



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie chimique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Fatma zohra Faizi
Le : 30/09 /2020

Amélioration des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier soudé

Jury :

Dr	Chérifi-Bennadji Nedjema	MCA	Université de Biskra	Président
Dr	Digheche Kelthoum	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mme	Slimani Assia	MAA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le bon Dieu pour le courage et la patience qu'il nous a offert pour aboutir à la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères et profonds remerciements pour mon enseignante et mon encadreur Madame **DIGHECHE Kelthoum** qui n'a épargné aucun effort pour me diriger durant la réalisation de ce travail, je lui très reconnaissant pour la patience dont il a fait preuve le long de ce projet.

Je tiens remercie à Dr- **CHERIFI Nedjma** d'avoir accepté de président le jury de la soutenance.

Je témoigne également ma reconnaissance à Dr- **SLIMANI Assia** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, nos remerciements aux tous mes enseignants et toute l'administration de département de chimie industriel ainsi que toutes les personnes qui m'a aidé durant la période de mon cursus.

Faizi Fatma Zohra

Dédicace

Je dédie ce mémoire À:

Mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi

À qui m'a été le soutien moral pendant ce projet À Mon

Collègue chaima.

À mes frère

À ma sœur

Mon fiancé

Ma petite princesse mima

À mes meilleurs amies.....

Marwa, Noura, Selma, Warda, Sabrine, Khadija

À Tous La Famille faizi et monibe.

À tous mes collègues du Département de Génie procédé .

FATMA

Sommaire

Sommaire

Sommaire.....	i
Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	1
Introduction générale.....	1

Partie bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I.1. Introduction.....	2
I.2. Historique sur les aciers.....	2
I.3. Définition de l'acier.....	2
I.4. Diagramme d'équilibre.....	2
I.4.1. Diagramme de phases fer-carbone.....	2
I.4.2. Les différentes phases du diagramme Fer – Carbone.....	4
I.4.2.1. La ferrite α	4
I.4.2.2. La ferrite δ	4
I.4.2.3. L'austénite γ	4
I.4.2.4. La cémentite.....	4
I.5. Structures des aciers.....	5
I.6. Classification des aciers.....	6
I.6.1. Les aciers au carbone d'usage général.....	6
I.6.2. Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.....	8
I.6.3. Les aciers à outils.....	8
I.6.4. Aciers inoxydables.....	8
I.7. Influence des éléments d'alliage.....	9

Sommaire

I.8.Soudabilité des aciers.....	10
I.9. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers.....	11
I.9.1. La dureté.....	11
7.9.2. L'essai de traction.....	11
<i>Chapitre II : Soudage des aciers</i>	
II.1. Introduction.....	12
II.2. Historique sur le soudage.....	12
II.3. Définition du soudage.....	12
II.4.structure d'un joint soudure (Détails métallurgiques sur les différentes zones d'un assemblage soudé).....	13
II.4.1 Le métal de base (M.B).....	13
II.4.2 La zone fondue (Z.F).....	13
II.4.3 La zone thermiquement affectée (Z.A.T).....	13
II.4.4 Zone de liaison.....	14
II.5. Procédés de soudage.....	14
II.6.Soudage à l'arc.....	16
II.6.1.Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	17
II.6.1.1.Définition.....	17
II.6.1.2. Avantages et inconvénients.....	19
II.6.1.2.Applications.....	19
II.7. Aspect chimique.....	20
II.8. Aspect thermique du soudage.....	21
II.9. Cycles thermiques du soudage.....	22
I.8.Traitements thermiques de l'acier.....	23

Partie pratique

Sommaire

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1. Introduction.....	25
III.2. Matériaux étudiés.....	25
III.3. Choix de procéder.....	25
III.3. Préparation métallographique des échantillons	26
III.3.1. Découpage.....	26
III.3.2. Traitements thermiques	28
III.3.3. Polissage.....	29
III.3.4. L'attaque chimique.....	30
III.4. Les technique d'analyse utilisée.....	30
III.4.1. Microscope optique.....	30
III.4.2. Essai de la micro dureté.....	31

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction.....	33
IV.2. Caractérisation microstructurale.....	33
IV.2.1. Micrographie de métal de base avant et après traitement thermique.....	33
IV.2.2. Micrographie de métal de base avant et après traitement thermique.....	34
IV.2.3. Micrographie de la zone fondue avant et après traitement thermique.....	35
IV.3. Caractérisation de micro-dureté.....	38
Conclusion générale.....	42
Références bibliographiques.....	44

Liste des figures

Figure	Titre	Page
I.1	Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone	3
I.2	Transformation allotropique du Fer	4
I.3	Microstructure d'un acier hypoeutectoïde	5
I.4	Structure perlitique	5
I.5	Microstructure d'un acier hypereutectoïde	6
II.1	Représentation schématique du joint soudé	13
II.2	Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie	15
II.3	Principe de soudage par pression	16
II.4	soudage à l'arc	17
II.5	Soudage à l'arc avec électrode enrobé	18
II.6	Electrode enrobée durant le soudage	18
II.7	Cycle thermique de soudage et principaux paramètres de refroidissement	22
II.8	Cycle thermique des étapes de réduction des solutions solides	23

III.1	échantillons à soudé avec soudage manuel à arc électriques	26
III.2	Découpage de l'échantillon avec une scie électrique	27
III.3	les échantillons de l'étude	27
III.4	Lissage des échantillons	28
III.5	Four électrique	29
III.6	Polisseuse	30
III.7	Microscope Optique type OLYMPUS	31
III.8	La Microduromètre	32
IV.1	Micrographie de métal de base avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures	33
IV.2	Micrographie de la zone affectée thermiquement avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures	34
IV.3	Micrographie de la zone fondue (Pass 1) avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures	36
IV.4	Micrographie de la zone fondue(Pass 2) avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures	37
IV.5	Micrographie de la zone fondue (pass 3) avant et apres traitement thermique a 400°c pendant 2 heures	38

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
I.1	Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés	7
III.1	composition chimique de l'acier utilisé (% massique)	25
III.2	composition chimique de l'électrode utilisée (% massique)	25
IV.1	Les valeurs de la micro dureté (pass 1)	39
IV.2	Les valeurs de la micro dureté (pass 2)	40
IV.3	Les valeurs de la résistance mécanique (pass 1)	40
IV.4	Les valeurs de la résistance mécanique (pass 2)	41

Introduction générale

Introduction générale

Parmi les matériaux métalliques utilisés, Les aciers sont largement utilisés dans les différentes branches de l'industrie. On les trouve assemblés par soudage, destinés à la production, au transport et au stockage des produits pétroliers.

Le soudage est un procédé d'assemblage, qui a pour but la création de la continuité physique entre deux éléments métalliques de telle sorte que l'assemblage réalisé satisfait en tout point aux exigences relatives à ses propriétés.

Actuellement, l'industrie pétrolière porte un grand intérêt à la caractérisation de des pipelines soudé, ce type d'assemblage soudé se distingue par des zones non homogènes, ou les microstructures et les caractéristiques mécaniques très déférentes, il est alors nécessaire de les identifier lors de l'installation du réseau de gazoducs ou oleoduc.

Le but de ce travail est l'étude de l'effet de traitement thermique sur les comportements microstructuraux et mécaniques d'un joint soudé en acier X70. Les échantillons soudés ont été réalisés au niveau de société nationale de transport par canalisation (COSIDER, base Oumech-Biskra), Ces échantillons ont été assemblés par soudage manuel à l'arc électrique, avec électrodes enrobées (SMAW).

Ce mémoire contient quatre chapitres, précédé par une introduction générale pour préparer ce qui sera traité :

- ✚ Chapitre I : Généralités sur les aciers.
- ✚ Chapitre II : Soudage des aciers.
- ✚ Chapitre III : Partie expérimentale.
- ✚ Chapitre IV : Résultats et discussions.

Et en fin nous avons résumé ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités sur les
aciers

I.1. Introduction

Les aciers sont d'une importance capitale puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est dû qui permettent de varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers à la présence d'une vaste gamme de transformation en recourant à l'addition d'éléments d'alliage et aux différents mécanismes, thermiques et chimiques [1].

I.2. Historique sur les aciers

D'aciers extrêmement anciens qui est probablement la première forme d'utilisation des métaux ferreux. C'est en effet vers 1000 ans avant J.C. que semble remonter la découverte de ces aciers grâce à la technique de la cémentation et à l'art de la trempe, qui ont été trouvés par hasard, le fer absorbant du carbone au contact des matières organiques qui servaient à le chauffer pour le marteler [2].

