécifiques liées à l'environnement aquatique, notamment la déformation de l'arc électrique, la formation rapide de défauts dans la soudure et les risques pour la sécurité des opérateurs. Il peut être réalisé en environnement sec (au moyen de chambres étanches) ou directement en milieu humide, ce qui nécessite des adaptations techniques précises tant au niveau des équipements que des paramètres de soudage.

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'entrainement 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.

Ce mémoire de master a pour objectif d'étudier les caractéristiques d'un joint soudé réalisé en atmosphère marine, à partir de deux échantillons en acier S460N, dont l'un a été soumis à un traitement thermique à 600 °C pendant deux heures, tandis que l'autre est conservé à l'état initiale.

Notre travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur le procédé de soudage, ses principes de base et son importance dans l'industrie.
- Le deuxième chapitre est consacré à la démarche expérimentale. Il décrit les matériaux utilisés, les moyens expérimentaux mis en œuvre ainsi que les techniques de caractérisation mécanique et microstructurale du joint soudé
- Le troisième chapitre porte sur l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux issus des différents tests réalisés, en lien avec la microstructure du joint soudé en acier S460N.
- Enfin on termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Approche Théorique

1 Introduction

Le soudage est un procédé industriel permettant d'assembler de manière permanente des pièces d'acier et de ses alliages. Il est largement utilisé dans divers secteurs tels que la construction, l'aéronautique, l'automobile et l'industrie. En plus de sa capacité à assembler des formes et des matériaux divers, le soudage offre beaucoup d'avantages en termes de rapidité, coûts d'exécution et de résistance mécanique par rapport à d'autres techniques d'assemblage, tels que le boulonnage ou le rivetage. Dans ce chapitre on va présenter les procédés du soudage ainsi que l'effet des traitements thermiques sur les joints de soudure [1].

2 Les procédés de soudage

2.1 Définition

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties d'un assemblage métallique, 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].

2.2 Propriétés

La soudabilité est une propriété qui caractérise les métaux d'être soudable et d'avoir la continuité de la matière entre les éléments assemblés, elle varie d'un métal à un autre en fonction :

- De la température de fusion du métal.
- Du comportement de la zone fondu pendant le soudage.
- D'où il faut bien choisir le procédé de soudage en fonction du métal à souder [2].

2.3 Terminologie

2.3.1 La soudure (soudage automatique) :

C'est un assemblage où les bords à unir perdent leurs contours d'origine, elle peut être effectuée :

Sans pression extérieur, les bords étant porté à la température de fusion et nécessitant l'introduction du métal d'apport.

Avec pression extérieur, à une température qui peut également atteindre la fusion [2].

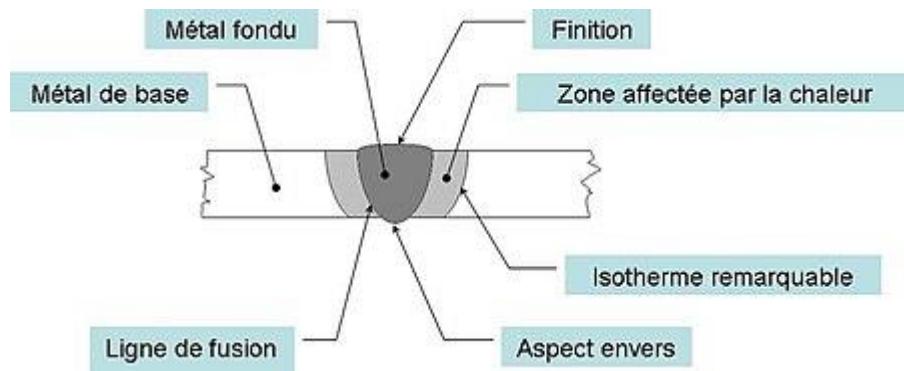


Figure I.1:Principe de soudage automatique

2.3.2 Le soudage homogène :

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 de soudure, considérée comme une opération de "fusion localisée" de deux pièces de même nature. Le métal de base s'intègre avec le métal d'apport (figure 1.2).

La température de soudage est donc nécessairement supérieure à la température de fusion des pièces à assembler [2].

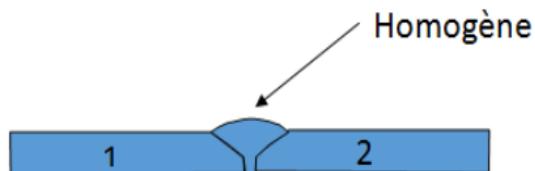


Figure I.2:Soudage homogène

2.3.3 La brasure :

Ou bien le soudage hétérogène, lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente (figure I.3). Dans ce procédé, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion et ne participent pas à la constitution du joint. Ce rôle est uniquement rempli par le métal d'apport, dont la température de fusion est plus basse et qui assure, en se solidifiant, une liaison métallique entre les surfaces à assembler [2].

Ce procédé permet l'assemblage d'élément de nature différente.

La structure des matériaux assemblés n'est pas transformée.

Les déformations sont moindres qu'en soudage.

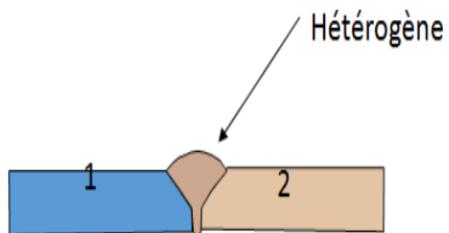


Figure I.3:Soudage hétérogène

2.4 Avantages du soudage

- Facilité de mise en œuvre.
- Meilleure propriétés mécaniques de l'assemblage.
- Il assure une continuité métallique de la pièce.
- Conférant des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé.
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques ...).
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée.
- Économie de matière et meilleure solution technique.

2.5 Les procédés de soudage :

Les procédés de soudage sont largement répandus dans le secteur de la fabrication métallique. Il est important de sélectionner le procédé de soudage adapté à chaque application, et sa bonne exécution, car elle a une influence décisive sur la qualité et le coût des assemblages soudés ou des composants fabriqués (Figure I.4).

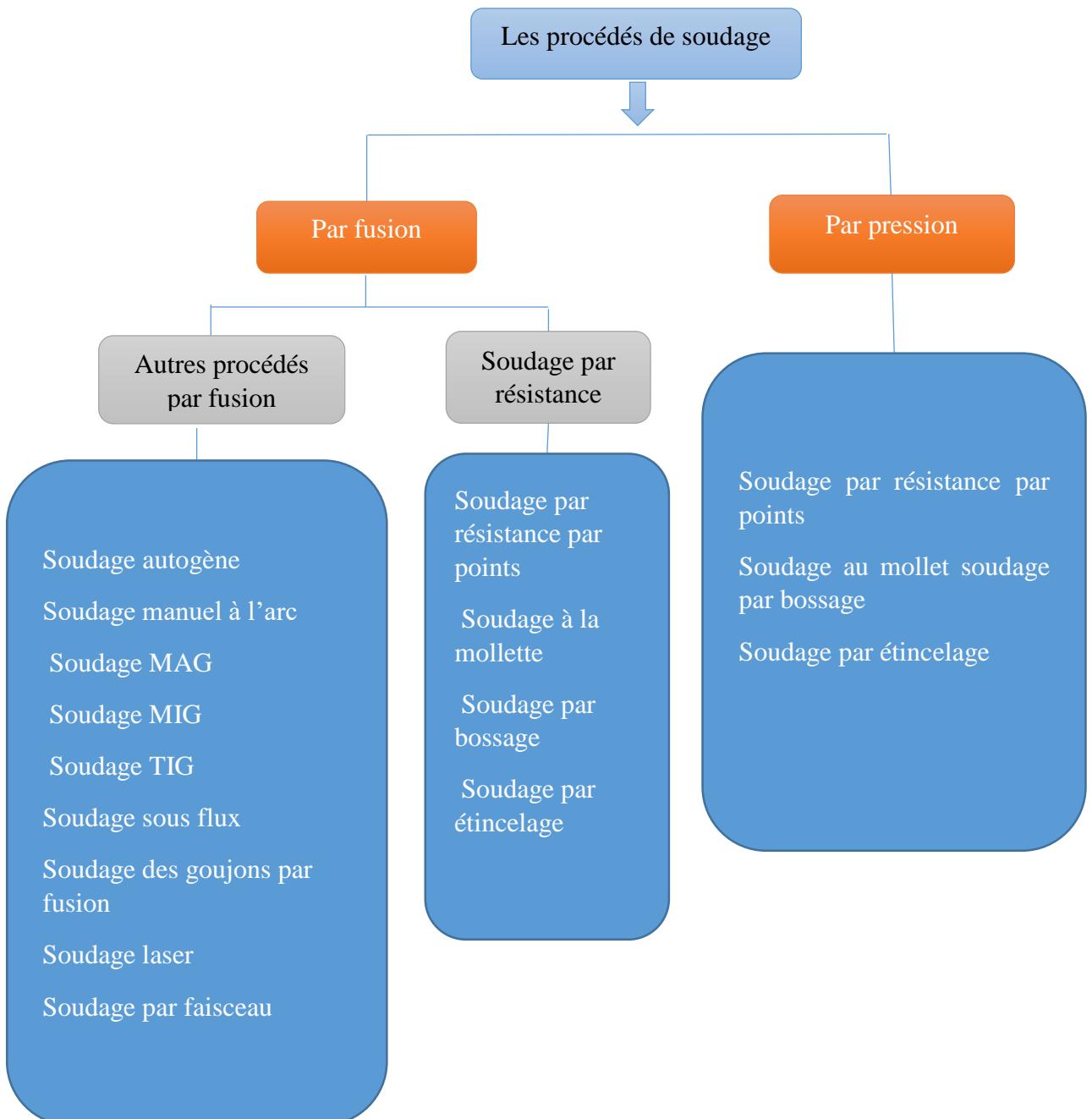


Figure I.4:Classification des procédés de soudage

2.6 Classification des 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. Quand on veut choisir un procédé de soudage, il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de facteurs, tels que le type de soudure à réaliser, la composition de l'acier, le coût comparé et d'autres éléments.

2.6.1 Soudage à l'électrode enrobée :

L'arc électrique est une étincelle obtenue par l'écartement de deux conducteurs sous tension en court-circuit, l'un est une baguette métallique appelé électrode enrobée et l'autre est la pièce à souder, chaque un des deux est relié à une des bornes de la source électrique. Produisant une chaleur qui s'élève à 4000°C nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder. Ce procédé est le plus utilisé avec les transformateurs en 220 V ou en 380 V (Figure I.5) [3].

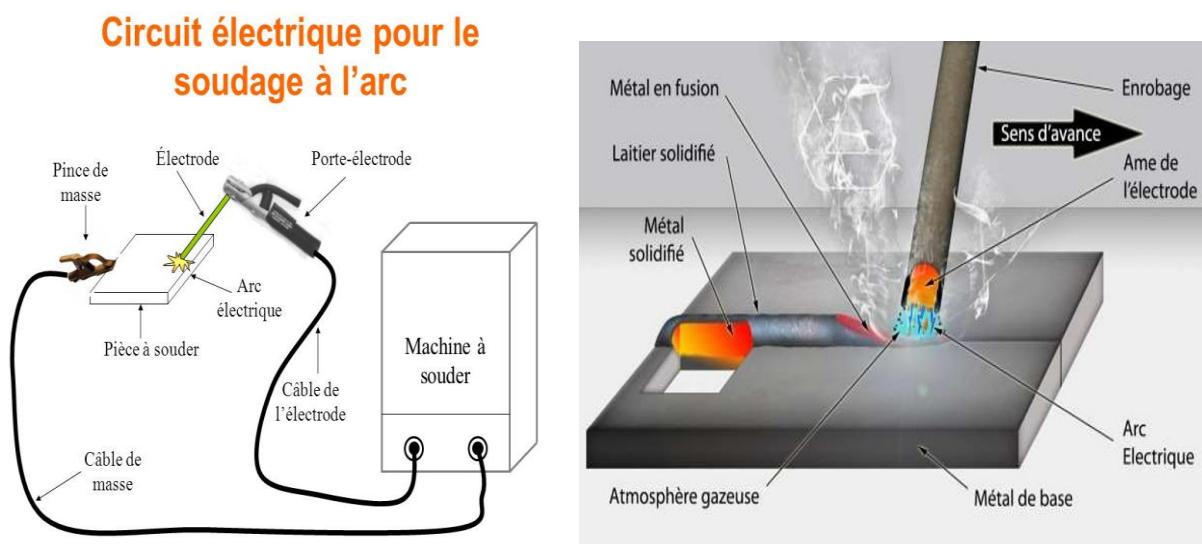


Figure I.5: Procédé de soudage à électrode enrobée

2.6.1.1 Avantages

- Soudure de bonne qualité.
- Procédé "économique".
- Résistance des soudures.

2.6.1.2 Inconvénients

- Aspect des soudures.
- Les électrodes doivent toujours être maintenues dans un état sec.
- Déformations des pièces soudées.

2.6.1.3 Applications

Le procédé de soudage SMAW (Shielded Metal Arc Welding) est très répandu, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons.

Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

2.6.2 Soudage électrique à l'arc sous flux gazeux ou TIG (Tungsten Inert Gas) :

Le procédé de soudage sous protection de gaz inerte avec électrode réfractaire de tungstène s'effectue avec une torche. Celle-ci comprend l'électrode de tungstène, maintenue sur un porte-électrode et placée à l'intérieur de la buse qui canalise le gaz de protection. L'arc électrique se forme entre l'électrode de tungstène et le métal de base (figure I.6) [2].

Ce procédé peut se réaliser sans métal d'apport (ex. pour le soudage de plaques minces) ou en utilisant des baguettes de métal d'apport. La torche permet de maintenir l'électrode en place, de canaliser le gaz de protection et d'assurer la continuité du courant pendant le soudage. Lorsqu'on travaille avec des courants élevés (150 A et plus), on utilise une torche refroidie par du liquide, et une torche refroidie au gaz pour des courants allant jusqu'à 150 A.

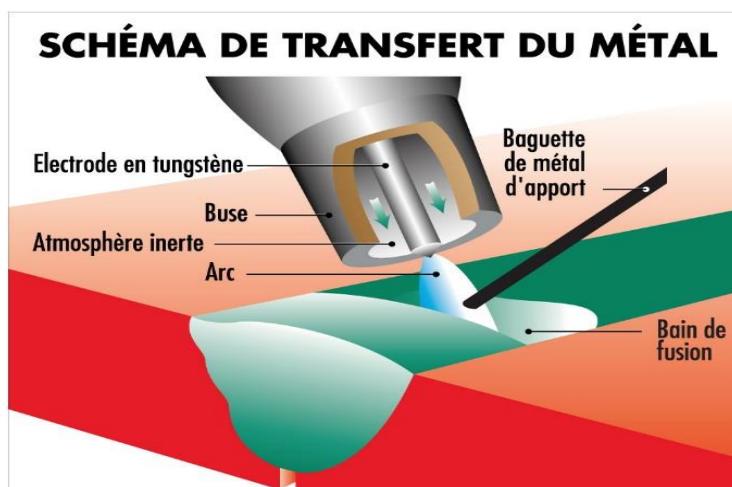


Figure I.6: Procédé de soudage à l'arc sous flux gazeux

2.6.2.1 Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG

- La vitesse de soudage (avance du soudeur)
- Le choix et le débit du gaz
- Le choix et le débit du métal d'apport
- Le choix, l'affûtage et le diamètre de l'électrode réfractaire
- La position de soudage
- La préparation
- La dimension et la nature des matériaux à souder

2.6.2.2 Applications de la soudure TIG

La réalisation d'ouvrages alimentaires

La chaudronnerie d'acier inoxydable

L'industrie aéronautique et spatiale

La carrosserie

Plus généralement, les entreprises travaillant des matériaux à bases d'acières inoxydables et d'alliages légers

2.6.2.3 Avantages de soudage TIG

Large gamme d'épaisseurs à souder

Simple d'emploi

Travail précis et esthétique

Peu de fumées

Soudage dans toutes les positions

Procédé automatisable

Faible vitesse de soudage

Apport important d'énergie

2.6.2.4 Inconvénients de soudage TIG

Équipement dispendieux

Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement

Déformations des pièces soudées

2.6.3 Procèdes de soudage semi-automatique MIG-MAG :

Un procédé de soudage par fusion au moyen d'un arc électrique amorcé et maintenu entre l'extrémité du fil électrode consommable et la pièce à souder, le bain de fusion est sous protection gazeuse. Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe ou un flux du fil lui-même assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage contre l'oxygène et l'azote de l'air (figure I.7).

- **Le procédé MIG (Métal inert gas)** : emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).
- **Le procédé MAG (Metal Active Gas)** : utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz (CO₂), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-CO₂) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O₂) [2].

SCHÉMA DE TRANSFERT DU MÉTAL

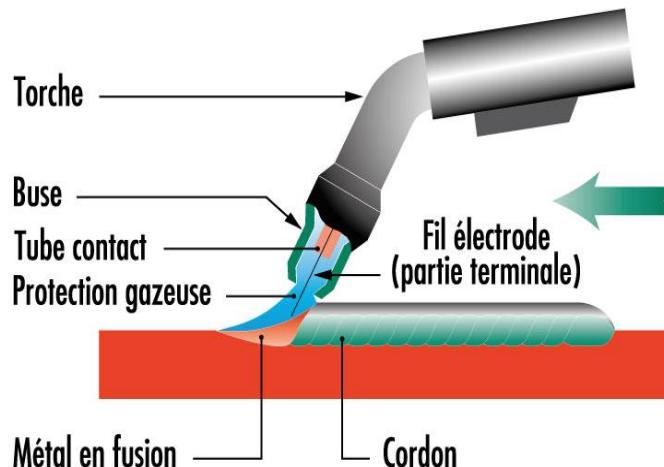


Figure I.7: Procédé de soudage à l'arc sous flux gazeux

2.6.3.1 Avantages et inconvénients

Le procédé de soudage GMAW (Gaz Metal Arc Welding) soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW (Gaz Tungsten Arc Welding) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés. Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé.

Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup [2].

2.6.4 Soudage par points :

Le soudage par points est un procédé d'assemblage discontinu, par recouvrement. Il s'applique à des assemblages en tôles d'aciers doux, allié, inoxydable, d'aluminium, etc. d'épaisseurs généralement comprises entre 0,5 et 10 mm.

Lors de l'opération de soudage par points, les deux pièces sont placées et maintenues dans leur position respective d'assemblage, puis introduites dans les bras de la machine.

L'action d'une pédale déclenche pour chacun des points à réaliser un cycle complet qui comprend les phases suivantes :

- **L'accostage** : les électrodes se rapprochent et viennent se serrer sur les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné ;
- **Le soudage** : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance Le forgeage ou maintien d'effort à la fin duquel les électrodes s'écartent et reviennent au repos [3].

Ces différentes phases, dont la durée totale reste de l'ordre de quelques secondes selon les épaisseurs, sont rigoureusement temporisées et se déroulent automatiquement.

Au coup par coup, la machine ne réalise qu'un cycle et il faut appuyer de nouveau sur la pédale pour en réaliser un autre

À la volée, la machine fonctionne d'une manière répétitive, chaque cycle étant séparé du précédent par un intervalle de temps ou temps mort qui permet à l'opérateur de déplacer la pièce à souder. Sa durée détermine ainsi la cadence de travail.

L'ensemble de ces phases est appelé cycle de soudage. Il existe de nombreuses formes de cycles appropriés aux matériaux à souder ou au niveau de qualité recherchée [3].

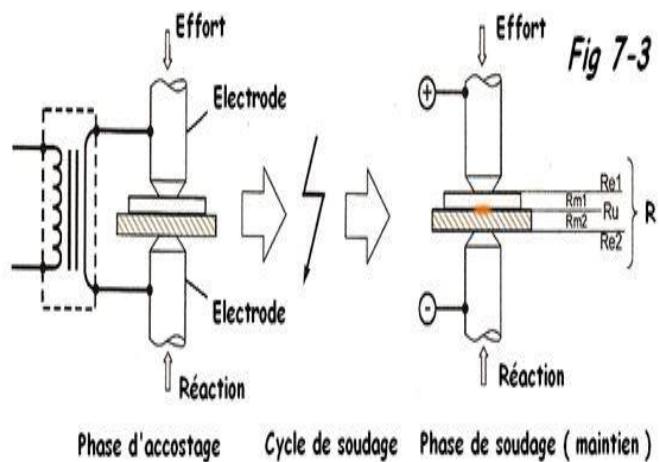


Figure I.8: procédé de soudage par point

2.7 Structure et propriétés des soudures

Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur se propage sur l'ensemble de la structure de la pièce soudée (figure I.9). Cette hausse de température affecte sur la structure de la pièce ou on peut considérer deux zones distinctes dans le joint soudé : la zone fondue et la zone affectée par la chaleur (ZAC), appelée aussi : zone affectée thermiquement (ZAT), (figure I.9) [6].

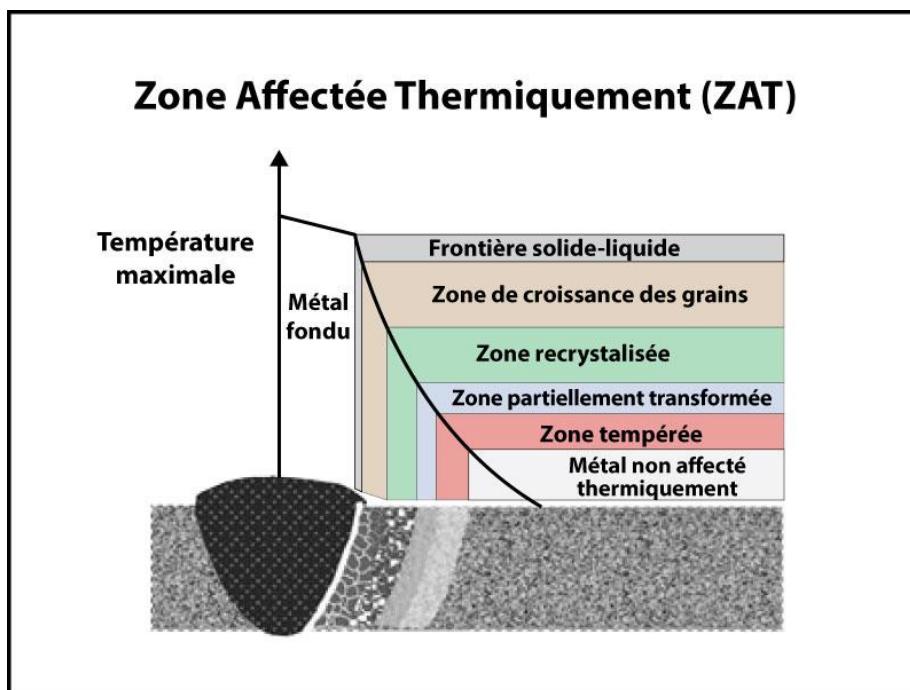


Figure I.9: Distribution de la chaleur sur la pièce lors du soudage

Le bain de fusion se refroidit et se solidifie, la plus grande partie de la chaleur s'écoule à travers le métal de base le long du joint. L'acier est alors soumis à des cycles d'élévation de température et de refroidissement analogues à ceux conférés par un traitement thermique.

Les phénomènes mis en jeu au cours du soudage correspondent à la variation de la température T en fonction du temps t . Ce cycle thermique est caractérisé par un chauffage rapide suivi d'un bref passage à très haute température puis par un refroidissement plus lent. Dans le cas des aciers cette courbe met en évidence trois grandeurs caractéristiques [3].

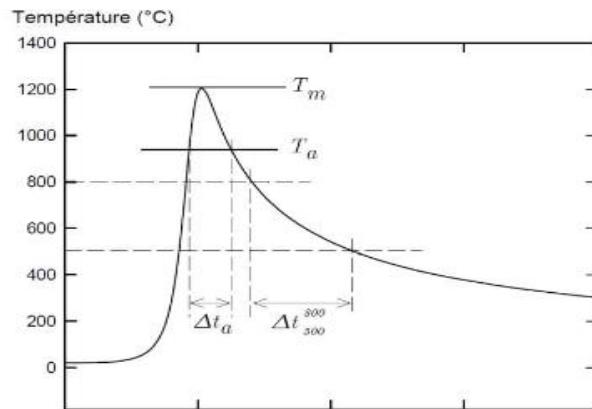


Figure I.10: Aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur (schématique) et définition des paramètres θM , Δt (700, 800)

- Une phase d'échauffement très rapide
- Un passage par une température maximale T_m .
- Une phase de refroidissement plus ou moins rapide...

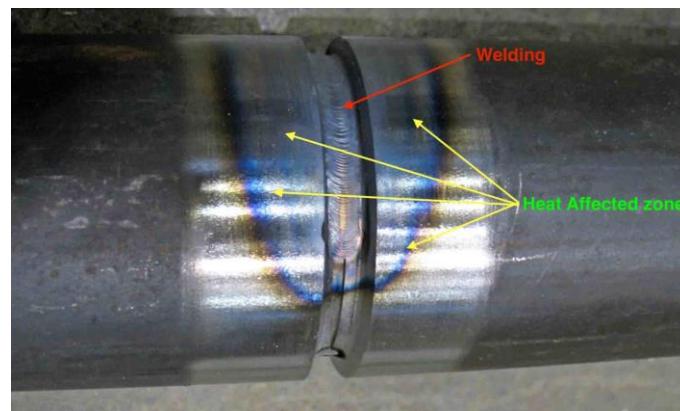


Figure I.11: La zone affectée thermiquement après soudage

3 Les soudages en atmosphère humide :

3.1 Historique :

Vers les années 1802, l'anglais Humphrey Davey a découvert qu'un arc électrique pouvait être maintenu sous eau, mais ce n'est que vers 1917 que les premiers travaux de soudure immergée furent réalisés par des plongeurs anglais pour l'étanchement de rivets sur les coques de navire. Ensuite, pendant près de 40 ans, cette technique ne fut qu'accessoirement mise en œuvre pour des travaux de réparation temporaire [4].

3.2 Définition :

Le soudage humide est une méthode de soudage sous-marine dans laquelle le soudeur soude directement sous l'eau au lieu de drainer artificiellement l'eau autour de la zone de soudage (figure I.12).

Ce type de procédé est de loin le plus facile et le plus économique à réaliser, mais actuellement, il est rarement utilisé à des profondeurs supérieures à 40 – 50 mètres. La plupart des soudures en pleine eau sont réalisées dans les travaux de maintenance et de réparation.

Pour le soudage sous eau, seul le courant continu est utilisé. Ceci est principalement dû à des raisons de sécurité mais également à cause du fait qu'il est beaucoup plus difficile à maintenir un arc stable avec du courant alternatif. [4]



Figure I.12: Soudage à l'arc dans l'atmosphère humide

3.3 Technique et installation de soudage sous-marin :

Soudage à l'arc métallique protégé (Shielded Metal Arc Welding, SMAW), couramment utilisé pour le soudage humide en raison de sa polyvalence et de sa simplicité.

Une installation pour le soudage en pleine eau se compose en général de l'équipement suivant (figure I.13) :

- Poste de soudage
- Câbles de soudage
- Porte-électrode
- Pince de masse

- Broches de connexion
- Coupe-circuit
- Verre teinté
- Accessoires
- Electrodes

Underwater Welding Diagram

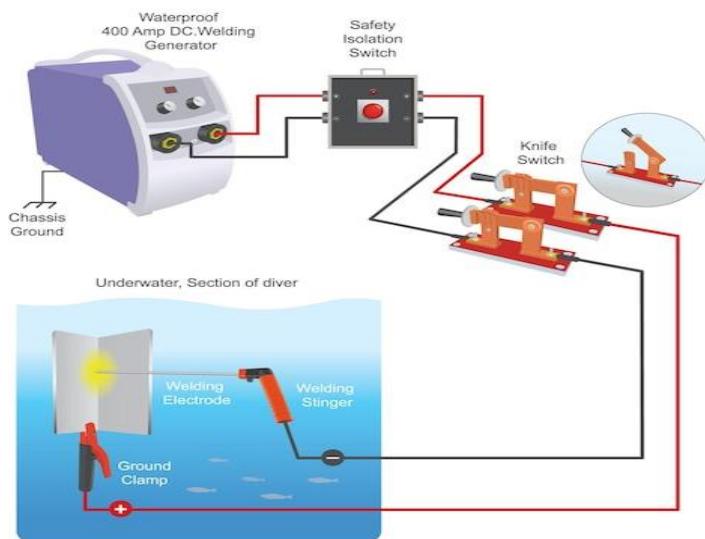


Figure I.13: Schéma illustrative du soudage à l'arc (SMAW) dans l'atmosphère humide

3.4 Importance du soudage sous-marin dans les applications marines

Dans la pratique, l'utilisation du soudage humide sous l'eau pour les réparations offshore a été limitée principalement en raison de la porosité et de la faible ténacité des soudures obtenues. Avec une conception appropriée des consommables, il est cependant possible de réduire les coûts de soudage, la porosité et d'améliorer la ténacité du métal soudé en affinant la microstructure. C'est pourquoi, le soudage dans les applications offshore et marines est un domaine de recherche important et nécessite une attention et une compréhension considérables [4].

3.5 Avantages de la soudure sous-marine :

L'un des principaux avantages de cette technique est le gain de temps lors des réparation et d'entretien dans les applications marine, il n'est pas nécessaire de démonter l'équipement pour effectuer l'opération de soudage.

3.6 Risques et inconvénient liés au soudage sous-marin :

La présence d'une pression plus élevée due à la hauteur d'eau sous laquelle le soudage a lieu, L'action réfrigérante de l'eau sur le métal soudé (qui peut modifier les structures et propriétés métallurgiques).

Il existe un risque de choc électrique pour le soudeur/plongeur. Les précautions à prendre sont les suivantes : l'isolation électrique adéquate du matériel de l'équipement de soudage, la coupure de l'alimentation électrique immédiatement après l'extinction de l'arc, et limiter la tension à vide des postes de soudage.

Deuxièmement, l'hydrogène et l'oxygène sont produits par l'arc lors du soudage par voie humide. Des précautions doivent être prises pour éviter l'accumulation de poches de gaz, qui sont potentiellement dangereuses pour la santé.

L'autre risque principal concerne la vie ou la santé du soudeur ou du plongeur, en raison de l'azote introduit dans le sang lors de l'exposition à l'air sous haute pression [4].

4 Traitement thermique des joints soudés :

Lors du soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base, caractérisé par la création d'une zone fondu dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différente de celles de métal de base (figure I.14).

Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable d'intervenir par un traitement thermique après soudage, pour but d'améliorer les propriétés jugées importantes vis à vis des conditions de service, ou d'élimination ou simplement la réduction des contraintes résiduelles [4].