I.3. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un acier allié [3].

I.4. Diagramme d'équilibre

I.4.1. Diagramme de phases fer-carbone

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles.

La figure I.1 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et

traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région [4].

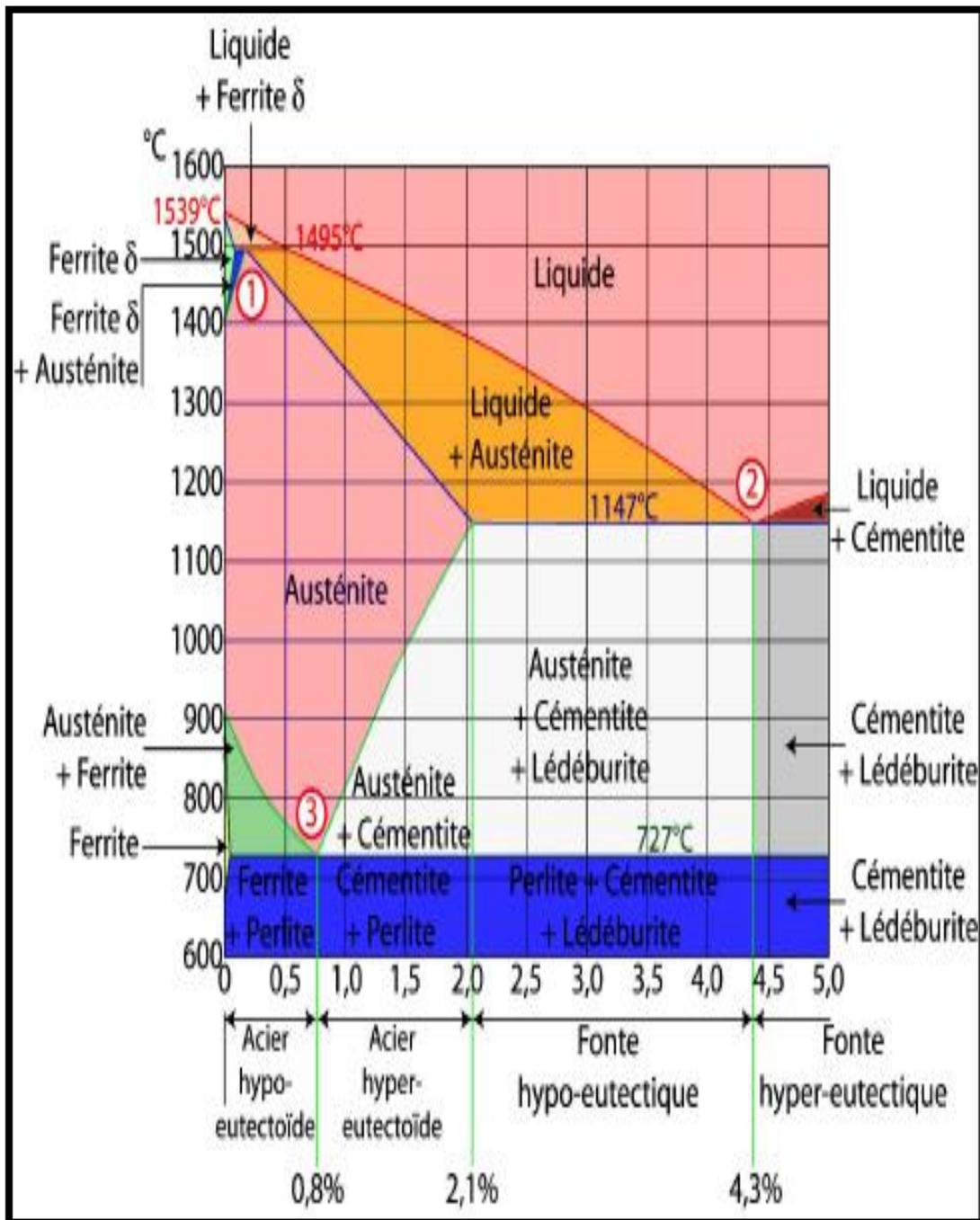


Figure I.1 : Diagramme de phases des alliages Fer-Carbone [5].

I.4.2. Les différentes phases du diagramme Fer – Carbone

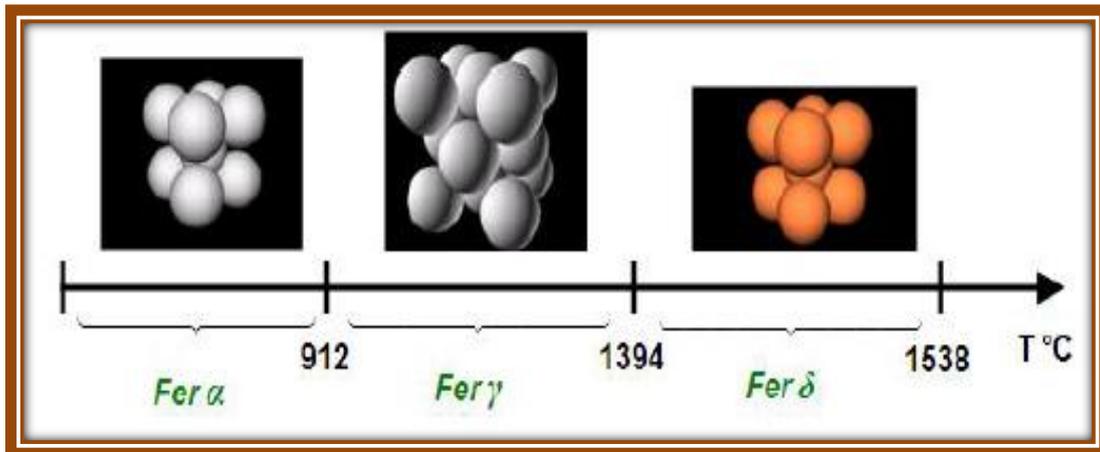


Figure I.2 : Transformation allotropique du Fer [6].

I.4.2.1. La ferrite α

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ($HB \approx 80$), peu tenace ($R \approx 300$ MPa), mais très ductile ($A \approx 35\%$) [7].

I.4.2.2. La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centrée CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone [7].

I.4.2.3. L'austénite γ

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%C$ à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile [7].

I.4.2.4. La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile [7].

I.5. Structures des aciers

On distingue trois types d'aciers, selon la teneur en carbone:

- ❖ **L'acier du type hypoeutectoïde** : (%C compris entre 0,002% et 0,85%) formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans une phase ferritique [8].

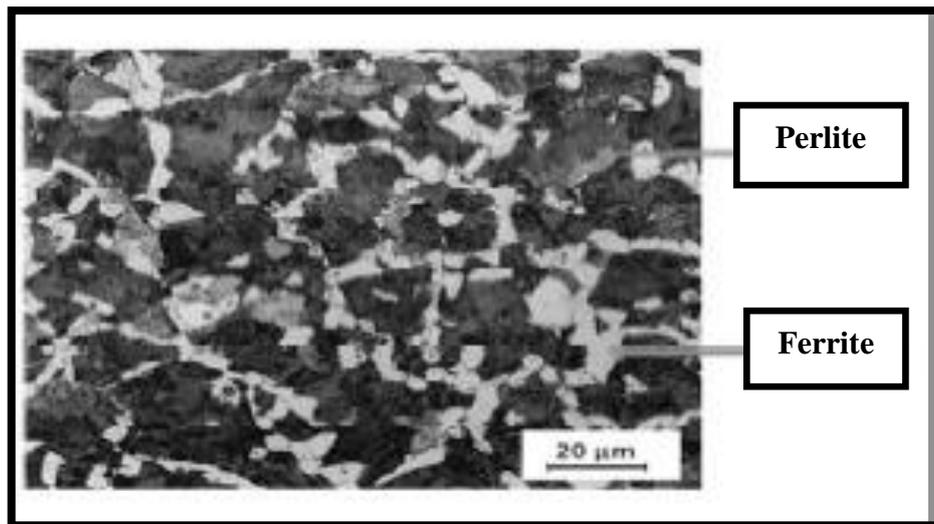


Figure I.3 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde [8].

- ❖ **L'acier du type eutectoïde** : (%C = 0,85%) formé de 100% perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles [8].

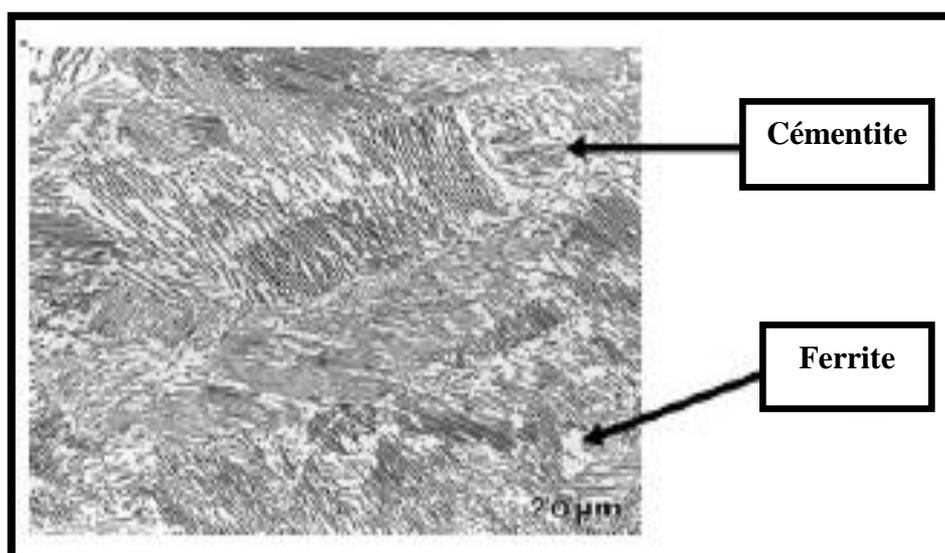


Figure I.4 : Structure perlitique [8].

- ❖ **L'acier du type hypereutectoïde:** (%C = [0.85% - 2.1%]) formé de perlite (ferrite α + cémentite Fe_3C) caractérisée par une structure en lamelles enveloppée dans de la cémentite [8].

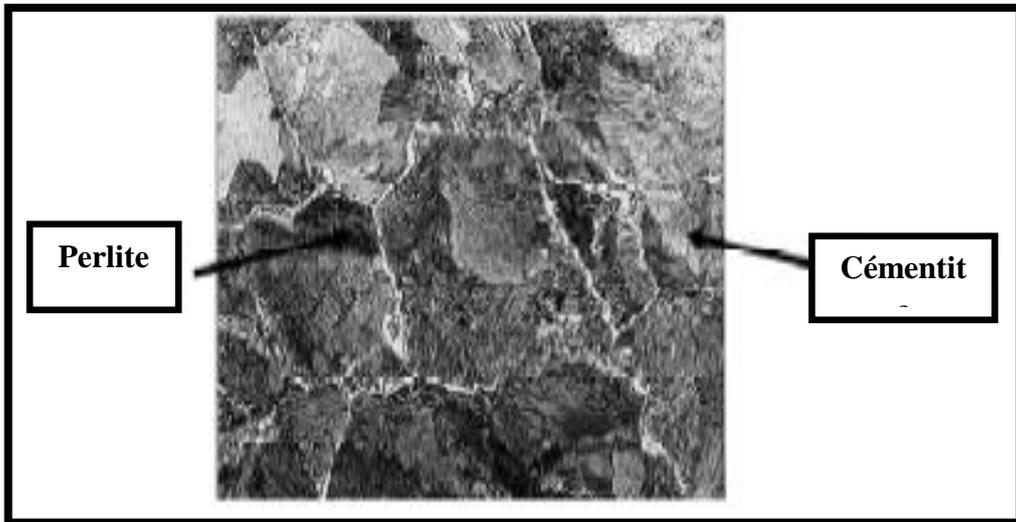


Figure I.4 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde [8].

I.6. Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation.

L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers [9] :

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.
- Les aciers à outils.
- Les aciers inoxydables.

I.6.1. Les aciers au carbone d'usage général

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (Tableau I.1). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %),

phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers.

Tableau I.1 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés [7].

Nuance	Pourcentage De carbone(C)	Résistance R_m (Mpa) Etat recuit	Emplois
Extra-doux	$C < 0.15$	330-420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie Pièces de forge
Doux	$0.15 < C < 0.20$	370-460	Charpente métalliques, profiles, construction mécaniques, courante, boulons, fils ordinaire
Demi-doux	$0.20 < C < 0.30$	480-550	Pièces de machines pour application mécaniques. Pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
Demi-dur	$0.30 < C < 0.40$	550-650	Pièces outillage, élément de machines agricoles, organe de transmission
Dur	$0.4 < C < 0.60$	650-750	Pièces outillage d'armement, glissières, rails et bandages , ressorts, coutelleries, Pièces moulées et traités
Extra-dur	$0.60 < C$	< 750	Outils d'usinage et découpe, câbles , ressort

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes [7] :

- la trempabilité.

- la soudabilité.
- la tenue à chaud.
- la résistance à l'usure et à la corrosion.

I.6.2. Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.

On définit les aciers de traitements thermiques par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur application en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitements thermiques sont soit des aciers au carbone sans autres éléments d'additions que des éléments standard Mn et Si, soit des aciers alliés contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'additions (Cr, Ni, V,...) [7].

I.6.3. Les aciers à outils

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé n peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage, mais par exemple en Amérique plus de 75 nuances [7].

I.6.4. Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont essentiellement des alliages Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni à teneur en carbone variant de 0,02 à 1 %. La résistance à la corrosion est due au chrome qui en présence d'un milieu oxydant forme à la surface de l'acier une couche complexe protectrice qui rend le métal passif, permettant ainsi la protection de ce dernier des milieux agressifs. Notons que la teneur en Chrome doit être supérieure ou égale à 10,5 %. D'autres éléments tels que "Ni, Mo, N, S, Si, Nb....." Sont ajoutés afin d'améliorer les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion ou encore pour favoriser certaines structures par rapport à d'autres.

*Les différents types d'aciers inoxydables [7]:

- Les aciers inoxydables ferritiques.
- Les aciers inoxydables austénitiques.
- Les aciers inoxydables austéno-ferritique(DUPLEX).
- Les aciers inoxydables martensitiques.

I.7. Influence des éléments d'alliage

La métallurgie actuelle fait de plus en plus appel à des aciers ayant des caractéristiques de plus en plus complexes. Si l'ajout de certains éléments confère à ces aciers des propriétés intéressantes, ceux-ci vont modifier les réactions au soudage (ZAT).

Quant aux impuretés, elles jouent toujours un rôle important sur les résultats mécaniques. Les principaux éléments d'addition utilisés dans ce genre d'application sont :

- ❖ **Carbone (C)** : C'est l'élément prépondérant lors du soudage. Quoique nécessaire pour augmenter la résistance à la rupture, son rôle sera à la fois actif et défavorable. Son influence sur l'effet de trempe du métal de base et dans la ZAT est importante. Il peut agir seul, mais très souvent en relation avec d'autres éléments trempant tels que le Mn; Cr et Mo par exemple [10].
- ❖ **Manganèse (Mn)** : Comme pour le carbone, il augmente la résistance à la traction mais ne diminue pas l'allongement. Par son rôle désoxydant, les caractéristiques sont donc améliorées. Il confère à l'acier une forte résistance aux chocs et à l'usure. Dans le cas des aciers ordinaires, sa teneur varie de 0,3 à 0,9% et pour les aciers à haute limite élastique (HLE) de 1 à 1,8% [10].
- ❖ **Chrome (Cr)** : Le chrome est un élément dont on doit tenir compte lors du soudage. Élément trempant très actif, c'est la raison pour laquelle sa teneur reste inférieure à 1% dans les aciers au carbone, de la classe des soudables. A forte teneur en (C) et de (Cr), les aciers sont durs et résistent à l'usure [10].
- ❖ **Nickel (Ni)** : Sans conférer un rôle trempant aux aciers, il améliore les propriétés générales. Allié au chrome, il constitue les aciers inoxydables. Il est utilisé dans les aciers autotrepant allié au (Cr) et au (C) et surtout dans les aciers travaillant à basse température (3 à 9% et $t^{\circ} \approx -190^{\circ}\text{C}$) [10].
- ❖ **Molybdène (Mo)** : Très actif au point de vue trempe, élément noble. Dans les aciers de construction, la teneur est en générale de 0,5 à 1%, dans ce cas, il augmente la résistance à chaud (fluage) et diminue les risques de fragilité. Il améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables (ex. tuyauterie véhiculant de l'UREE dans l'industrie chimique) [10].
- ❖ **Cuivre (Cu)** : Toujours à faible teneur (0,5%), il améliore la résistance à la corrosion à l'eau de mer (ex. palplanches). Il provoque néanmoins des porosités lors du soudage avec des électrodes de qualité médiocre [10].