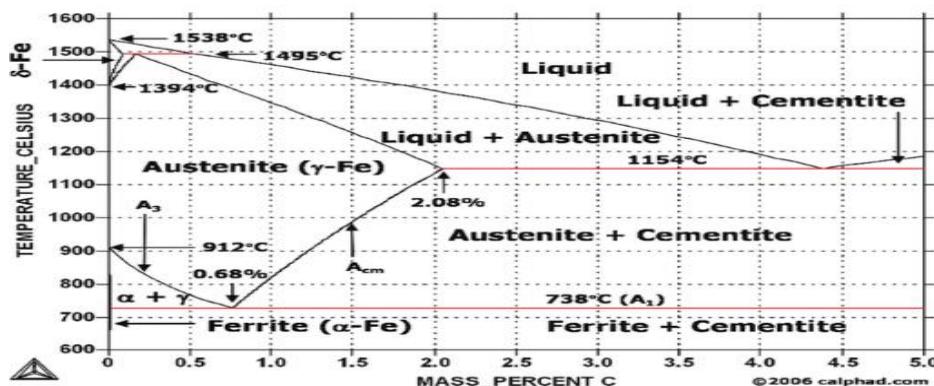


Figure I.14: diagramme fer-carbone

- **Traitements de relaxation (détente) :**

Le traitement thermique de relaxation, ou de détente, a pour objet d'atténuer les contraintes résiduelles présentes dans un ensemble soudé après son achèvement ou en cours du soudage. Ce traitement entraîne aussi un effet de revenu lorsque les soudures contiennent des constituants de trempe, dans la zone fondues comme dans la zone affectée thermiquement. Cependant, ce rôle métallurgique supplémentaire n'est pas toujours bénéfique, car des effets défavorables peuvent affecter les propriétés mécaniques ou en provoquant le phénomène de fissuration [5].

- **Traitements par recuit/normalisation :**

Un recuit ou une normalisation d'une soudure d'acier ont pour objet d'obtenir, au moyen d'un chauffage au-dessus du point A₃ (figure I.14), provoquant l'austénitisation complète de la zone de la pièce traitée, suivi d'un refroidissement relativement lent, une structure affinée constituée de ferrite et de perlite qui remplace la constitution et la structure de soudage. La normalisation, qui comporte un refroidissement moins lent que le recuit, produit une perlite dont l'espace interlamellaire est plus faible, donc plus dure. Pour certains aciers faiblement alliés. La normalisation peut provoquer une trempe du type bainitique et nécessite de ce fait, un traitement ultérieur de revenu [5].

Du point de vue de la mise en œuvre, le traitement global simultané est le plus complet car il affecte l'ensemble de la soudure, sans gradient de température. S'il s'agit d'un ensemble important et lourd, le traitement global peut poser des problèmes pratiques difficiles de déformation ou d'encombrement. On peut être amené à étayer les pièces pour éviter leur déformation et, pour les pièces trop importantes pour être normalisées en une seule fois, tel que les longues viroles, on procède à un traitement successif de chaque partie dans le four. [5]

- **Traitements inter-critique :**

On qualifie d'inter-critique un traitement pratiqué à une température située entre les points A₁ et A₃ (figure I.14) de l'acier considéré. L'acier est constitué, dans ce domaine de température, par une partie de la ferrite initiale préexistante, et une austénite résultant de la transformation de l'agrégrat lamellaire perlitique initial. Les carbures ou carbonitrures présents dans l'acier HLE subissent une dissolution partielle au refroidissement (nécessairement lent car il s'agit toujours d'un traitement global) les plages d'austénite se transforment en ferrite et perlite plus fines, par rapport aux constituants initiaux qu'elles remplacent et les plages de ferrite non dissoutes à l'échauffement demeurent intactes. Il en est de même pour le comportement des carbures et

carbonitrides. Ce mécanisme s'accompagne d'une amélioration de la ténacité et abaissement de la température de transition.

En ce qui concerne les ensembles soudés, le traitement inter-critique peut être utilisé soit en complément du traitement de normalisation dont il complète les effets, soit comme seul traitement sur l'état brut de soudage, essentiellement pour améliorer la ténacité de la zone fondu. Cette amélioration est d'autant plus sensible que, compte tenu de la composition chimique, la structure initiale est plus éloignée de l'état d'équilibre [5].

4.1 Objectif des traitements thermiques appliqués aux soudures :

Les traitements thermiques appliqués aux soudures ont plusieurs objectifs essentiels pour améliorer la qualité et la durabilité des joints soudés.

- **Réduction des contraintes résiduelles :** le soudage génère des contraintes internes due aux variations de température, comme le traitement thermique post-soudure, aident à réduire ces contraintes, ce qui diminue le risque de fissuration.
- **Amélioration des propriétés mécaniques :** les traitements thermiques peuvent augmenter la résistance à la traction, la ductilité et la ténacité des joints soudés. Par exemple le recuit et la normalisation sont utilisée pour adoucir le métal et améliorer sa flexibilité.

Prévention des fissures : en réduisant les contraintes interne et en améliorant la microstructure du métal, les traitements thermiques aident à prévenir les fissures et autres défauts.

- **Uniformité de la microstructure :** les traitements thermiques permettent d'obtenir une microstructure plus homogène, ce qui améliore la performance et la fiabilité des soudures.
- **Réduction de la fragilité :** certains traitements comme le revenu, sont utilisés pour diminuer la fragilité des joints soudés en augmentant leur ténacité [6].

4.2 Effet des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques et chimiques :

Le traitement thermiques est considéré comme une étape importante pour améliorer les propriétés mécaniques et chimiques des matériaux, voici quelques points clés sur leur effet :

- **Microstructure :** les traitements thermiques modifient la microstructure des matériaux, ce qui peut améliorer leur résistance, leur dureté et leur ductilité. Par exemple : le revenu et la trempe sont des traitements couramment utilisés pour renforcer les aciers.

- **Propriétés mécaniques :** les traitements thermiques peuvent augmenter la résistance à la traction, la dureté et la résilience des matériaux. Par exemple, les alliages d'aluminium peuvent subir des traitements thermiques pour améliorer leur résistance et leur ductilité.
- **Propriétés chimique :** les traitements thermiques peuvent également influencer les propriétés chimiques des matériaux, comme leur résistance à la corrosion [6].

5 Relation microstructure-propriétés :

La relation entre les propriétés mécaniques d'un acier et sa microstructure constitue un paramètre clé dans l'analyse de son comportement en service. Des caractéristiques telles que la dureté, la résistance à la traction, la ductilité et la ténacité sont directement conditionnées par l'arrangement microstructural du matériau. Celui-ci peut être optimisé ou modifié par des procédés de traitement thermique, de mise en forme mécanique ainsi que par l'ajustement de sa composition chimique [7].

L'acier peut contenir différentes phases selon son traitement thermique et sa composition, dans ce tableau on donne l'influence des phases microstructurales sur les propriétés mécaniques (tableau I.1) :

Tableau I.1:l'influence des phases microstructurales sur les propriétés mécaniques

Phase microstructurale	Formation	Description	Influence sur les propriétés mécaniques
Ferrite	Obtenue après recuit ou normalisation	Solution solide de carbone dans le fer α (cubique centré)	Très ductile, faible résistance, bonne aptitude au formage
Austénite	Peut subsister après trempe en fonction de la teneur en carbone et alliages	Solution solide de carbone dans le fer γ (cubique à faces centrées)	Ductile et tenace à haute température, se transforme en d'autres phases à refroidissement
Cémentite (Fe_3C)	Présente sous forme de précipités dans la perlite, bainite ou martensite	Carbure de fer, phase dure et fragile	Augmente la dureté et la résistance, mais réduit la ductilité

Perlite	Résulte d'un refroidissement lent après austénitisation	Alternance de ferrite et cémentite (structure lamellaire)	Bon compromis entre résistance et ductilité
Bainite	Formée par trempe isotherme entre 250-500°C	Structure fine intermédiaire entre la perlite et la martensite	Bonne combinaison de dureté et ténacité
Martensite	Issue d'un refroidissement rapide (trempe) depuis l'austénite	Structure très dure et fragile formée par trempe	Très dure et résistante, mais fragile (besoin de revenu)

5.1 Transformation des phases dans les matériaux soudés

Lors du soudage, une grande quantité de chaleur se propage sur l'ensemble de la structure de la pièce soudée. Cette hausse de température affecte sur la structure de la pièce en changeant la microstructure du matériau accompagné d'un changement possible du nombre et de la nature des phases dans le matériau (figure I.15).

Les concepts de fragilisation ci-dessus sont génériques. En plus de varier d'un matériau à l'autre, ils présentent des variations au sein de la ZAT elle-même.

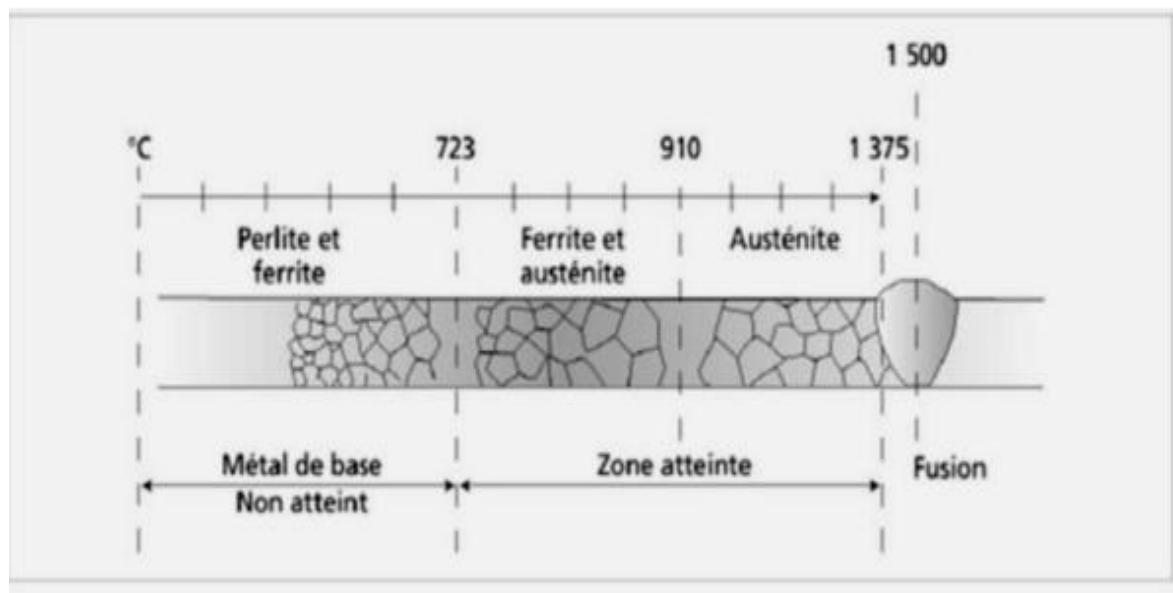


Figure I.15: Transformation de phase dans les pièces soudées

5.1.1 Transformations en ZAC lors du chauffage :

Selon GRONG & AKSELSEN, une soudure mono-passe peut être divisée en 5 régions très caractéristiques, en fonction de la température de pointe :

- 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 ferritique 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.

La représentation ci-dessous offre une parfaite analogie entre la distribution thermique, les pics de températures atteints et le découpage en régions [7].

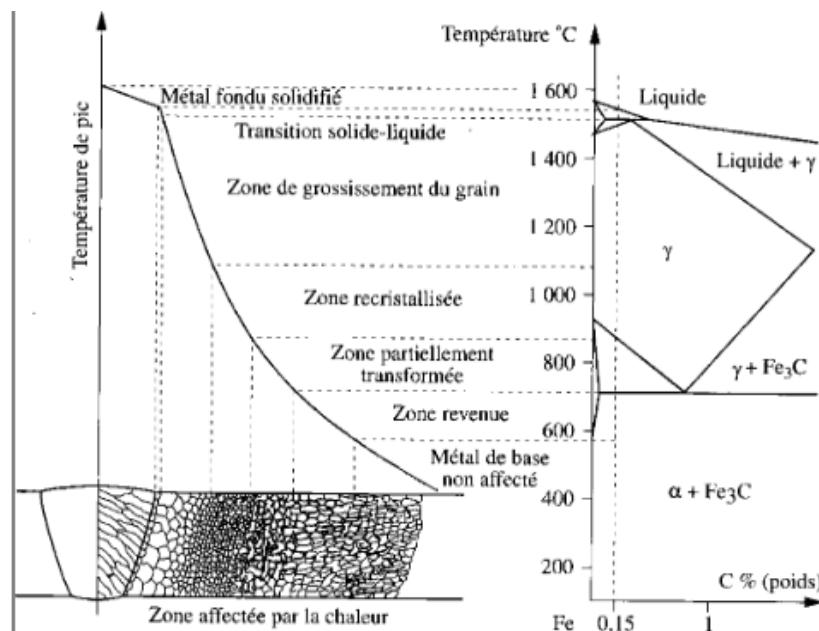


Figure I.16: Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0,15% C.

En se rapprochant de la zone fondu, 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 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 coexiste une phase ferritique 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 ZAC [8].

5.1.2 Transformations 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_a . Cette zone appelée Zone Affectée Thermiquement ZAT est comprise entre la ligne de fusion dans le métal de base et la température T_a .

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 TRC) [8].

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)

5.2 Microstructure typique après soudage en atmosphère humide

Le soudage en atmosphère humide, tel que le soudage sous l'eau, influence significativement la microstructure des matériaux soudés, notamment en raison de l'introduction d'hydrogène diffusible. Voici une analyse détaillée des effets observés :

5.2.1 Métal fondu solidifié (métal d'apport)

- **Formation de martensite** : Le refroidissement rapide inhérent au soudage en milieu humide favorise la formation de martensite, une phase dure mais fragile, particulièrement dans les aciers à haute résistance.
- **Hétérogénéité du bain de fusion** : La solidification rapide conduit à une microstructure dendritique composée de ferrite, de perlite et parfois de bainite, reflétant une distribution non uniforme des phases.

- **Porosité accrue** : La présence d'humidité entraîne la formation de vapeur d'eau et l'introduction d'hydrogène, conduisant à des pores et des inclusions gazeuses dans le métal solidifié [8].

5.2.2 Zone Affectée Thermiquement (ZAT)

- **ZAT proche du métal fondu** : Cette zone subit des températures élevées, provoquant la formation de martensite et de ferrite aciculaire en raison du refroidissement rapide.
- **ZAT intermédiaire** : Les températures modérées favorisent la formation de bainite ou de ferrite associée à la perlite.
- **ZAT externe** : Plus éloignée de la source de chaleur, cette zone présente une ferrite et une perlite aux grains plus grossiers que ceux du matériau de base, en raison d'une croissance granulaire induite par la chaleur [8].

5.3 Corrélation entre les traitements thermiques et la performance des soudures

Les traitements thermiques appliqués avant et après le soudage influencent directement la microstructure et les propriétés mécaniques du joint soudé. Ils permettent d'améliorer la résistance, la ductilité et la durabilité des soudures tout en réduisant les défauts comme la fissuration et les contraintes résiduelles.

5.3.1 Rôle des traitements thermiques avant et après soudage

➤ Avant le soudage : le préchauffage

Réduire le choc thermique et limiter la formation de structures fragiles.

Effets observés :

- Diminue la vitesse de refroidissement, réduisant ainsi la formation de martensite fragile.
- Favorise la diffusion de l'hydrogène pour éviter les fissures retardées.
- Stabilise la microstructure en formant des phases plus ductiles comme la ferrite et la bainite.

Exemple : Dans les aciers à haute résistance, un préchauffage entre **100 et 300°C** limite le risque de fissuration à froid [9].

➤ Après le soudage : traitement thermique post-soudage(TTPS)

Une fois la soudure réalisée, le TTPS permet d'homogénéiser la structure et de détendre les contraintes résiduelles.

- **Détente thermique (550-650°C)** : atténue la dureté excessive due à la martensite, améliore la ductilité et la ténacité du joint soudé.
- **Recuit (800-950°C)** : permet une cristallisation complète, idéal pour les aciers doux, élimine les contraintes et affine la structure cristalline.
- **Normalisation (850-950°C+ refroidissement à l'air)** : homogénéiser la microstructure et affine le grain, améliore la résilience et la résistance à la fatigue.