- ❖ **Silicium (Si)** : Agent désoxydant, se retrouve en faible pourcentage ($\leq 0,2\%$) sans influence néfaste. Au-delà, il augmente la résistance à la traction, mais diminue l'allongement [10].
- ❖ **Aluminium (Al)** : Affine le grain, il est retenu dans la composition du métal d'apport pour le soudage oxy-acétylénique des aciers. C'est un désoxydant efficace [10].
- ❖ **Titane (Ti)** : Il s'oppose à la trempabilité à l'air des aciers au chrome courants. C'est un élément puissant de résistance à la surchauffe. Il combat la précipitation du (C) et réduit la corrosion inter granulaire. Il donne une meilleure résistance à chaud à l'oxydation (soudures). C'est un agent stabilisant dans les aciers inoxydables [10].
- ❖ **Niobium (Nb)** : Même avantage que le titane mais beaucoup moins volatile, il le remplace donc dans les métaux d'apport lors du soudage [10].
- ❖ **Phosphore (K)** : augmente fortement la trempabilité et la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu des soudures [10].

I.8. Soudabilité des aciers

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de la quelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement [11].

Comme on peut le remarquer, la soudabilité n'est pas mesurable et dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- La nuance de l'acier (notamment la composition chimique réelle et complète).
- Les caractéristiques dimensionnelles (notamment l'épaisseur et les formes des pièces à souder).
- Le mode opératoire de soudage (notamment le procédé de soudage).
- Le traitement thermique éventuel du joint soudé.
- Les conditions de service.

La valeur du carbone équivalent qui est donné par la formule suivante :

$$C_{eq}(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu^3}{15} \dots \text{(Eq I. 1)}$$

I.9. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers

Parmi eux :

I.9.1. La dureté

Elle s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. En effet, à l'aide d'une bille, d'un cône ou d'une pyramide appliquée sur l'acier avec une force déterminée on peut calculer la dureté de l'acier, mais aussi mettre en évidence plusieurs propriétés de l'acier, comme sa résistance à la déformation, ou encore la capacité de durcissement par déformation (écrouissage). Les duretés des métaux ne peuvent être comparées que s'ils sont déterminés avec la même charge et la même méthode [12].

7.9.2. L'essai de traction

Il consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge d'acier progressivement de plus en plus grande jusqu'au moment de la rupture. Le moment à partir duquel le métal subit une déformation est appelé la limite élastique. La rupture, qu'on appelle la charge de rupture, est la charge maximale que peut supporter un acier sans subir de modification. Une fois ces limites atteintes, on mesure la section initiale de l'éprouvette en méga Pascals (MPa).

On mesure aussi l'allongement de l'éprouvette au moment de la rupture, et la striction qui est le rapport entre la section de l'éprouvette au niveau de la rupture et de sa section initiale. Un acier doux, qui est celui le plus répandu a une charge de rupture proche de 350MPa, mais il est courant d'utiliser des aciers dont la charge de rupture dépasse les 1000MPa. A l'heure actuelle, nous sommes capables de créer des aciers spéciaux résistant à des charges de plus de 3000Mpa [12].

Chapitre II :
Soudage des aciers

II.1. Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [14].

II.2. Historique sur le soudage

Pendant le Moyen Âge, l'art des chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produits en utilisant la technique du martelage /soudage. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les procédés de soudage évoluent peu, c'est vers 1850 qu'on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

Fin XIX^e siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés [15]:

- Le soudage oxyacétylénique.
- Le soudage aluminothermique.
- Le soudage à l'arc électrique.
- Le soudage par résistance.

Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920.

II.3. Définition

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents [16].

II.4. Structure d'un joint soudure (détails métallurgiques sur les différentes zones d'un assemblage soudé)

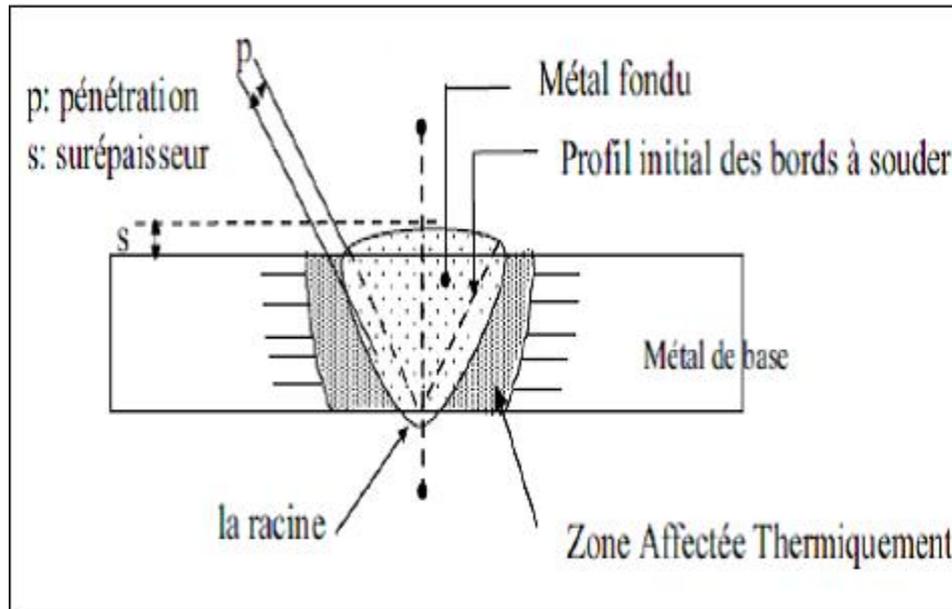


Figure II.1 : Représentation schématique du joint soudé [17].

II.4.1. Le métal de base (M.B)

Il constitue le métal des pièces à assembler, Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature légèrement différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques. L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensible aux changements de phases par précipitations [18].

II.4.2. La zone fondue (Z.F)

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport, le métal qui constitue la soudure est appelée métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé [18].

II.4.3. La zone thermiquement affectée (Z.A.T)

C'est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur du soudage.

Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique.

Dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas eu transformation allotropique, mais seulement modification, par exemple, de la grosseur de la forme des grains du métal. La zone thermiquement affectée comporte différentes parties, on distingue [18] :

- ✓ zone de surchauffe.
- ✓ zone austénitique.
- ✓ zone partiellement austénitisée.

II.4.4. Zone de liaison

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone thermiquement affectée (Z.A.T). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui a été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage (fig.1).

Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base [18].

II.5. Procédés de soudage

La grande variété des procédés de soudage existants peut être classée en fonction de la nature des énergies mises en œuvre (Figure II.2) [19].