Tableau I.2: L'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques

Propriété mécanique	Sans traitement thermique	Avec traitement thermique
Dureté	Élevée (martensite dure et fragile)	Modérée après revenu ou recuit
Résistance à la traction	Potentiellement élevée mais avec risque de fissures	Meilleure répartition des contraintes
Ductilité	Faible, risque de rupture fragile	Améliorée après TTPS
Ténacité	Peut être réduite par les contraintes internes	Augmentée grâce à l'affinement de la structure
Fissuration	Risque de fissures à froid et porosité	Minimisées par préchauffage et TTPS

5.4 Applications pratiques

- **Soudage des aciers faiblement alliés :**
Revenu ou détente thermique pour éviter la fragilisation.
- **Soudage des aciers inoxydables :**
Normalisation ou stabilisation pour éviter la précipitation de carbures.
- **Soudage sous atmosphère humide (ex. soudage sous-marin) :**
Préchauffage impératif pour limiter l'hydrogène diffusible.
Traitement post-soudage pour détendre les contraintes et éviter les fissurations différées.

6 Les défauts de soudage

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

- Les fissures
- Les soufflures
- La pollution ferreuse
- Les inclusions
- Les retassures et criques de solidification

6.1 Les fissures

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

Dans le métal fondu, elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.

Dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal [10].

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

- La fissuration à chaud
- La fissuration à froid

Tableau I.3:Les causes et les moyens de prévention des fissurations à chaud et à froid

	Causes	Moyen de prévention
Fissuration à chaud	Joint trop étroites. Présence d'impuretés dans la soudure (souffre, phosphore). Métal d'apport incompatible avec le métal de base. Cordon trop petit. Trop de retrait durant ou après le	Bonne mesure des angles des chanfreins. Préchauffage et chauffage en cours de soudure. Bon choix du métal d'apport Refroidissement lent. Traitement thermique après soudage. Cordon suffisamment large

	soudage	
Fissuration à froid	Hydrogène coincé dans la soudure. Tension internes résiduelles importantes	Préchauffage et chauffage en cours de soudure. Refroidissement lent. Utilisation d'électrodes basiques. Traitement thermique après soudage

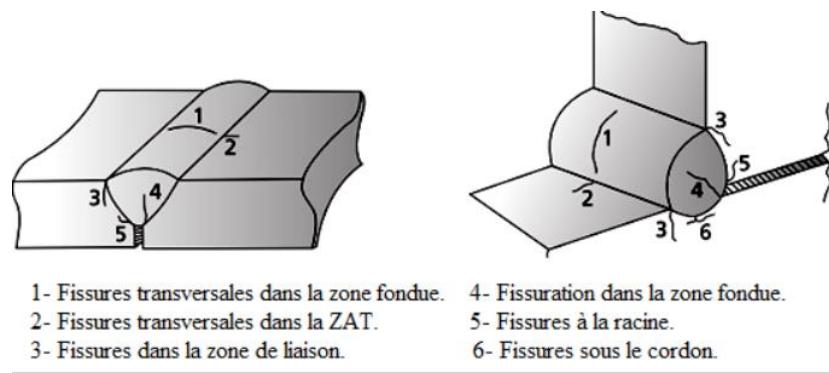


Figure I.17:Les différents types de fissure

6.2 Les soufflures

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

Des soufflures débouchantes sont appelées piqûres. Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder [10].

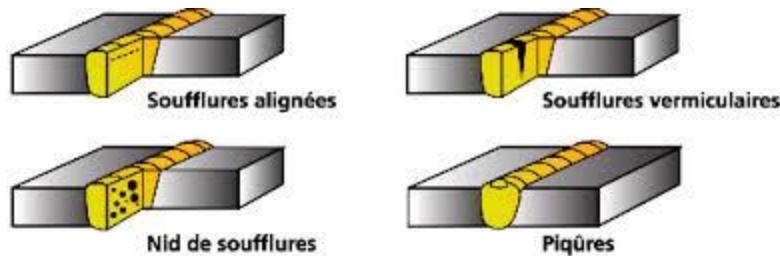


Figure I.18: Les différents types de soufflures

6.3 Les inclusions

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

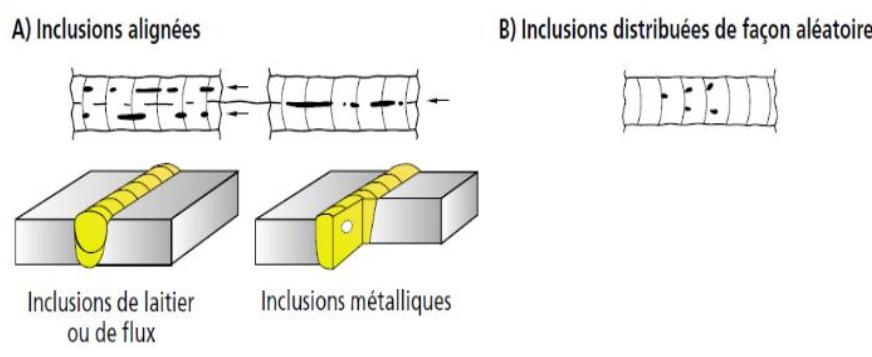


Figure I.19: Les types d'inclusions

Tableau I.4: Les types d'inclusion

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans le métal fondu (ex : poussières).
Inclusion de laitier	Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonnée dans le métal fondu au cours de solidification
Inclusion métallique	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (Ex : le tungstène lors du soudage TIG, le cuivre et tout autre métal étranger).

6.4 Retassures et criques de solidification :

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante [10].



Figure I.20:Retassure

6.5 Morsures et caniveaux :

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base. Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut [10].

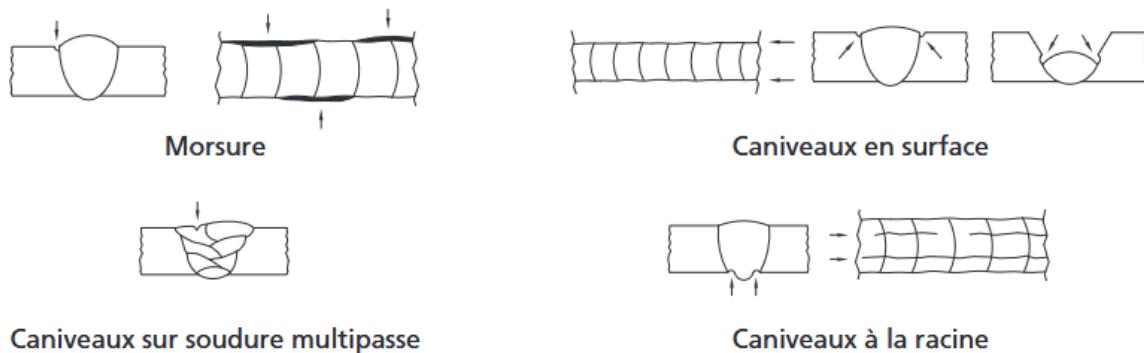


Figure I.21: Morsures et caniveaux

6.6 Effondrements et trous

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

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou. Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort [10].



Figure I.22:Les types d'effondrements

6.7 Débordements du cordon :

Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier



Figure I.23:Débordement

6.8 Défauts de pénétration.

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé.

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci. Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure [10].

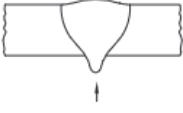
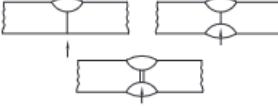
Défaut de pénétration	Causes possibles	Moyens de prévention
Excès de pénétration 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop lente - Intensité du courant trop forte - Mauvaise préparation des bords - Trop de distance entre les pièces - Arc trop court 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter la vitesse. - Diminuer l'intensité. - Utiliser le joint approprié. - Rapprocher les pièces. - Éloigner la torche.
Manque de pénétration 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse d'avance trop élevée - Intensité du courant trop faible - Chanfrein trop étroit ou absent - Métal de base trop épais et froid 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer la vitesse. - Augmenter l'intensité. - Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces. - S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée.

Figure I.24:Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention

6.9 Défauts géométriques du cordon

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave [10].

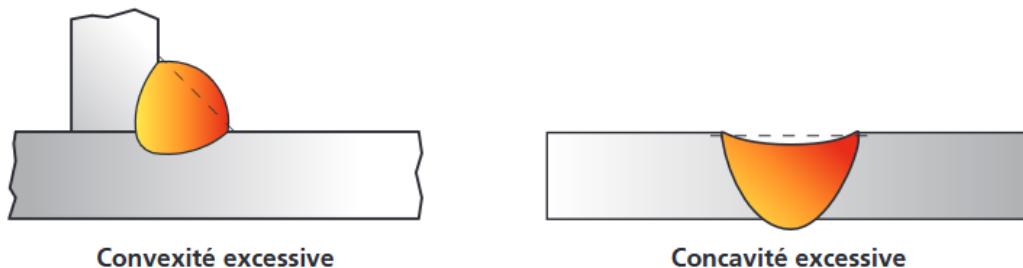


Figure I.25:Convexité et concavité

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure I.24). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon, ce manque peut être localisé (partie B) ou continu [10].

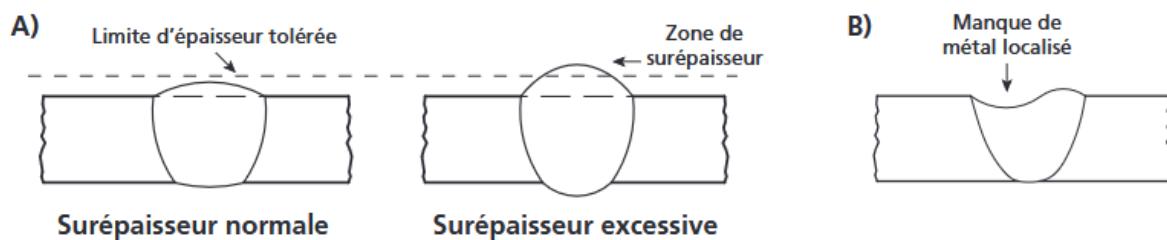


Figure I.26:Surépaisseur

Chapitre II

Matériaux Et Techniques Expérimentale

1 Introduction

Dans ce chapitre on présente en détail le matériau utilisé, la technique de soudage utilisé ainsi que les différentes techniques expérimentales mises en œuvre pour étudier l'impact du soudage sur les propriétés mécaniques du joint soudé. Plus précisément, nous décrirons les méthodes adoptées pour l'évaluation de la dureté, en expliquant les principes de mesure, les équipements utilisés et les conditions expérimentales appliquées.

2 Matériaux utilisés

2.1 Acier S460N :

L'acier S460N est un acier de construction à haute résistance, normalisé (désigné par la lettre "N" pour normalisé ou laminé à chaud et normalisé), selon la norme **NF EN 10027-2**, est un acier faiblement allié à haute résistance, caractérisé par une haute limite d'élasticité. Il est couramment utilisé dans diverses applications offshore et onshore, notamment pour la fabrication de supports de jambes de plates-formes de levage et de pieux d'amarrage destinés aux terminaux terrestres de GNL [11].

Cet acier de structure au carbone-manganèse garantit des propriétés mécaniques minimales, notamment en termes de limite d'élasticité et de résistance à la traction. Grâce à sa structure à grains fins, il présente une excellente soudabilité avec l'ensemble des procédés de soudage conventionnels [11].

2.2 Propriétés mécaniques :

- N : normalisation ou laminage normalisant
- Limite d'élasticité $Re = 460 \text{ MPa}$ pour la gamme d'épaisseur la plus faible (de 0 à 16 mm).

2.3 Propriétés chimiques :

Tableau II.1 : Propriétés chimique du métal de base

Eléments	Pourcentage maximum par masse												
	C	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	V	Ti	Ceq	Mo	
Composition	0.2	1-1.70	0.030	0.025	0.02	0.70	0.30	0.80	0.20	0.03	0.53	0.1	

2.4 Soudabilité des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2 à -6

La soudabilité des aciers spécifiés dans NF EN 10025-2 à -6 est exprimée au moyen du carbone équivalent selon la formule de l'IIW/IIS :

$$\text{CEV} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr}+\text{Mo}+\text{V}}{5} + \frac{\text{Ni}+\text{Cu}}{15}$$

Les exigences générales pour le soudage à l'arc des aciers spécifiés dans NF EN 10025-1 à -6 sont données dans la norme NF EN 1011-2 :2004.

En particulier, les normes NF EN 10025 attirent l'attention de l'utilisateur sur le risque de fissuration à froid des aciers spécifiés dans ces normes lors de leur mise en œuvre [11].

3 Procédé de soudage

3.1 Technique de soudage utilisé :

Dans le cadre de nos opérations de soudage, nous employons un poste de type Pulse 300, équipé d'un motoréducteur à faible vitesse (10 mm/s) pour l'acheminement contrôlé du cordon de soudure. Le procédé intègre un dispositif de régulation des gaz, comprenant des débitmètres à flotteur pour l'ajustement précis du débit d'oxygène et d'argon, ainsi que des manomètres assurant une pression optimale. L'apport de métal est réalisé à l'aide d'une électrode enrobée de type Barracuda (E42 2 1 Ni RR 51), d'un diamètre de 4 mm. Cette électrode rutile, spécifiquement formulée pour le soudage sous eau, présente une composition chimique détaillée dans le tableau ci-après.

Tableau II.2 : Composition chimique électrode enrobée de type Barracuda (E42 2 1 Ni RR 51)

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

E : électrode

42 : résistance à la traction minimale x 1 000 PSI

2 : Représente la résilience à -20°C.

1 : Indique la position de soudage, ici toutes positions sauf verticale descendante.

Ni : Signifie que l'électrode contient du nickel, généralement autour de 0,8 % à 1 %.

RR : Désigne un enrobage rutile.

51 : Code spécifique du fabricant ou d'autres caractéristiques particulières.

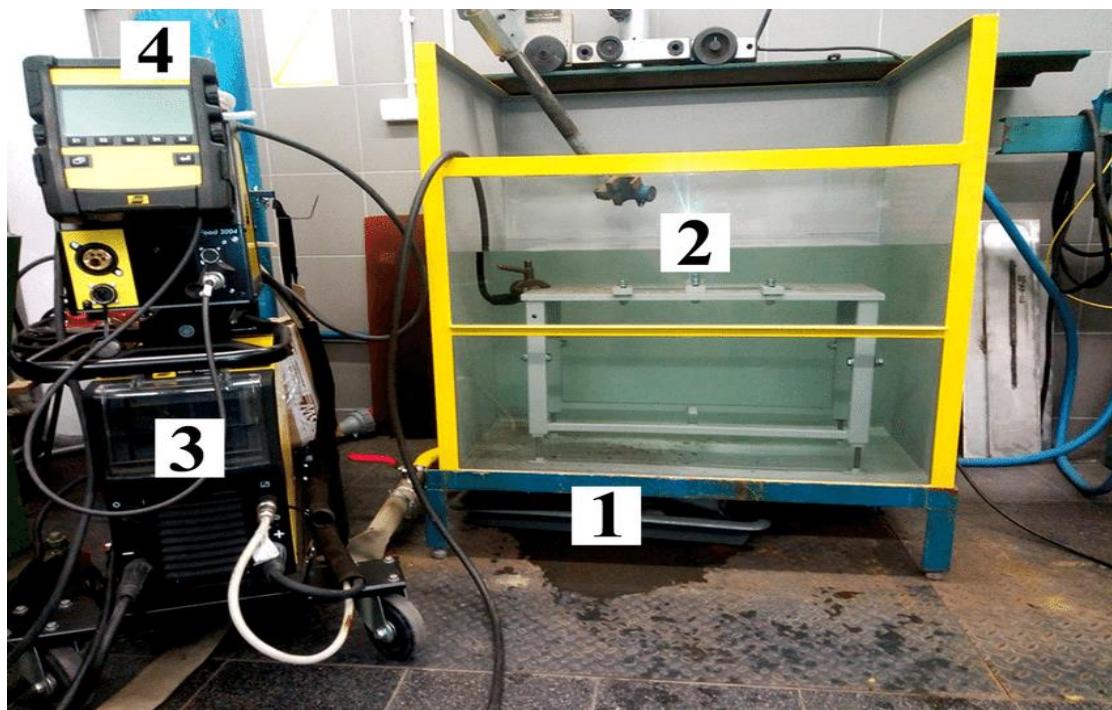


Figure II.1 : poste à souder pulse 300

1 bain d'immersion de soudage à l'eau ; 2 baguette de barracuda ; 3 poste a soude Pulser
4 commande.