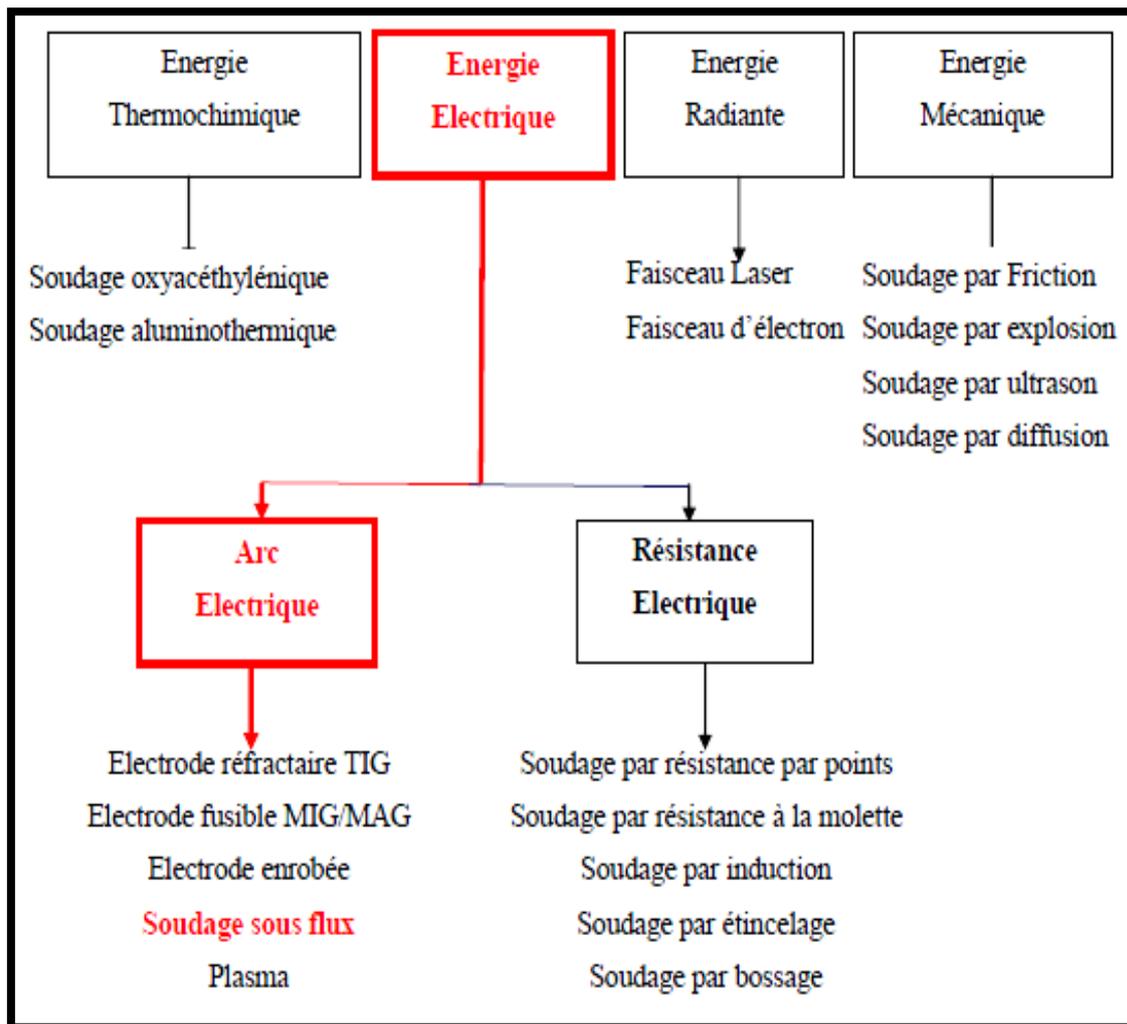


Figure II.2 : Procédé de soudage selon les différentes sources d'énergie [19].

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

✚ Soudage par pression

Le soudage par pression (Figure II.3), regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage [20].

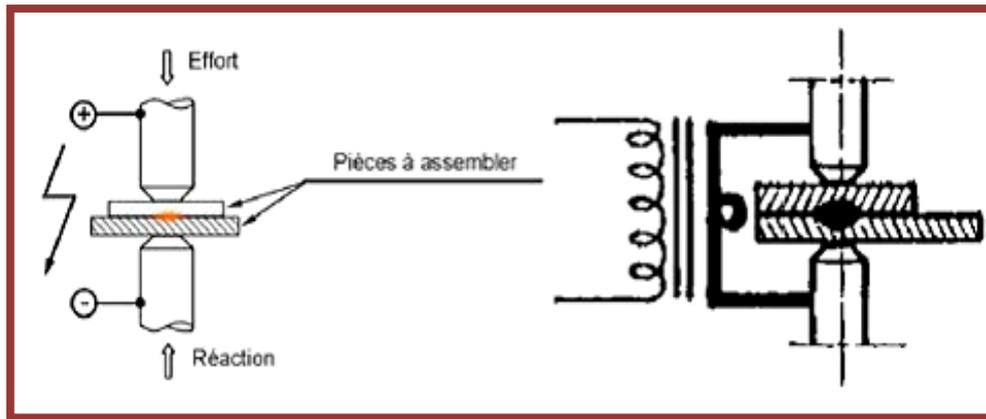


Figure II.3: Principe de soudage par pression [20]

✚ Soudage par fusion

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

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont [20] :

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

II.6. Soudage à l'arc

La soudure à l'arc est utilisée pour l'assemblage des pièces en acier, en fer, en inox ou même en fonte ayant une épaisseur supérieure à 1,5 mm.

La formation du bain de métal fondu est assuré par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternatif qui provoque la fusion d'une électrode de métal d'apport dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont proches du métal de base des deux pièces à souder, cette fusion assure la liaison après le refroidissement des éléments entre eux.

L'arc doit s'amorcer facilement et reste stable par le réglage de la tension d'amorçage suffisante et emploi de corps émissifs dans l'enrobage ainsi que la protection avec un milieu gazeux adapté qui favorisant le soudage Ce procédé regroupe les types de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont [21] :

- Le soudage avec électrode enrobées.

- Le soudage avec électrode réfractaire TIG.
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.
- Le soudage vertical sous laitier.

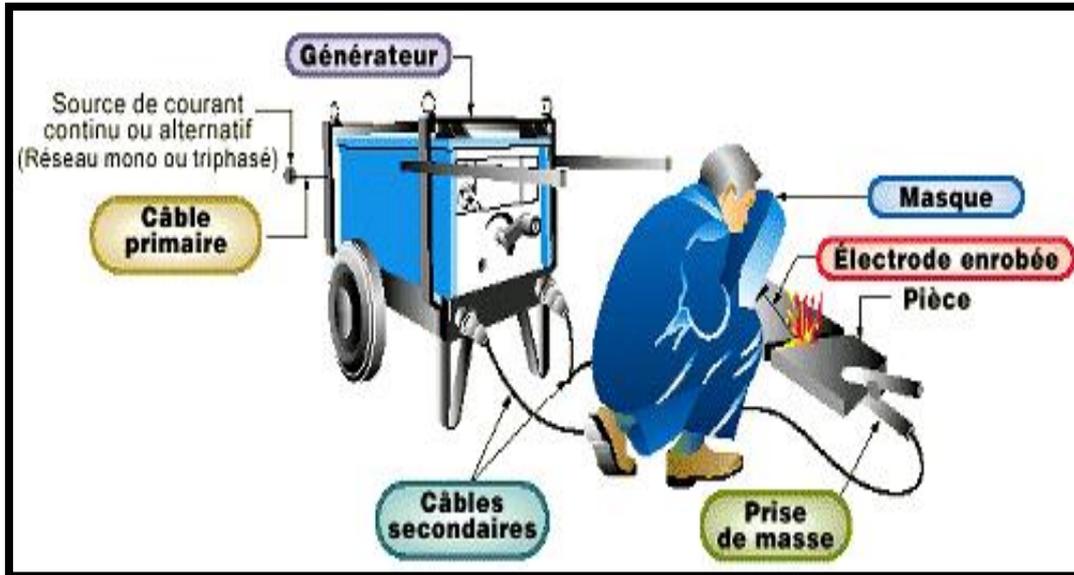


Figure II.4 : soudage à l'arc [22].

II.6.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

II.6.1.1. Définition

Se conduisant à la main et appelé également soudage manuel (Manual Metal Arc Welding, MMA). L'électrode enrobée est formée d'une âme métallique, généralement identique au métal constituant la pièce à souder, entourée d'un enrobage d'une autre substance. Selon les besoins de limiter l'oxydation rendant le cordon poreux et la nitruration diminuant sa résilience, l'enrobage peut être un oxydant, un acide, un basique ou un cellulosique.

Il a pour but de faciliter l'amorçage de l'arc, protéger le métal et le cordon contre toute réaction avec l'air, ainsi que stabiliser et guider l'arc grâce à un retard à la fusion [23].