Paramètre de soudage :

Pour la réalisation des essais, deux spécimens ont été préparés en utilisant le procédé de soudage MMA (Manual Metal Arc). Les soudures ont été effectuées sous l'eau, à une profondeur de 0,25 m.

Afin d'assurer une couverture complète de la surface des plaques d'acier, 14 cordons de soudure ont été déposés sur chaque spécimen immergé. Les paramètres sélectionnés ont généré des apports thermiques supérieurs à 0,9 kJ/mm pour les électrodes Barracuda Gold, réduisant ainsi la sensibilité de l'acier à la fissuration à froid.

Les soudures réalisées sous l'eau ont présenté une largeur de cordon plus réduite, ce qui a nécessité l'application d'un plus grand nombre de passes pour obtenir la couverture souhaitée.

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

Réglage	Valeurs
Intensité (A)	272
Courant (V)	25.75
Q (KJ/mm)	0.99
Angle de soudage	60°
Type de courant	AC

4 Partie pratique

4.1 Préparation des échantillons :

L'éprouvette en acier, comportant la soudure en surface, a été récupéré puis découpée en plusieurs échantillons afin de faciliter l'analyse et l'étude du matériau.

4.1.1 Découpage :

À l'aide d'une scie à métaux, l'éprouvette a été sectionnée en deux, tout en maintenant un refroidissement à l'eau afin de prévenir toute élévation excessive de température. Ce procédé a permis d'obtenir deux pièces identiques, conservant intactes leurs propriétés et leur structure d'origine.



Figure II.2 : Découpage de l'éprouvette à l'aide d'une scie à métaux

4.1.2 Usinage :

Afin d'obtenir des éprouvettes conformes, un usinage de précision a été réalisé à l'aide d'une fraiseuse afin d'assurer une surface plane au niveau du joint de soudure. Un refroidissement à l'eau a été appliqué en continu pour éviter toute altération de la structure du matériau.

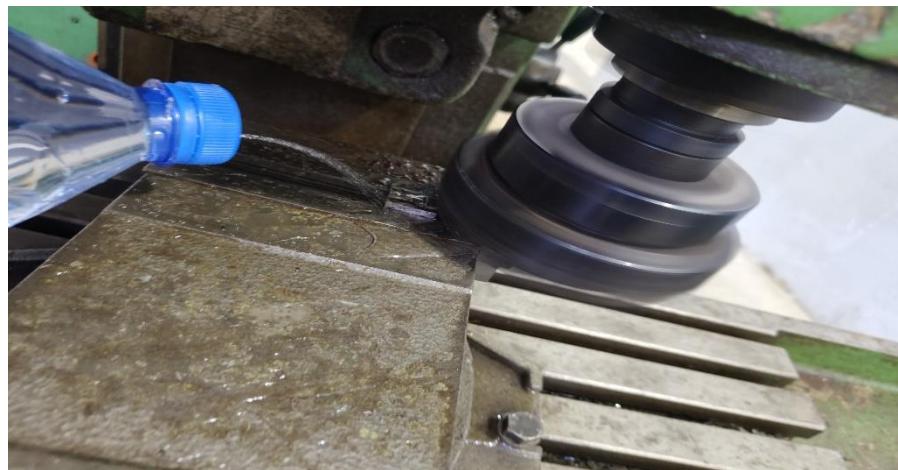


Figure II.3: Usinage des pièces à la fraise

4.1.3 Traitement thermique :

Le traitement thermique est un ensemble de procédés appliqués aux matériaux, principalement les métaux et alliages, afin de modifier leurs propriétés mécaniques, physiques et parfois chimiques. Ces traitements sont effectués en chauffant le matériau à une température précise, en le maintenant à cette température pendant un certain temps, puis en le refroidissant selon une méthode contrôlée, dans notre étude on a procédé à un revenu [12].

4.1.3.1 Procédé du revenu :

Après avoir réglé le four à une température de 600°C, nous avons placé une éprouvette à l'intérieur et l'avons maintenue pendant une durée de deux heures.

En respectant les mesures de sécurité (port de gants, blouse et lunettes de protection), nous avons ensuite retiré l'éprouvette du four pour un refroidissement à l'air.

Le traitement thermique à 600 °C d'une pièce soudée sous l'eau est généralement effectué pour soulager les contraintes résiduelles induites par le soudage. Lors du soudage sous-marin, le refroidissement rapide dû à l'environnement aqueux provoque une trempe brutale du métal

fondu, engendrant des microstructures dures et fragiles ainsi que de fortes contraintes internes. Un traitement thermique post-soudage à 600 °C permet de détendre ces contraintes, d'améliorer la ductilité et la ténacité du joint soudé, tout en réduisant les risques de fissuration différée ou de rupture prématuée en service.



Figure II.4: Température du four réglé à 600°



Figure II.5: Premier échantillon mis dans le four

4.1.4 Polissage :

Après la rectification des éprouvettes, un polissage progressif a été réalisé à l'aide de papiers abrasifs de différentes granulométries, allant de 220 à 2000, en passant du plus grossier au plus fin afin d'obtenir un effet miroir. Ce processus permet d'obtenir une surface plane et brillante. Le polissage a été effectué à l'aide d'une polisseuse sous jet d'eau afin de limiter l'échauffement et d'éviter l'apparition de stries sur la surface des éprouvettes.



Figure II.6: Polisseuse avec lubrification à l'eau

5 Techniques de caractérisation des matériaux

Après avoir obtenu l'effet miroir des deux échantillons (traité thermiquement et non traité), nous analyserons leurs caractéristiques en comparant les résultats obtenus à la fin de l'étude.

5.1 Diffraction au rayons X (DRX) :

5.1.1 Définition :

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'analyse non destructive permettant d'étudier la structure cristalline des matériaux. Elle repose sur l'interaction des rayons X avec les atomes d'un cristal, générant un motif de diffraction caractéristique. Ce procédé est largement utilisé en science des matériaux pour identifier les phases cristallines, déterminer la structure atomique [19]. Les spectres ont été obtenus grâce à l'équipement Diffractomètre monocristal Bruker AXS D8 Venture.

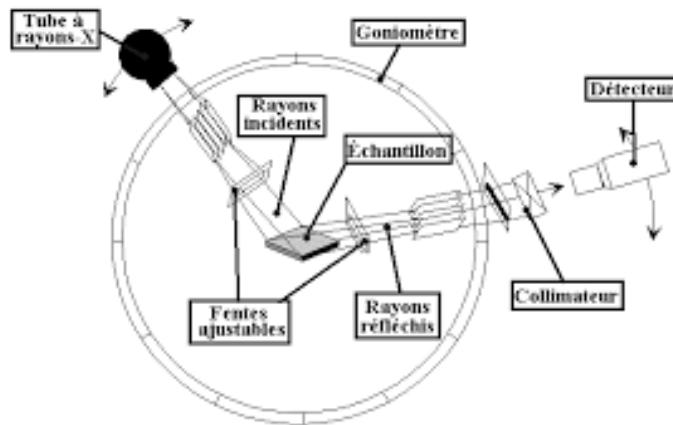


Figure II.7: Schéma de principe de la diffraction au rayon X.

5.2 Rugosité :

La rugosité désigne les irrégularités d'une surface, mesurées par des paramètres comme la rugosité moyenne (R_a). Elle influence des propriétés telles que l'adhérence, la friction et la résistance à l'usure, jouant un rôle clé en usinage et en ingénierie des surfaces [13].



Figure II.8: Profilo-mètre à palpage motorisé et colonne manuelle – PGS100

5.3 Observations au microscope optique :

L'analyse de l'acier a été réalisée à l'aide d'un microscope optique, équipé d'une caméra permettant d'examiner en détail le joint de soudure de l'échantillon.

Avant l'observation, l'échantillon a été soumis à une préparation rigoureuse comprenant un polissage séquentiel avec des papiers abrasifs de granulométrie comprise entre 200 et 2000, afin d'obtenir une surface parfaitement lisse et uniforme.

Une attaque chimique au réactif Nital a ensuite été effectuée pendant 10 à 20 secondes afin de faire apparaître un contraste révélant la microstructure de l'acier. Cette étape a été arrêtée dès l'obtention d'un contraste optimal pour éviter toute altération indésirable.



Figure II.9: Microscope optique DM-111

6 Caractérisation mécanique

6.1 Essais de dureté

6.1.1 Buts et objectifs de l'assai de dureté :

L'essai de dureté permet d'évaluer la dureté superficielle des métaux en enfonçant un pénétrateur dans le matériau testé. La forme et les dimensions du pénétrateur varient selon le type d'essai. La charge appliquée est constante, et la dureté est déterminée en mesurant soit la surface, soit la profondeur de l'empreinte laissée.

Cet essai présente l'avantage d'être économique, car il ne nécessite pas de préparation d'éprouvette et peut être réalisé directement sur la pièce. Il fournit des indications précieuses sur la résistance à l'usure par frottement, l'usinabilité, l'homogénéité du matériau ainsi que l'efficacité des traitements thermiques appliqués [14].

En soudage les duretés sont mesuré dans des zones précises :

- Dans la soudure
- Dans la zone de liaison
- Les zones thermiquement affectées (ZAT)
- Les métaux de base

Dans notre cas avons effectué nos tests sur un équipement de référence type Vickers (HV). Elle est caractérisé par l'empreinte faite par un pénétrateur sous une charge donnée durant 15 seconde. Le pénétrateur est formé d'une pyramide en diamant a base carré d'ont les faces opposées font un angle de 136. La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 Kgf. Le coté de l'empreinte est de l'ordre de 0.5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope [16].



Figure II.10: Testeur de dureté micro-Vickers

6.2 Essai de résilience (Charpy)

L'essai de résilience a pour objectif de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture, à l'aide d'un mouton de Charpy où un marteau de masse m fixé à l'extrémité d'un 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/cm²) [17].

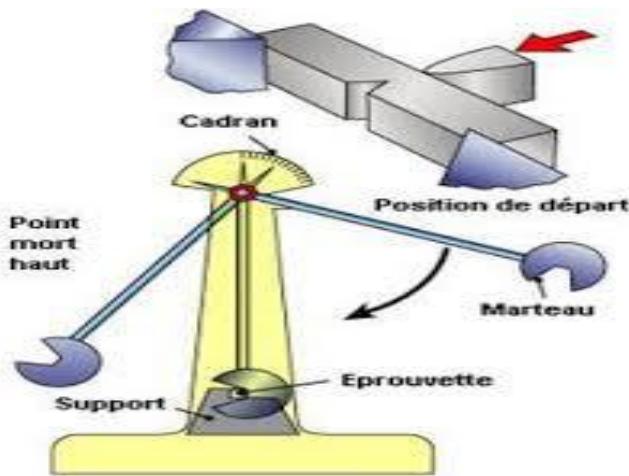


Figure II.11: Schéma illustratif de l'essai Charpy

6.3 La corrosion :

La corrosion est la dégradation des matériaux, principalement des métaux, due à des réactions chimiques ou électrochimiques avec leur environnement. Elle peut prendre plusieurs formes (uniforme, galvanique, par piqûres, etc.) et affecte la durabilité des structures. Pour la prévenir, on utilise des revêtements, des alliages résistants ou des méthodes de protection comme la protection cathodique [18].

6.3.1 Technique de la masse perdue :

La mesure de la perte de poids constitue une première approche pour l'étude de la corrosion d'un métal en milieu marin. Cette méthode, simple à mettre en œuvre et ne nécessitant pas d'équipement complexe, repose sur la quantification de la perte de masse (Δm) des échantillons en acier S460N après une période d'immersion dans une solution corrosive.

6.3.2 Manipulation de la technique de masse perdue :

Cette méthode requiert le matériel de laboratoire suivant :

- Échantillons en acier
- Balance de précision avec une sensibilité de 0,0001 g
- Solution marine



Figure II.12: Technique de la masse perdue

6.3.3 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 Discussion

1 Introduction

Après avoir réalisé le polissage des deux échantillons d'acier S460N (traité thermiquement et non traité), nous avons procédé aux essais mécaniques de dureté, à l'essai de résilience Charpy ainsi qu'aux observations par microscope électronique à balayage et par diffraction des rayons X (DRX) et terminons avec le test d'immersion. L'ensemble des résultats obtenus sera présenté et discuté dans ce chapitre 3.

2 Caractérisation structural et microstructurale

2.1 Caractérisation structural par DRX d'échantillon non traité thermiquement et traité thermiquement :

2.1.1 Résultats d'analyse par DRX d'échantillon non traité thermiquement :

Les figures 1 et 2 illustrent les spectres obtenus par diffraction des rayons X (DRX) pour l'échantillon à l'état initial (non traité thermiquement) et après traitement thermique, respectivement. Ces spectres permettent de comparer les modifications structurales induites par le traitement thermique

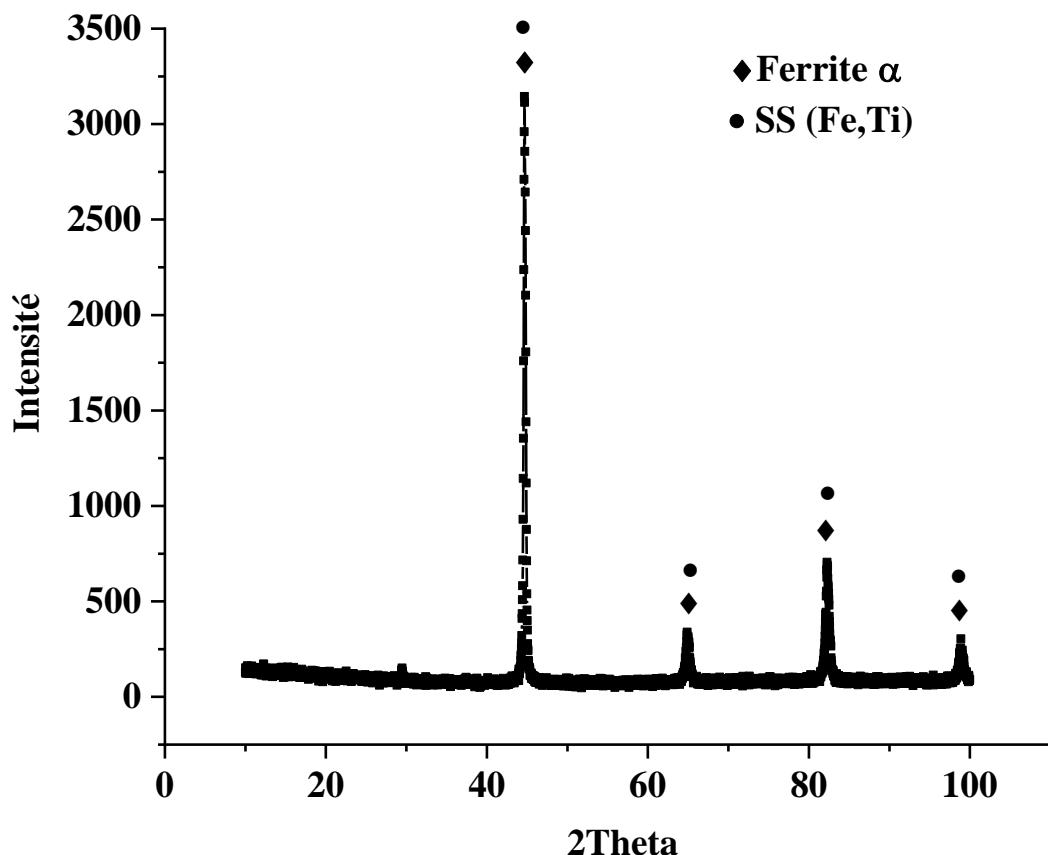


Figure III.1: Résultats DRX de l'échantillon non traité

Observation :

Ferrite α : les pics associés à la ferrite indiquent une structure cubique avec un paramètre de maille $a = 2.86$. Cela suggère une phase stable, typique des métaux ferreux non soumis à un traitement thermique. La ferrite est souvent une phase dominante dans ce type d'acier.