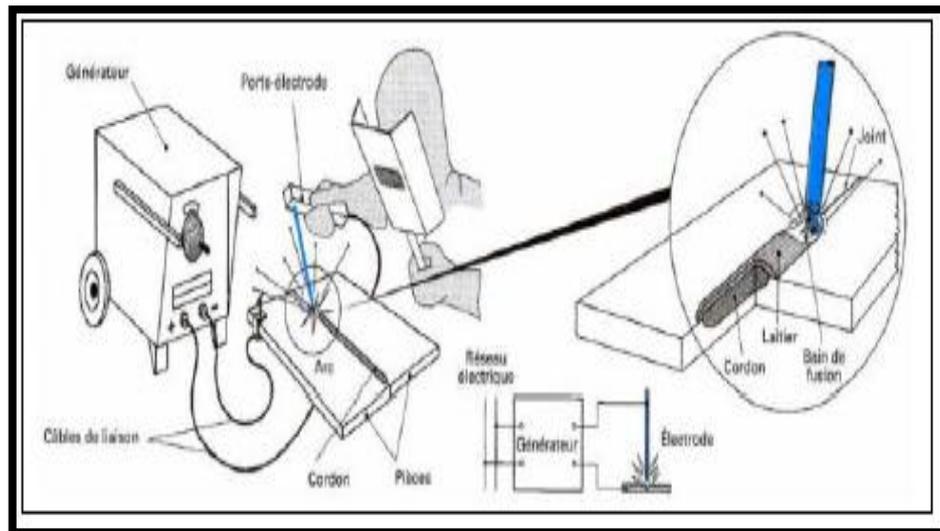


Figure II.5 : Soudage à l'arc avec électrode enrobé [21]

L'électrode est constituée de deux parties distinctes [21] :

- **L'âme** : partie métallique (métal d'apport) située au centre de l'électrode pour conduire le courant électrique.
- **L'enrobage** : partie extérieure adhérent à l'âme qui dépose lors de sa fusion un laitier protecteur contre l'action de l'air ambiant, son rôle est d'assurer la stabilité et la continuité de l'arc et d'apporter les éléments chimiques d'addition nécessaires pour la formation de bain du métal fondu (Figure II.6).

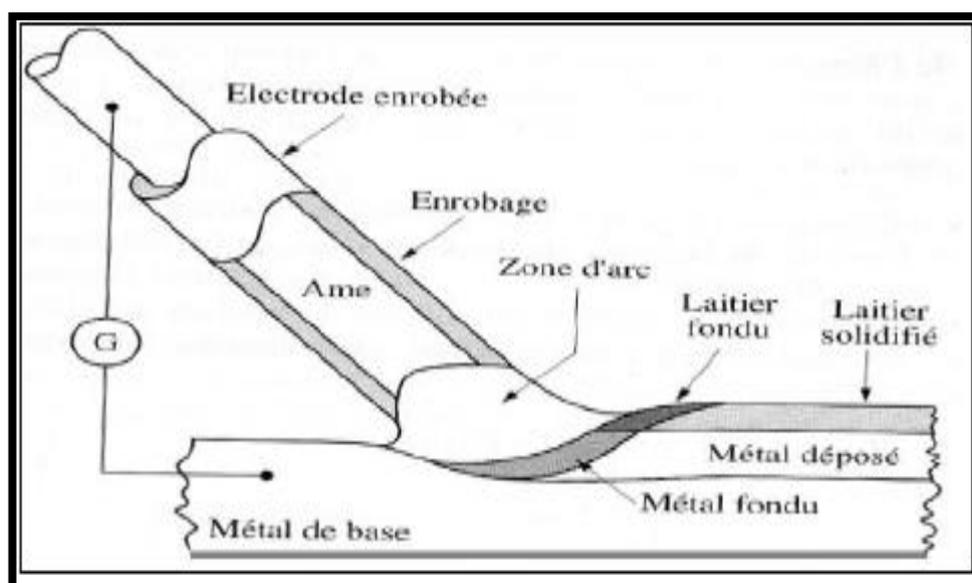


Figure II.6 : Electrode enrobée durant le soudage [21]

II.6.1.2. Avantages et inconvénients**Avantages**

- Le soudage à l'électrode enrobée est une technique de soudage très répandue [23].
- Encombrement du poste à souder réduit : avantage sur chantier [23].
- Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux [24].
- Le SMAW peut atteindre une bonne pénétration.

Inconvénients

- Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire [24].
- Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V [24].

II.6.1.2. Applications

Hormis quelques tentatives de mécanisation ou d'automatisation, le soudage à l'électrode enrobée est un procédé exclusivement manuel qui se rencontre en pratique dans tous les domaines industriels dont il satisfait les besoins à quelques réserves près. Il revêt en effet une simplicité et une flexibilité inégalées grâce à [10] :

- Un équipement on ne peut plus simple.
- Une électrode enrobée qui, sous une forme pratique et d'acquisition facile, véhicule le métal d'apport et la protection, et rassemble les paramètres métallurgiques, unique adaptation de ce procédé à la nature des travaux et des matériaux mis en œuvre, principalement les métaux ferreux. Ces avantages sont à opposer aux inconvénients.
- D'un fonctionnement cadencé.
- D'une capacité et d'une productivité limitée.

C'est ainsi qu'il s'impose [10] :

- Dans les travaux de soudage surtout lorsqu'ils sont très diversifiés : chaudronnerie générale, serrurerie, mécano-soudure.
- Sur les chantiers : ponts, navires, pipelines, charpentes, etc., dans des travaux de nature hautement technique. Mieux que le chalumeau ou tout autre procédé (il n'a pas le problème des bouteilles de gaz sous pression), il est le moyen typique des petits travaux d'entretien ou d'amateur pour lesquels se sont développés des générateurs, ou postes, légers à faible facteur d'utilisation (30 à 40 %). On trouve des électrodes travaux courants chez tous les quincailliers.

II.7. Aspect chimique

C'est à juste titre que, aux différences près dues à la brièveté de l'opération de soudage, à tout le moins le soudage par fusion, a pu être comparé à une opération d'élaboration, en raison de l'évolution qui se produit dans la composition chimique du métal fondu. On peut citer les causes d'évolution de la composition chimique du métal fondu soit par le comportement de ses éléments constitutifs soit au contact du milieu qui l'environne (gazeux ou liquide) soit encore en présence du milieu solide constitué par le métal de base lui même.

a) Au niveau du métal fondu proprement dit et de ses éléments constitutifs, la température élevée atteinte durant l'opération peut être à l'origine d'une perte en éléments par volatilisation, perte qui doit être compensée par les additions ou par un mode opératoire approprié. D'autre part, durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques sont susceptibles de se produire entre éléments présents, qu'ils proviennent du métal de base lui même ou du métal d'apport mis en œuvre.

De telles réactions se traduisent par une évolution des propriétés, mécaniques ou autres et éventuellement par une altération de la compacité, s'il y a formation de composés insolubles ou dégagement de gaz.

b) Dans le même temps le métal fondu est susceptible d'être chimiquement influencé par le milieu gazeux qui l'environne, si un tel milieu existe. C'est bien, à l'origine, le souci de protéger le métal fondu contre l'action néfaste de l'oxygène et de l'azote de l'air qui a conduit à l'élaboration des enrobages et des flux, qui produisent un laitier liquide qui sépare le métal fondu de l'atmosphère, puis à l'utilisation de gaz complètement protecteurs

tels que l'argon, ou partiellement protecteurs, tels que l'anhydride carbonique ou les mélanges de ce gaz avec de l'argon.

En fait, les gaz énumérés ci-dessus ne sont les seuls à intervenir, et nous aurons en particulier à examiner, à d'autres points de vue, le rôle de l'hydrogène dans le soudage de l'acier ou d'autres alliages.

c) La recherche d'une protection de bain de fusion contre l'atmosphère environnante, ainsi que d'un moyen d'y incorporer des éléments susceptibles d'intervenir, a conduit à la mise au point, des enrobages d'électrodes et des flux qui, au moment de la fusion produisent une phase liquide nommée laitier qui réagit au contact du bain de fusion et en fait évoluer la composition. Il y a donc bien élaboration, mais comme on l'a dit, il s'agit d'une opération rapide, hors des conditions normales d'équilibre.

d) Enfin, on a déjà mentionné le fait qu'au contact du métal de base solide qui lui sert de support, une proportion plus ou moins importante de métal de base s'incorpore, par sa propre fusion, au métal fondu. Ainsi se trouve définie la dilution, dont la valeur dépend d'une part du procédé de soudage, par la pénétration qui lui est propre, d'autre part, pour chaque procédé, du mode opératoire [25].

II.8. Aspect thermique du soudage

Au cours du soudage à l'arc, l'effet thermique est prépondérant et est caractérisé par [26] :

- Un rapide changement de température (élévation de température et refroidissement).
- Un faible temps de maintien de la température maximale.
- Une localisation de points chauds entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.
- Une importante énergie de soudage régissant le cycle thermique et induisant dans la structure une zone fondue et une zone affectée thermiquement.

Le cycle thermique résultant du procédé est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon la composition chimique du matériau, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou ductile.

II.9. Cycles thermiques du soudage

La connaissance du cycle thermique de soudage permet de prévoir les évolutions du métal de base et du métal fondu. Les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser le cycle thermique en condition de soudage sont (Figure II.7) [27] :

- Le tr_{500}^{800} : temps de refroidissement entre 800° et 500°C, utilisé par l'Institut International de Soudure (I.I.S.).
- Le Δt_{300}^{700} : temps de refroidissement entre 700° et 300°C utilisé par l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (I.R.S.I.D.).
- Le Δt_{100}^{300} : temps de refroidissement entre 300° et 100°C utilisé par la plupart des laboratoires japonais.
- Le $Vr\ 300$: vitesse de refroidissement instantanée à 300°C utilisée par certains aciéristes.

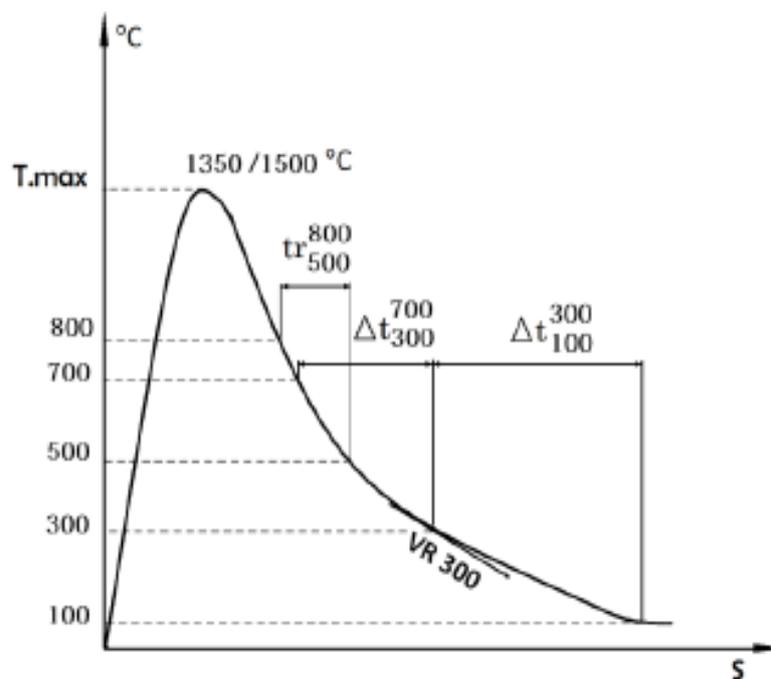


Figure II.7 : Cycle thermique de soudage et principaux paramètres de refroidissement [27].

Du point de vue métallurgique, le cycle thermique, près de la ligne de fusion se traduit chronologiquement par [27]:

- ✓ L'austénitisation de la structure initiale.
- ✓ La mise en solution des précipités.
- ✓ La croissance du grain austénitique.

- ✓ La transformation de l'austénite en refroidissement continu.

I.10. Traitements thermiques de l'acier

La notion de traitements thermiques recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de température convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières. Il peut s'y ajouter simultanément des traitements mécaniques (traitements thermomécaniques) ou des traitements chimiques (traitements thermo-chimiques).

On rencontre également des traitements thermiques au cours du refroidissement d'une pièce moulée après solidification et pendant des opérations de mise en forme par déformation plastique, par frittage ou par soudage, etc., quand des transformations structurales, sous l'influence des variations de température au cours de ces opérations, s'ajoutent à celles que ces procédés peuvent eux-mêmes provoquer.

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps (Figure II.8) [28].

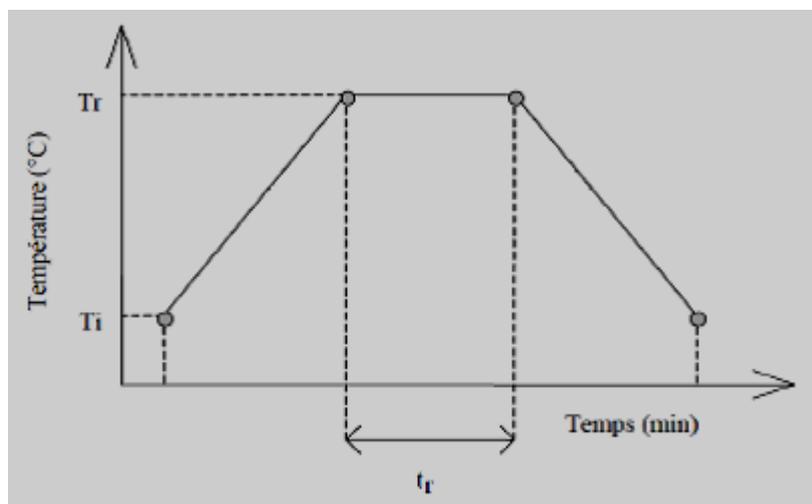


Figure II.8 : Cycle thermique des étapes de réduction des solutions solides [28].

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont [29]:

- ❖ Le recuit.
- ❖ La normalisation.
- ❖ La trempe.
- ❖ Le revenu.

Trempe

Les aciers peuvent être soumis à un traitement thermique, soit la trempe, qui augmente leur dureté. Lorsqu'on trempe un acier, on le chauffe à une température assez élevée pour changer sa structure interne. Une quantité supplémentaire de carbone est absorbée dans le métal, puis on le refroidit rapidement (généralement dans un bain de trempe constitué d'huile). C'est au moment du refroidissement que le durcissement se produit. Un refroidissement rapide amène l'acier à durcir [22].

Revenu

Le revenu est un traitement thermique qui est souvent associé à la trempe. On l'utilise pour augmenter la résistance aux chocs de l'acier trempé, tout en conservant sa dureté. Le revenu s'effectue en chauffant la pièce à des températures plus basses. À mesure que le métal est chauffé [22].

Recuit

Le recuit vise l'effet contraire de celui de la trempe. On chauffe l'acier à une température un peu moins élevée et on le refroidit lentement. Cela permet de retrouver la structure initiale. Le taux de refroidissement ne doit pas dépasser 50 °C/h et on doit prévoir au moins 24 heures pour refroidir la pièce [22].

Normalisation

La normalisation vise à rendre la structure de l'acier plus homogène et est tout indiquée après un soudage ayant requis beaucoup de chaleur, et ce, dans le but d'éliminer les tensions internes. Pour normaliser une pièce, on la chauffe à 40 ou 50 °C au-dessus de sa température de transformation et on conserve cette température une heure pour chaque 25 mm d'épaisseur de la pièce. Ensuite, on la laisse simplement refroidir à l'air libre [22].

Chapitre III :

Partie expérimentale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons le matériau étudié et les différentes techniques expérimentales utilisées pour notre étude. nous avons choisi l'acier X70, L'acier utilisé pour la fabrication des pipelines a considère Biskra.

III.2. Matériaux étudiés

Dans ce travail, nous avons utilisé un acier micro-allié et à faible pourcentage de carbone, le tableau suivant donne la composition chimique de cette acier :

Tableau III.1 : composition chimique de l'acier utilisé (% massique).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo
0.064	0.204	1.573	0.015	0.001	0.055	0.192	0.029	0.031	0.007	0.135
	7		4	5	3	2	1	9		3

Le tableau III.2 donne la composition chimique de l'électrode utilisé au cour de l'opération de soudage.

Tableau III.2 : composition chimique de l'électrode utilisée (% massique).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo
0.05	0.32	0.87	0.013	0.006	0.03	0.71	0.039	0.01	0.01

III.3. Choix de procéder

Les soudures qu'on a utilisées dans notre étude ont été réalisées à l'industrie de COSIDER canalisation. Dans leurs ateliers, deux tubes d'acier X70 sont assemblés par soudage à l'arc électrique, selon le procédé de SMAW« soudage avec électrodes enrobées» (Figure III.1).

- **Procédé de soudage (SMAW)**

Le procédé de soudage à l'arc est un procédé de soudage manuel qui utilise des baguettes enrobées appelées électrodes ou encore baguettes qui sont enduites d'un enrobage (Flux) pour déposer du métal en fusion sur des pièces métalliques.