Solution solide (Fe,Ti) : la solution solide de fer et titane, avec une structure à face centrée (CFC), montre que le titane est probablement présent en solution dans le fer, sans précipitation notable. Cela peut indiquer une structure moins homogène en raison des contraintes résiduelles.

Dans les zones affectées thermiquement et dans la zone de joint de soudure on y trouve des solutions solides avec distribution statistique d'alliages fer-titanium, le Ti substitut les atomes de Fer au sein du laitier dans la maille cristalline par un mécanisme de remplacement solution solide de substitution. Le titane et le fer ont des rayons atomiques proches, facilitant cette substitution sans trop déformer la structure.

2.1.2 Résultats d'analyse par DRX d'échantillon traité thermiquement à 600° C :

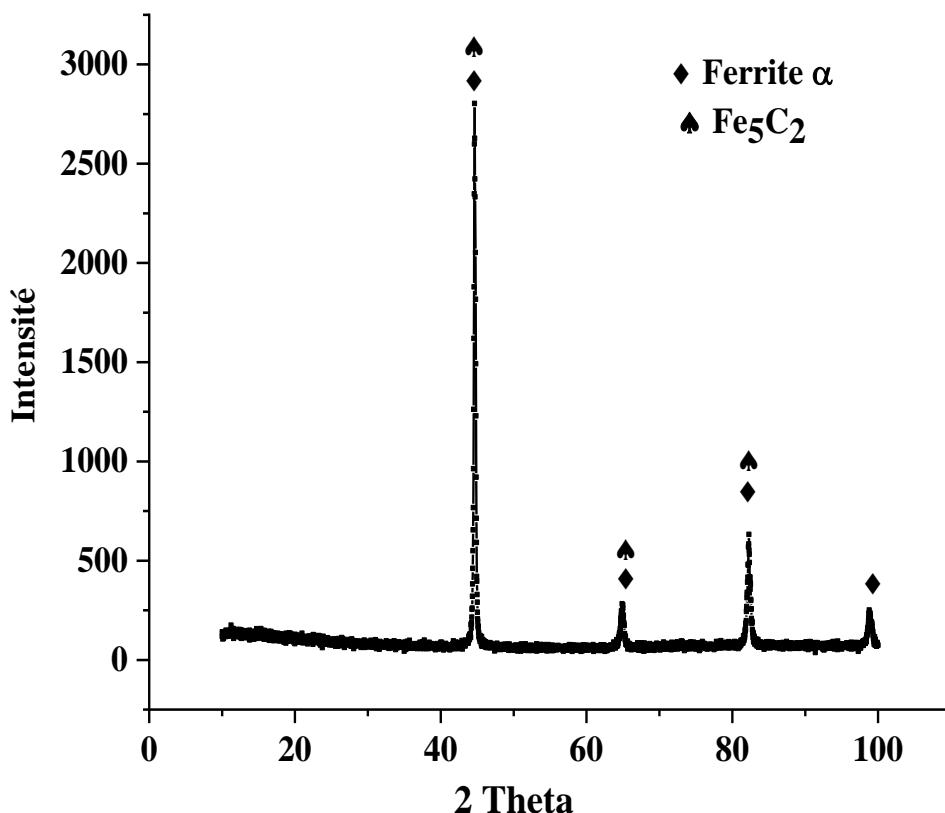


Figure III.2: Résultats DRX de l'échantillon traité

Observation

Ferrite α : La ferrite montre une structure cubique avec un paramètre de maille $a= 2.86$, ce qui reflète la stabilisation d'une phase métallique dominante.

Le revenu à 600° C favorise généralement une diminution des contraintes internes, rendant les pics de cette phase plus nets et symétriques.

Fe₅C₂ (Cémentite) : la présence de cette phase monoclinique indique une précipitation de carbures due au traitement thermique.

La transformation de la solution solide (Fe,Ti) en Cémentite (Fe₅C₂) après traitement thermique à 600°C s'explique par un phénomène de précipitation et de redistribution des éléments sous l'effet de la diffusion atomique. A haute température, le titane est soluble dans la ferrite α par substitution des atomes de fer, formant une solution solide (Fe,Ti) homogène. Le titane stabilise la maille cristalline et retarde la précipitation des carbures dans certaines conditions.

Largeur et netteté des pics :

On constate, dans l'échantillon non traité, la présence de pics caractéristiques d'une taille de grain réduite, probablement due aux grains fins issus du processus de soudage. Cela peut également indiquer la présence de contraintes résiduelles.

Tandis que dans l'échantillon traité, les pics apparaissent généralement plus étroits suggérant une croissance des grains (typique après un revenu à cette température). Ainsi qu'une réduction des contraintes résiduelles, ce qui stabilise la microstructure globale.

2.1.3 Comparaison entre l'échantillon traité et non traité :

Après comparaison des résultats des deux échantillons on peut conclure qu'après le traitement on remarque une meilleure homogénéité des phases détectées (moins de complexité ou de superposition des pics). Apparition de la cémentite (Fe₅C₂) au détriment de Solution solide (Fe,Ti) cela s'explique par le traitement de revenu tandis que la phase matriciel Ferrite α est resté dominante.

2.2 Résultats rugosité :

2.2.1 Echantillon non traité :

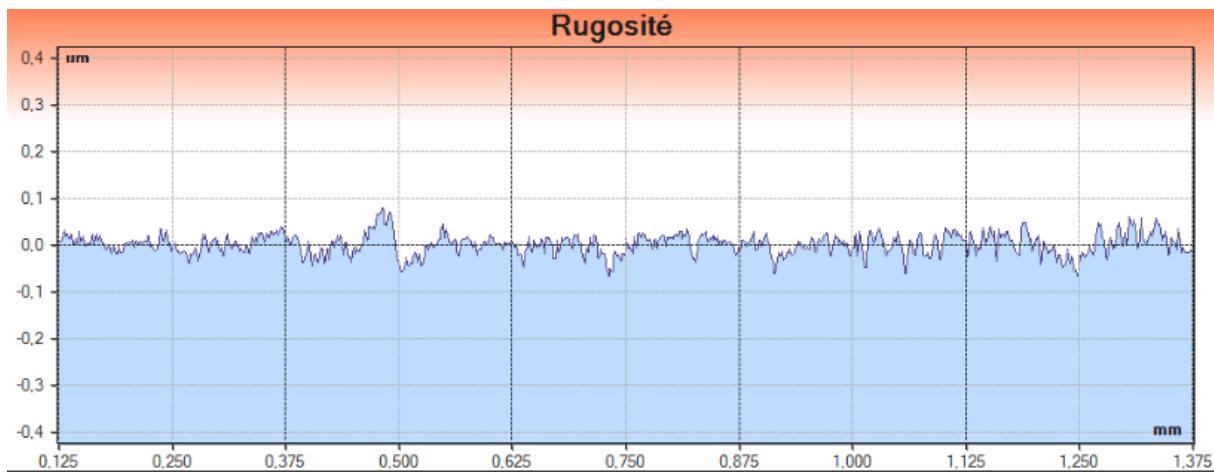


Figure III.3: Résultat rugosité de l'échantillon non traité

Observation : la surface montre des variations de niveaux avec des structures granuleuses, indiquant une homogénéité structurale. Ces irrégularités peuvent être attribuées aux contraintes résiduelles post-soudage qui influence la morphologie et la réactivité du matériau.

Tableau III.1: résultats de rugosité des deux échantillons

Ra	Non traité	traité
1	0.027 μm	0.295 μm
2	0.052 μm	0.029 μm
3	0.020 μm	0.023 μm

2.2.2 Echantillon traité :

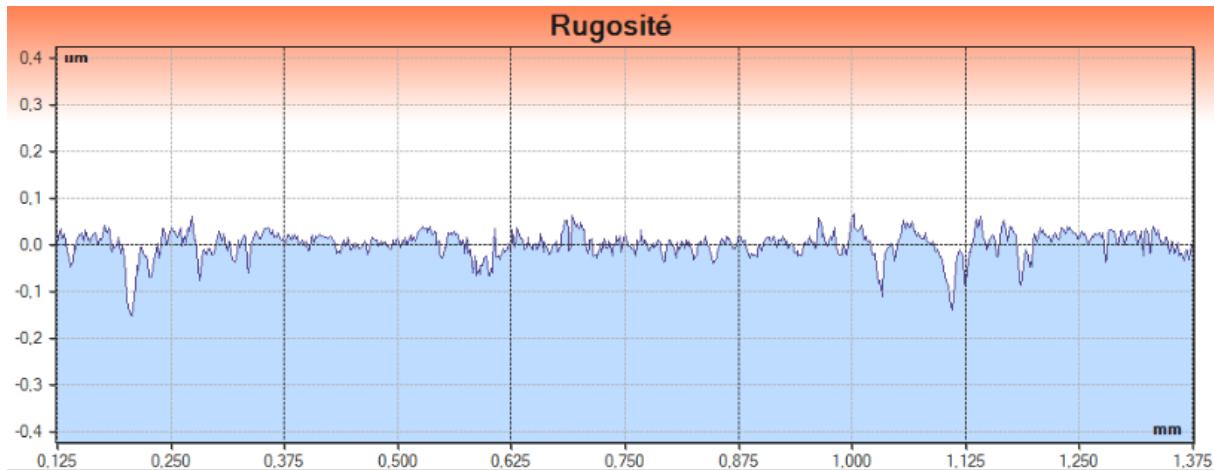


Figure III.4: Résultat rugosité de l'échantillon traité

Observation : diminution des irrégularités sur la surface signe d'une structure plus uniforme, avec moins de relief marqués et d'aspérités. Cette homogénéité est une conséquence directe de la recristallisation et de la croissance des grains induite par le traitement thermique.

3 Caractérisation microstructurale obtenue par microscope électronique à balayage des échantillons non traité et traité thermiquement :

3.1 Echantillon non traité :

Les figures suivantes obtenu avec MEB montrent la microstructure du joint de soudure sans traitement thermique

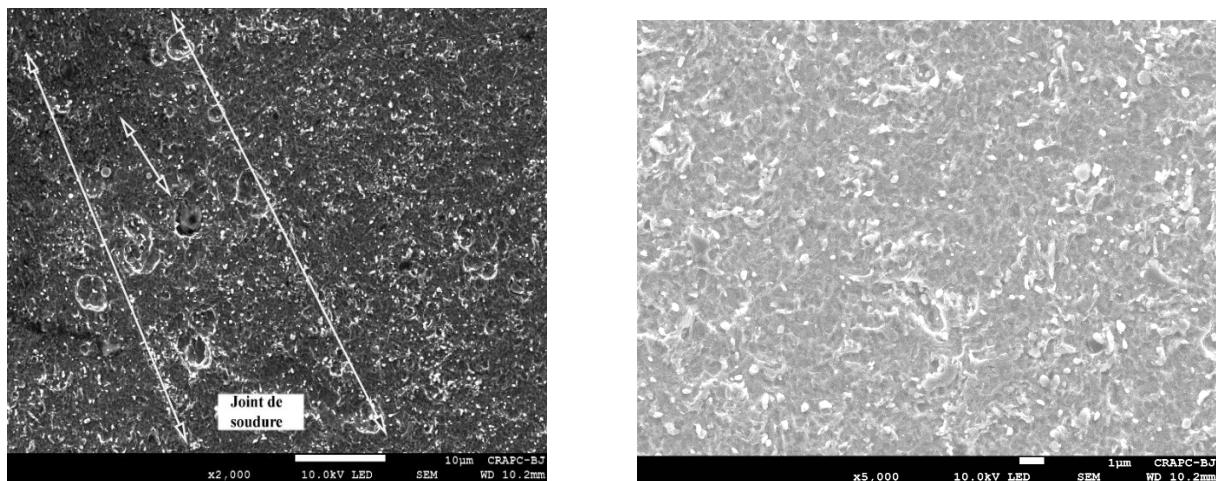


Figure III.5: Image obtenu avec MEB du joint de soudure de l'échantillon non traité

Observation : les grains sont fins et bien définis, ce qui correspond à une dureté élevée qui est déjà mesuré, on remarque aussi des contours nets entre les grains, indiquant une forte densité de joint de grain, considéré comme un facteur qui minimise la mobilité des dislocations et renforce le matériau.

L'absence de traitement thermique a permis de garder une granularité fine.

On observe la présence de plusieurs irrégularités qui peuvent être des porosités ou des microfissures induites par le processus de soudage sous l'eau, ces défauts sont susceptibles d'affecter la résilience de l'échantillon notamment à des basses températures.

3.2 Echantillon traité :

Les figures suivantes obtenu avec MEB montrent la microstructure du joint de soudure après traitement thermique

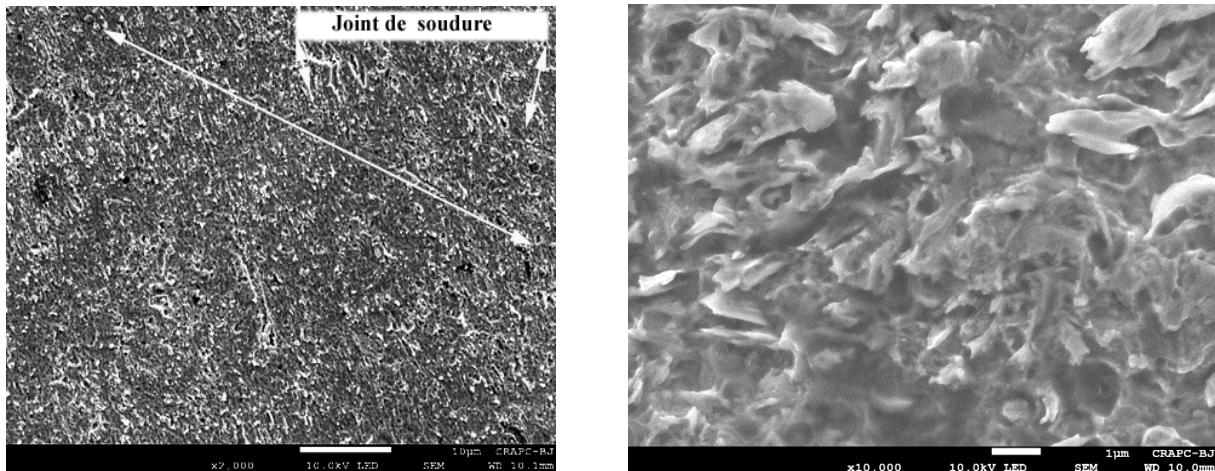


Figure III.6: Joint de soudure de l'échantillon traité thermiquement

Observation : les grains apparaissent plus grand et plus homogène pas rapport à l'échantillon non traité, cela confirme la croissance des grains induite par le traitement thermique. Moins de joints de grains visible ce qui correspond à la baisse de dureté observé précédemment.

On peut observer des zones plus clair et plus sombres, indiquant une réorganisation des éléments chimiques, probablement lié à la précipitation de certains carbures.

Les contours des grains sont moins marqués, indiquant une réduction des tensions internes, cette relaxation favorise une structure plus stable mais avec une résilience légèrement diminuée.

L'image MEB confirme que le traitement thermique a favorisé la croissance des grains, réduit les contraintes résiduelles, et modifie la distribution des phases, expliquant aussi les variations de dureté et de résilience.

4 Caractérisation mécanique

4.1 Résultats Micro-dureté :

Le tableau ci –dessous représente les valeurs obtenues de la dureté HV des deux échantillons sous une charge de 0.2 Kg :

Tableau III.2: Les valeurs de dureté HV (Vickers) des deux échantillons

Nº	Traité	Non traité
1	231	278
2	238	445
3	243	453
4	244	470
5	262	624
6	236	545
Moyenne	242	469

4.1.1 Echantillon non traité thermiquement :

La figure suivante représente les résultats de micro-dureté en fonction de la distance sur l'échantillon non traité.

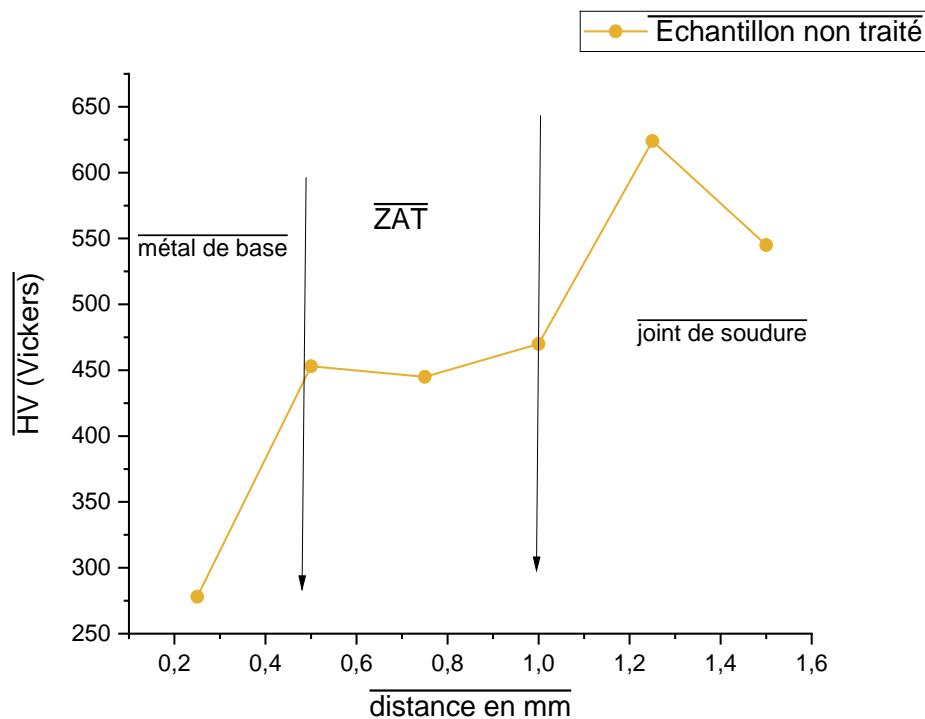


Figure III.7 : Le profil de dureté HV de l'échantillon non traité

Observation :

L'observation de la courbe de dureté pour l'échantillon non traité montre une forte variation de la dureté en fonction de la distance. On remarque :

Dureté élevé près de la zone soudée : au début de la courbe, la dureté est maximale dépassant 600 HV, ce qui indique une microstructure fortement contrainte et durcie par le soudage.

Diminution progressive : à mesure que l'on s'éloigne de la zone soudée la dureté diminue progressivement atteignant environ 250 HV à 1.5 mm, cela reflète une transition vers une microstructure plus détendue et moins contrainte.

4.1.2 Echantillon traité thermiquement :

La figure suivante représente les résultats de micro-dureté en fonction de la distance sur l'échantillon traité.

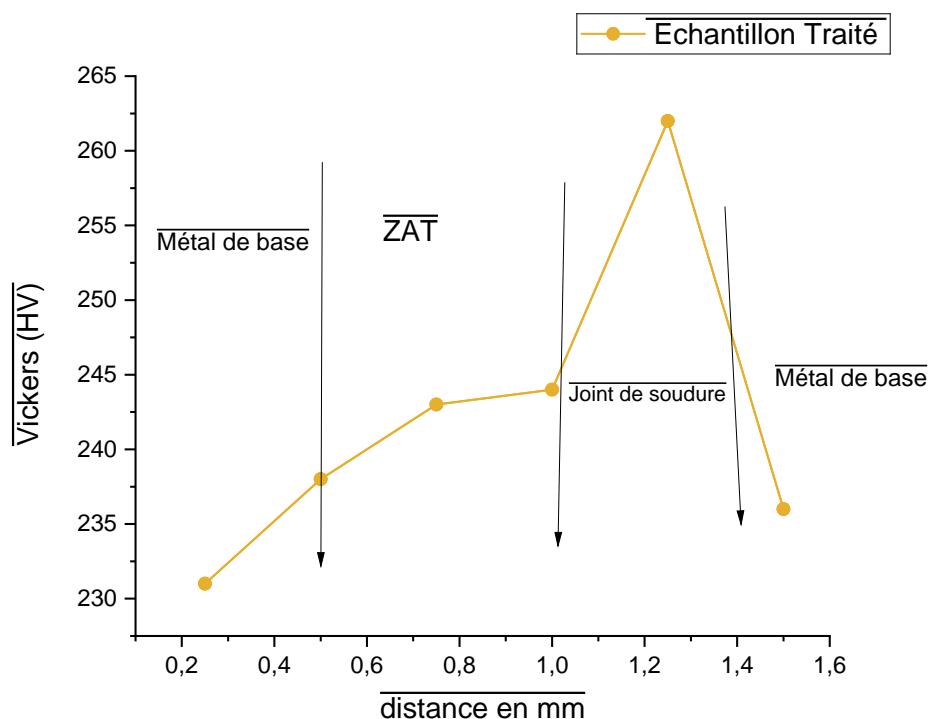


Figure III.8: Le profil de dureté HV de l'échantillon traité à 600 °C

Observation :

L'observation de la courbe de dureté pour l'échantillon traité thermiquement à 600°C révèle plusieurs tendances intéressantes :

Dureté initiale modérée (240 HV) : au début de la courbe (dans le métal de base), la dureté est relativement faible indiquant une microstructure détendue après le traitement.

Augmentation progressive : la dureté augmente légèrement avec la distance dans la zone du joint de soudure jusqu'à atteindre un pic 260 HV.

Diminution après le pic : au-delà du joint de soudure, la dureté redescend, montrant que la région affectée thermiquement atteint un état plus homogène et moins contraint.

Comparaison :

On compare les deux résultats, on remarque que l'échantillon non traité présente une dureté plus élevée grâce à sa microstructure à grains fins et aux contraintes résiduelles induites par le soudage.

A l'inverse, l'échantillon traité thermiquement montre une diminution significative de la dureté, conséquence directe du grossissement des grains et de la relaxation des contraintes. De plus, la transformation des phases vers des structures plus stabilisées et ductiles contribuent à cette baisse de dureté. Ainsi, le traitement thermique favorise une microstructure homogène mais moins résistante mécaniquement que l'état soudé initial.

4.2 Résultats résilience :

Des éprouvettes normalisées en acier S460N ont été préparées sous trois conditions : non soudées, soudées à sec et soudées sous l'eau. Des essais de résilience Charpy ont été réalisés à différentes températures (-20 °C, 0 °C et +20 °C). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.3: Résultats du test de résilience des deux éprouvettes dans différentes températures

Température (°C)	S450N Non soudé	S450N soudé à sec	S450N soudé sous l'eau
+ 20°C	75-82-79 M=78.66	80-83-82 M=81.66	50-48-43 M=47
0°C	60-71-67 M=66	60-69-71 M=66.66	35-38-43 M=38.66
- 20°C	28-20-31 M=26.33	35-33-32 M=33.33	28-31-35 M=31.33

Après avoir calculé la moyenne des valeurs de la résilience obtenu dans différentes températures. Les résultats sont sous forme d'histogrammes dans la figure ci-dessus :

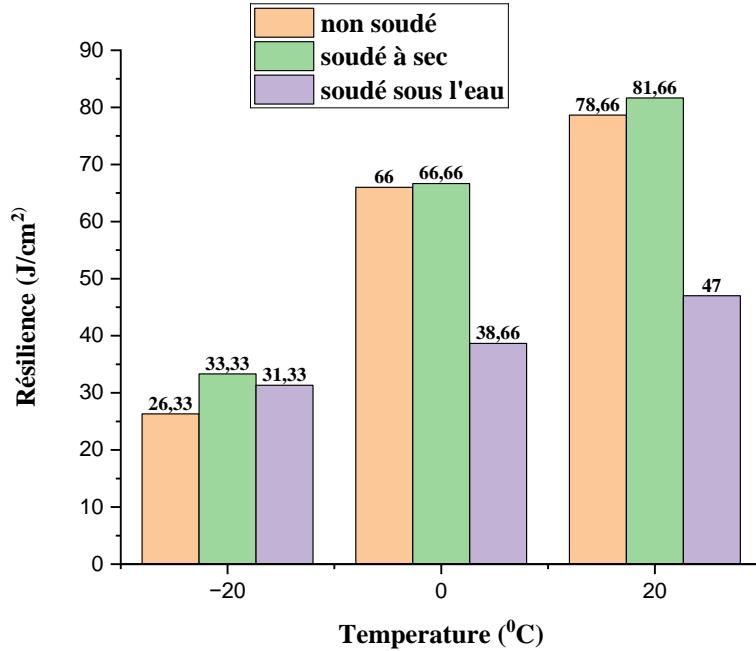


Figure III.9: Résultats du test de résilience des deux éprouvettes dans différentes températures

Interprétation des résultats :

L’analyse des essais de résilience effectués sur l’acier S450N, dans ses trois états : non soudé, soudé à sec et soudé en milieu marin à différentes températures, révèle une influence notable du procédé de soudage et des conditions thermiques sur le comportement à l’impact. De façon globale, on constate une diminution progressive de l’énergie absorbée à mesure que la température baisse, traduisant le passage d’un comportement ductile à un comportement fragile, phénomène caractéristique des aciers à structure ferritique.

À température ambiante (+20 °C), le matériau non soudé affiche une bonne résistance à l’impact, avec une énergie absorbée de 78 J. Curieusement, l’éprouvette soudée à sec atteint une valeur légèrement supérieure (81 J), ce qui peut s’expliquer par une modification favorable de la microstructure dans la zone affectée thermiquement (ZAT), liée à l’effet thermique local du soudage. Cette zone pourrait bénéficier d’un affinement structural comparable à un traitement thermique doux, améliorant la résilience. À l’inverse, la soudure réalisée sous l’eau montre une chute marquée de l’énergie absorbée (47 J), indiquant une microstructure plus fragile. Cette fragilité est vraisemblablement due au refroidissement brutal induit par l’environnement aqueux, qui favorise la formation de phases dures comme la martensite, connues pour leur haute dureté mais faible ténacité.

À 0 °C, le même comportement se confirme. Le métal de base et la soudure à sec présentent une résilience identique (66 J), ce qui suggère une stabilité relative de leur microstructure à cette température. En revanche, la soudure sous l'eau voit sa ténacité encore diminuée (37 J), ce qui illustre sa plus grande sensibilité à la fragilisation à basse température, probablement accentuée par des contraintes internes et des hétérogénéités microstructurales issues du soudage rapide.

Lorsque la température descend à -20 °C, la transition fragile devient manifeste pour tous les échantillons. La résilience du métal de base tombe à 26 J, tandis que les valeurs pour les soudures à sec et sous l'eau atteignent respectivement 33 J et 31 J. À ce stade, c'est principalement l'effet de la température qui domine, bien que la soudure à sec conserve une légère supériorité en termes de ténacité, probablement en raison d'une microstructure moins dure et plus homogène.

Ces tendances sont en accord avec les mesures de dureté Vickers (HV) réalisées. Le métal de base affiche une dureté modérée de 260 HV, en cohérence avec ses bonnes propriétés de résilience. Le joint de soudure non traité, en revanche, présente une dureté très élevée de 580 HV, indicatrice d'une structure martensitique ou fortement trempée — un phénomène courant dans les conditions de soudage en immersion, où le refroidissement est extrêmement rapide. Après un traitement thermique à 600 °C, la dureté du joint chute à 320 HV, traduisant une transformation partielle de la martensite en phases plus ductiles, ce qui peut contribuer à améliorer la ténacité du joint. Ce traitement post-soudage permet donc de réduire la fragilité induite par le soudage sous l'eau et de restaurer un meilleur équilibre entre dureté et résistance à l'impact.

4.3 Résultats du test d'immersion :

Le tableau ci-dessous représente le comportement de nos deux échantillons immergés dans une solution marine à 3.5% NaCl.

Tableau III.4: Résultats du test d'immersion

Temps (jours)	La masse (g)	La masse (g)
	Echantillon traité	Echantillon non traité
0	6.2895	4.7920
5	6.2899	4.7923
10	6.2946	4.7984
15	6.2922	4.7879
20	6.2905	4.7870
25	6.2862	4.7843
30	6.2767	4.7707

Après avoir calculé la perte de masse des deux échantillons à partir des résultats obtenus durant un mois d'immersion dans la solution marine, nous avons pu tracer les diagrammes suivants :

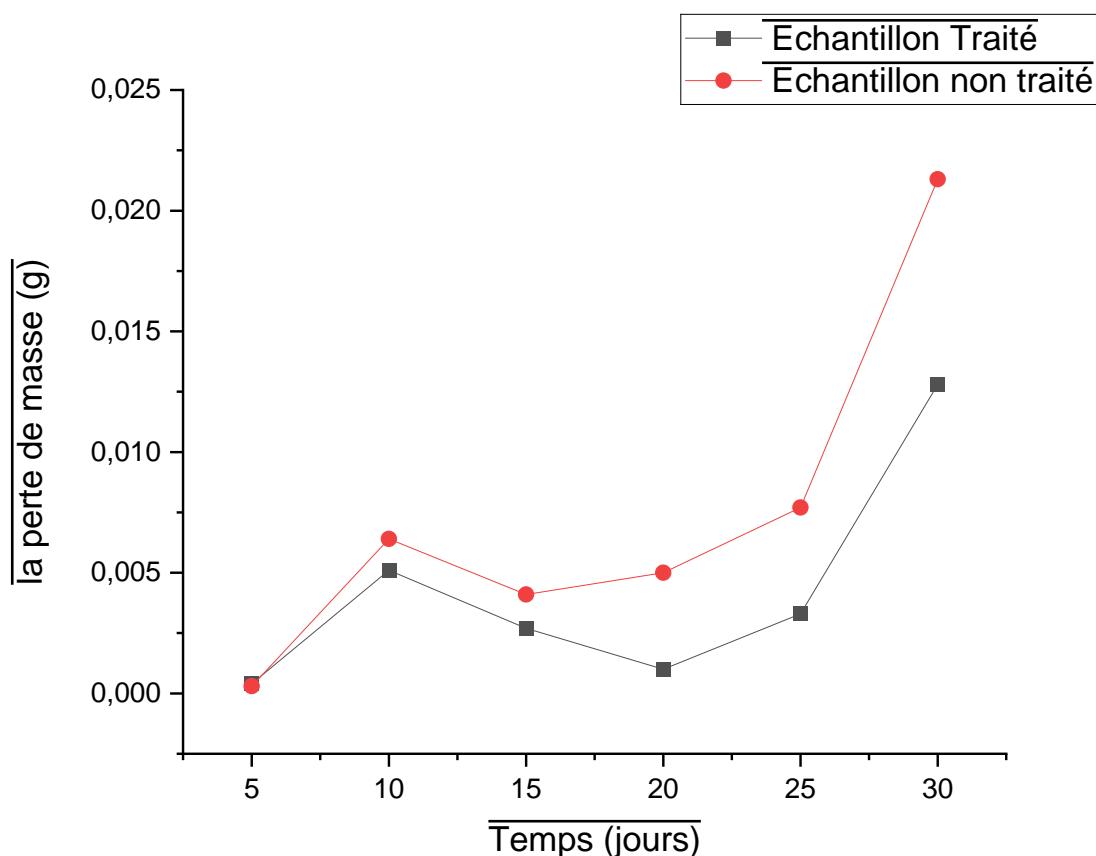


Figure III.10: La perte de masse en fonction du temps pour les deux échantillons (traité et non traité)

Observation : D'après les diagrammes, on observe une perte de masse au cours des dix premiers jours pour les deux échantillons, suivie d'un léger gain de masse durant les dix jours suivants. Enfin, au cours de la dernière dizaine de jours, une perte de masse significative est enregistrée, en particulier pour l'échantillon non traité, qui présente une dégradation nettement plus importante que celui ayant subi un traitement thermique.

Interprétation des résultats :

- Perte de masse de l'échantillon non traité : le diagramme montre une diminution progressive de la masse, confirmant que cet échantillon est plus vulnérable à la corrosion. Cela est probablement dû à la présence de porosités
- Gain de masse de l'échantillon traité : le diagramme montre une augmentation de la masse, suggérant une formation de dépôts à la surface du matériau. Cette stabilité pourrait être liée à la relaxation des contraintes et à la modification des phases après traitement thermique.
- Différence de comportement en corrosion : le traitement thermique semble avoir amélioré la résistance de l'échantillon traité, réduisant la dissolution du métal et favorisant une interaction avec les ions de la solution marine qui pourrait former des couches protectrices. Le diagramme confirme que l'état microstructurale joue un rôle clé dans la corrosion : l'échantillon non traité est plus réactif et perd de la masse, tandis que l'échantillon traité thermiquement montre un comportement plus stable, avec une possible formation de couche protectrice.

Les figures suivantes montrent la propagation de la corrosion sur le joint de soudure de l'échantillon non traité après cinq, dix, vingt et trente jours d'immersion :

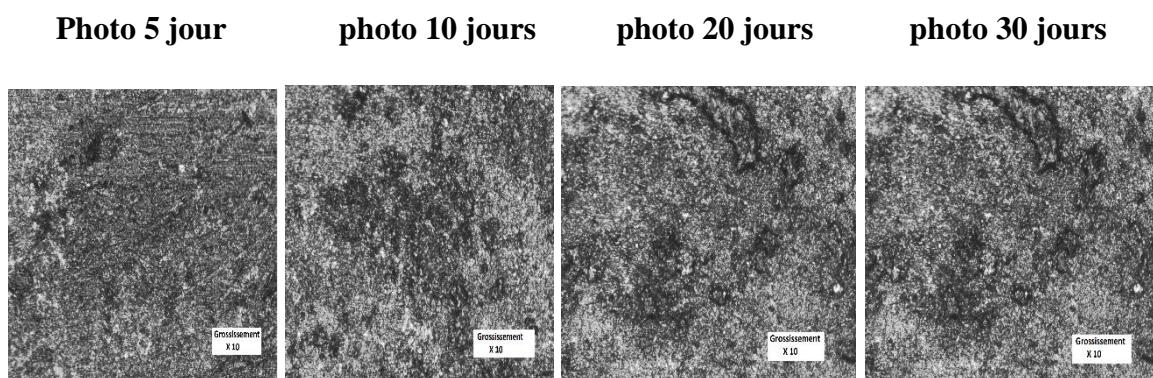


Figure III.11: Image microscopique de l'évolution de la corrosion en fonction du temps pour les échantillons non traits

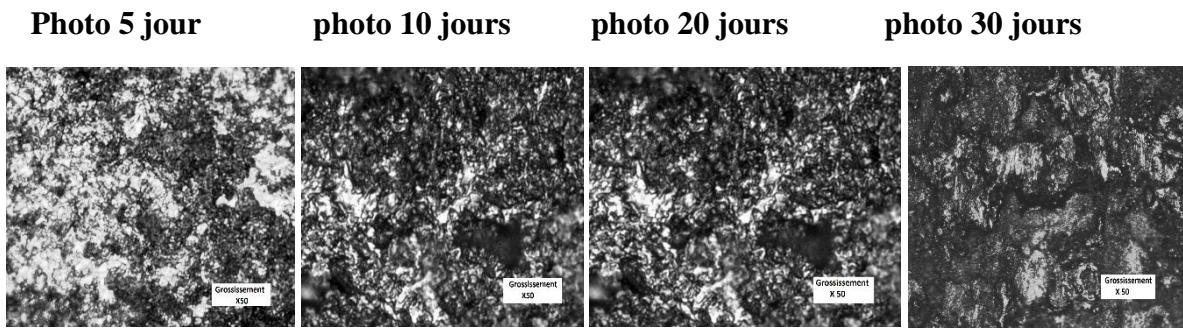


Figure III.12 : Grossissement x50 se la surface du joint de soudure de l'échantillon non traité

Observation : on observe des zones sombres et claire, une surface plane avec absence des trous ce qui indique que c'est une corrosion uniforme plutôt que localisé, ou la surface se dégrade de manière homogène sous l'effet de la solution marine.

Interprétation des résultats : la corrosion dans ce cas progresse de manière homogène sur toute la surface, avec une dissolution progressive du métal sous l'effet de l'oxydation électrochimique. La microstructure favorise cette dégradation généralisée sans zones de concentration spécifiques. Ce type de corrosion favorise une perte de masse constante, affectant l'intégrité globale du matériau

Les figures suivantes montrent la propagation de la corrosion sur le joint de soudure de l'échantillon traité après cinq, dix, vingt et trente jours d'immersion :

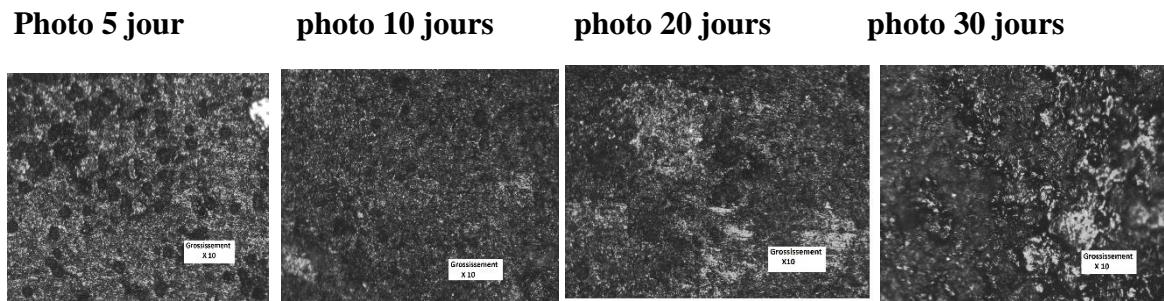


Figure III.13: Grossissement x10 se la surface du joint de soudure de l'échantillon traité

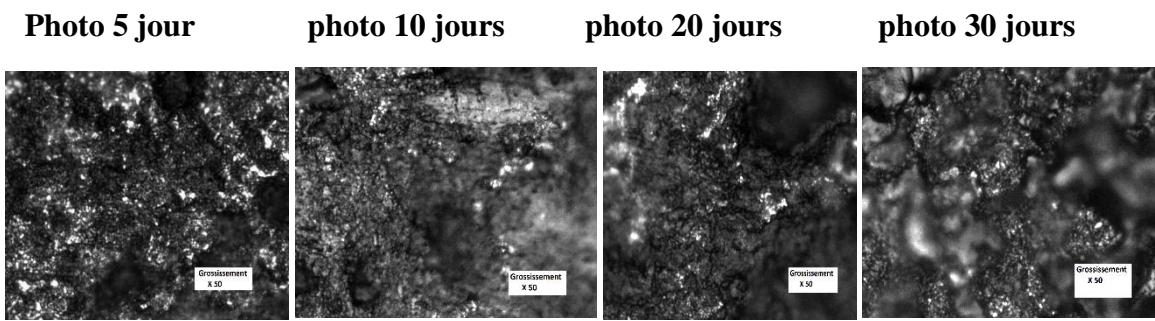


Figure III.14 : Grossissement x50 se la surface du joint de soudure de l'échantillon traité

Observation : on observe des zones sombres et irrégulières, caractéristique des piqûres formé par une attaque chimique ciblée. Ces trous indiquent une corrosion localisée, typique d'un environnement riche en ions de chlorure (Cl^-) dont il est trompé.

Interprétation des résultats : contrairement au non traité, celui-ci subit une corrosion par piqûres, caractérisé par des attaques localisées créant des petites cavités profondes remarquable.

Ce phénomène est dû à la redistribution des phases après traitement thermique, qui peut créer des hétérogénéités chimiques et l'apparition des zones plus réactives au ions chlorure. Les précipitations des carbures ou la modification des joints de grains peuvent également jouer un rôle en facilitant l'initiation des piqûres.

Comparaisons :

- L'échantillon non traité montre une corrosion uniforme, où la surface se dégrade de manière homogène sous l'effet de la solution marine, ce qui peut être attribué à une microstructure sous contrainte et une réactivité plus élevée des grains fins.
- L'échantillon traité thermiquement montre une corrosion par piqûres, caractérisé par des attaques localisées induite par les ions chlorure. Donc le traitement thermique a entraîné une stabilisation générale mais une sensibilisation accrue aux attaques chimiques localisé due au changement de sa microstructure et au grossissement des grains.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude vise à approfondir la compréhension des effets du traitement thermique appliqué à un échantillon soudé en acier S460N, en mettant en lumière les différences microstructurales et mécaniques entre un échantillon ayant subi un traitement thermique et un autre resté non traité. L'objectif est d'évaluer l'impact de ce traitement sur les propriétés du joint soudé, afin d'optimiser ses performances et sa durabilité.

A partir de ces résultats, nous pourrons conclure cela :

Les résultats DRX : La comparaison des résultats obtenus pour les deux échantillons permet de conclure qu'après traitement, une meilleure homogénéité des phases détectées est observée, se traduisant par la substitution des atomes de Titane qui remplace les atomes Fer dans la maille cristalline par un mécanisme de solution solide de substitution.

La micro-dureté : Les résultats de la micro-dureté ont montré que l'échantillon non traité thermiquement possède une dureté élevé surtout dans le joint de soudure ainsi que dans la ZAT conséquence d'un refroidissement brusque car le soudage est effectué dans l'eau.

La résilience : La résilience augmente avec la température, traduisant une amélioration de la ductilité et de la capacité d'absorption des chocs. Le soudage sous l'eau diminue cette résilience à température ambiante, probablement en raison de microstructures fragiles et de défauts internes.

Test d'immersion : L'échantillon non traité montre une corrosion plus importante que les échantillons traités ceci s'explique par une microstructure plus détendue et moins poreuse, ce qui réduit la réactivité avec le milieu marin.

Référence bibliographique

Références bibliographiques

- [1] : BENSAADA.S, Traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes. Université de Biskra, 2003.
- [2] : F. Sebaa et M. Rahou, Assemblages Soudés : Préparation aux examens IWT-Procédés et matériels de soudage, mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2020.
- [3] : A. Bachiri, Effets des traitements thermiques sur les contraintes résiduelles des joints soudés, mémoire de master, Université De M'silla, 2022.
- [4]: School of Mechanical Engineering, Shri Mata Vaishno Devi University (SMVDU), Katra, J&K, India, « ISSN 2278-0149 Vol 2, No 1 », Jan.2013.
- [5]: ROWE, M. et LIU, S. Recent developments in underwater wet welding. Science and Technology of welding and Joining, 2001, vol. 6, no 6, p. 387-396
- [6] : K. Chikhi, « Effet d'un traitement thermique sur les propriétés mécaniques et la résistance à la piqûration d'une soudure d'un acier à haute limite élastique API X52 dans un milieu industriel simulé », Ecole Nationale Polytechnique, Département de Métallurgie, 2014.
- [7] : RAZIKA, NAILI. L'effet de traitements thermiques sur le ZAT de l'acier de bouteille à gaz.
- [8] : I. Bouali, « Optimisation d'un paramètre de soudage à l'arc électrique des aciers », (mémoire de master), Université de Badji Mokhtar Annaba, 2022.
- [9] : B. anglade, H. Horsin molinaro et S. lavernhe, « Les principaux défauts et risques liés au soudage », Ecole normale supérieure paris-saclay, 2017.
- [10] : CSMOOFMI, Défauts de soudure, Chapitre 6,
- [11] Documents scientifiques et techniques, Les aciers à Haute Limite d'Elasticité, Octobre 2012
- [12] YOUNES RASSIM, cours traitement thermique, M1 génie des matériaux, université A/Mira Béjaia
- [13] BENDAOUDI Seif-Eddine, Cours Méthode Expérimentales Et Contrôle Des Matériaux, Centre Universitaire De Relizane
- [14] FORTUNIER, Roland. Comportement mécanique des matériaux. cours, ENS des Mines de Saint-Etienne, 2001, p. 214.

Références bibliographiques

- [15] KHIATI Zoulikha et MRAH Lahouari, Cours Corrosion Et Protection Des Métaux, Master 1 Hygiène Et Sécurité Industrielle, Université Des Sciences Et De La Technologie d'Oran - Mohamed BOUDIAF-Oran, 2022-2023.
- [16] ISO 6507-1 :2023 Norme internationale En vigueur Matériaux métalliques - Essai de dureté Vickers - Partie 1 : Méthode d'essai (2023).
- [17] ISO 148-1 : Essai de flexion par choc sur éprouvettes métalliques avec entaille selon Charpy (2016).
- [18] NF EN ISO 9224 : Corrosion des métaux et alliages - Corrosivité des atmosphères - Valeurs de référence relatives aux classes de corrosivité (2012).
- [19] NF EN 15305, Essais non-destructifs - Méthode d'essai pour l'analyse des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X (2009).

Résumé

Résumé :

Cette étude a pour objectif d'analyser les caractéristiques mécaniques et structurales de deux joints soudés en acier S460N réalisés en milieu marin. L'un des échantillons a subi un traitement thermique à 600 °C pendant deux heures, tandis que l'autre a été conservé à l'état brut après soudage. L'accent est mis sur le joint de soudure ainsi que la zone affectée thermiquement, en particulier sur le changement de la structure et de la microstructure sous l'effet du traitement thermique.

L'interprétation des résultats montre qu'après traitement thermique, une meilleure homogénéité structurale est obtenue grâce à la substitution des atomes de fer par ceux de titane. La micro-dureté plus élevée dans l'échantillon non traité est due au refroidissement brutal lors du soudage sous l'eau. Enfin, le traitement thermique améliore à la fois la résilience et la résistance à la corrosion en réduisant les défauts internes et la porosité.

Mots clé : soudage marin, caractéristiques mécaniques et structurales, micro-dureté et la corrosion.

Abstract:

The aim of this study is to analyze the mechanical and structural characteristics of two welded joints made of S460N steel in a marine environment. One of the samples was heat-treated at 600°C for two hours, while the other was preserved in its raw state after welding. The focus is on the weld seam and the heat-affected zone, in particular on the change in structure and microstructure under the effect of heat treatment.

Interpretation of the results shows that after heat treatment, better structural homogeneity is achieved thanks to the substitution of titanium for iron atoms. The higher micro-hardness in the untreated sample is due to sudden cooling during underwater welding. Finally, heat treatment improves both resilience and corrosion resistance by reducing internal defects and porosity.

Key words: marine welding, mechanical and structural characteristics, micro-hardness and corrosion.

ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل الخصائص الميكانيكية والهيكلية لوصلتين ملحوظتين من الفولاذ S460N المصنوع في البيئة البحرية. تمت معالجة إحدى العينات بالحرارة عند 600°C لمدة ساعتين، بينما تم الاحتفاظ بالأخرى خام بعد اللحام. وينصب التركيز على وصلة اللحام وكذلك المنطقة المتأثرة حرارياً، ولا سيما على تغير البنية والبنية المجهرية تحت تأثير المعالجة الحرارية.

ويبين تفسير النتائج أنه بعد المعالجة الحرارية، يتم الحصول على تجانس هيكلياً أفضل عن طريق استبدال ذرات الحديد بذرات التيتانيوم. ترجع الصلاية الدقيقة الأعلى في العينة غير المعالجة إلى التبريد المفاجئ أثناء اللحام تحت الماء. وأخيراً، تعمل المعالجة الحرارية على تحسين كل من المرونة ومقاومة التآكل عن طريق تقليل العيوب الداخلية والمسامية.

الكلمات المفتاحية: اللحام البحري، الخصائص الميكانيكية والهيكلية، الصلاية الدقيقة والتآكل.