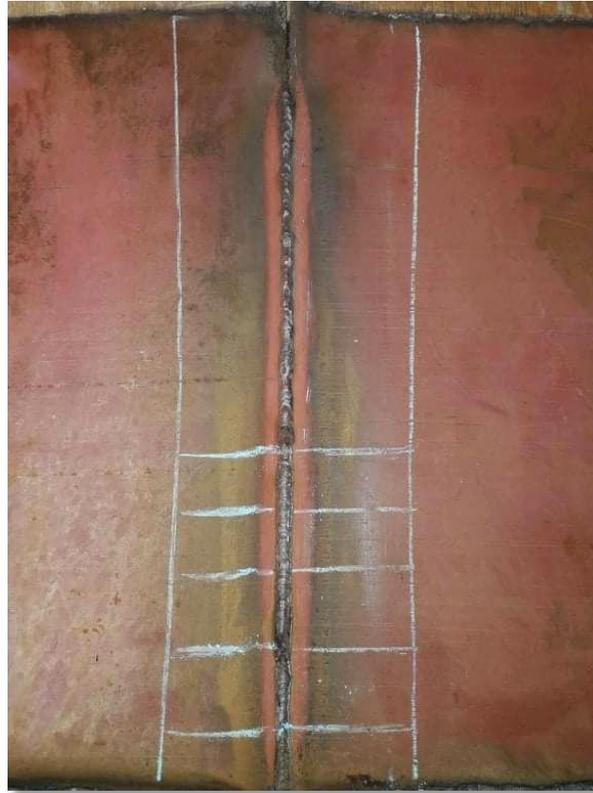


Figure III.1 : échantillons à soudé avec soudage manuel à arc électrique.

III.4. Préparation métallographique des échantillons

III.4. 1. Découpage

Le découpage s'effectue à froid à l'aide d'une scie avec une tasse d'eau collante pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau. Les échantillons sont découpés de manière transversale de longueur 4 cm (Figure III.2).



Figure III.2: Découpage de l'échantillon avec une scie électrique



Figure III.3 : les échantillons de l'étude.



Figure III.4 : Lissage des échantillons.

III.4.2. Traitements thermiques

Le traitement thermique c'est une opération très important qui visent à modifier la microstructure de l'acier, lui donnant ainsi de nouvelles caractéristiques.

Pour cette étude, nous prenons deux échantillons soudés :

- On laisse un échantillon comme référence (sans traitement thermique).
- Nous avons réalisé un traitement thermique sur un autre échantillon, la température choisie est 400°C pendant un durée de 2 heures.

Pour le chauffage d'échantillon, on a utilisé un four (Figure III.5) qui permet d'obtenir une température uniforme.



Figure III.5 : Four électrique.

III.4.3. Polissage

C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable et celui d'un miroir. Dans cette opération on utilise une polisseuse de type (MECAPOL P 310) (Figure III.6), et les papiers abrasifs sur les disques tournants ; pour éviter le frottement d'échantillon sur les papiers abrasifs qu'il provoque l'échauffement local on jet l'eau.

- Ce polissage s'effectue par l'utilisation des papiers abrasifs de différentes granulométries (80, 100, 120, 180, 240, 320, 600, 800, 1000 et 1200).
- La durée de polissage à chaque granulométrie est 6-8 minutes.
- Après polissage, on passe à l'étape de finition par un tissu et la pâte diamantée.



Figure III.6 : Polisseuse

III.4.4. L'attaque chimique

Pour les observations au microscope optique. Nous avons attaqué chimiquement la surface polie par le Nital (solution alcoolique-nitrique) de composition :

- 4 ml d'acide nitrique HNO_3 .
- 96 ml d'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

La durée d'attaque varie entre 20 et 45 secondes.

Les échantillons ont ensuite lavé par l'eau distillée et bien séchés pour l'observation.

III.5. Les technique d'analyse utilisée

III.5.1. Microscope optique

La microscopie optique nous permet déterminer la microstructure d'un échantillon c'est-à-dire la taille des grains, ainsi que leur forme, les évolutions microstructurales des alliages ayant subi des traitements thermiques peuvent être utilisés. La structure peut être modifiée par tous les traitements thermomécaniques, et chimiques que subit le métal on dehors des transformations physico-chimiques qui peuvent découler de ces traitements.

Les microscopes optiques métallographiques permettent l'observation par réflexion d'une surface métallique parfaitement plane, obtenue par polissage mécanique et ayant subi les traitements thermiques appropriés. On colore différemment les phases composant les alliages étudiés par un réactif.



Figure III.7 : Microscope Optique type OLYMPUS.

III.5.2. Essai de la micro dureté

L'essai de la micro-dureté est largement utilisé sur les métaux. Il caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui.

Ainsi, pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible. Il existe trois principaux type d'essais de dureté, qui diffèrent essentiellement par la forme du pénétrateur : l'essai Brinell, l'essai Vickers et l'essai Rockwell.

Pour notre étude, nous avons utilisé pour les mesures de la dureté une machine Microduromètre Vickers de marque Zwick roell indentec (Figure III.8).



Figure III.8 : Microduromètre [2].

Ce type de dureté est déterminé par la relation suivante :

$$HV = 0.189 F / d^2 \quad \dots \text{(Eq III. 1)}$$

Où :

F : la charge appliquée.

d : la diagonale de l'empreinte (μm).

Chapitre IV :
Résultats et
discussions

IV.1. Introduction

Ce chapitre regroupe les résultats expérimentaux obtenus avec différentes techniques de caractérisation.

La première partie des résultats concerne l'analyse microstructurale des joints soudés d'acier X70 étudié par la microscopie optique (MO) avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2heurs au niveau des différentes zone de joint soudé qui sont le métal de base (MB), la zone affectée thermiquement et la zone fondue, cette dernière contient trois sept zones de soudage (Pass1 et Pass 2 et Pass 3).

IV.2. Caractérisation microstructurale

IV.2.1. Micrographie de métal de base avant et après traitement thermique

L'observation au microscope optique du métal de base a montré une structure ferrito-perlitique. D'autre part, on constate bien des colonies de perlite mais avec une quantité plus faible par rapport à la phase ferritique car notre acier a un faible pourcentage de carbone (Figure IV.1.A). Après le traitement thermique à 400°C pendant 2 heures nous avons remarqués une diminution de la taille des grains.

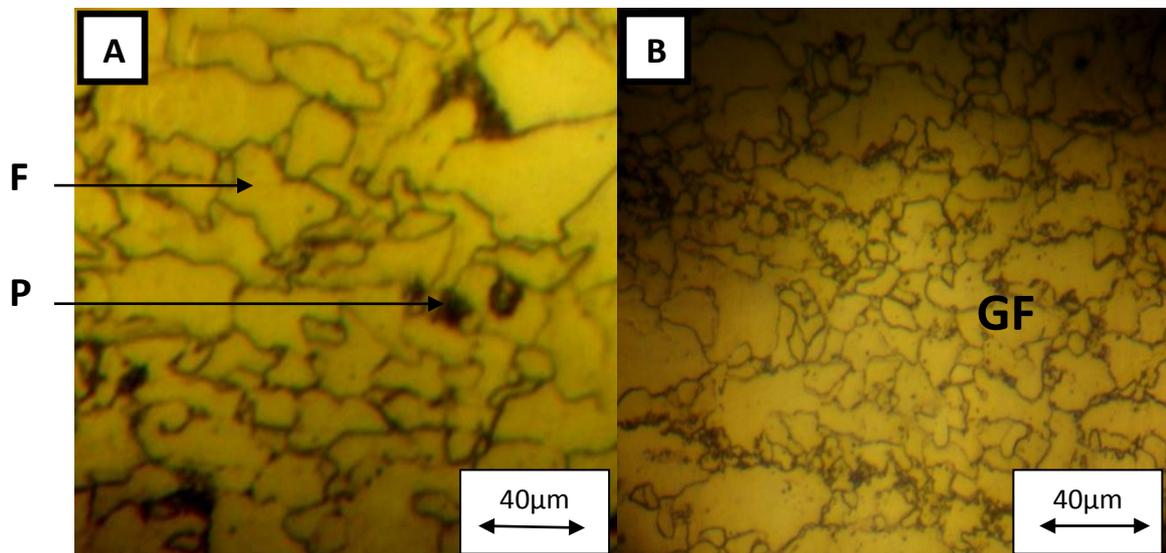


Figure IV.1: Micrographie de métal de base avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures.

IV.2.2. Micrographie de métal de base avant et après traitement thermique

La zone affectée thermiquement, au même titre que la zone fondue, les microstructures apparaissantes lors de la première passe peuvent changer de façon notable par les passes suivantes (Pass1, 2 et 3). La (Figure IV.2) représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement en première passe. Les passes ont révélé les phases suivantes: Ferrite Equiaxe (FE) et faible proportion de perlite.

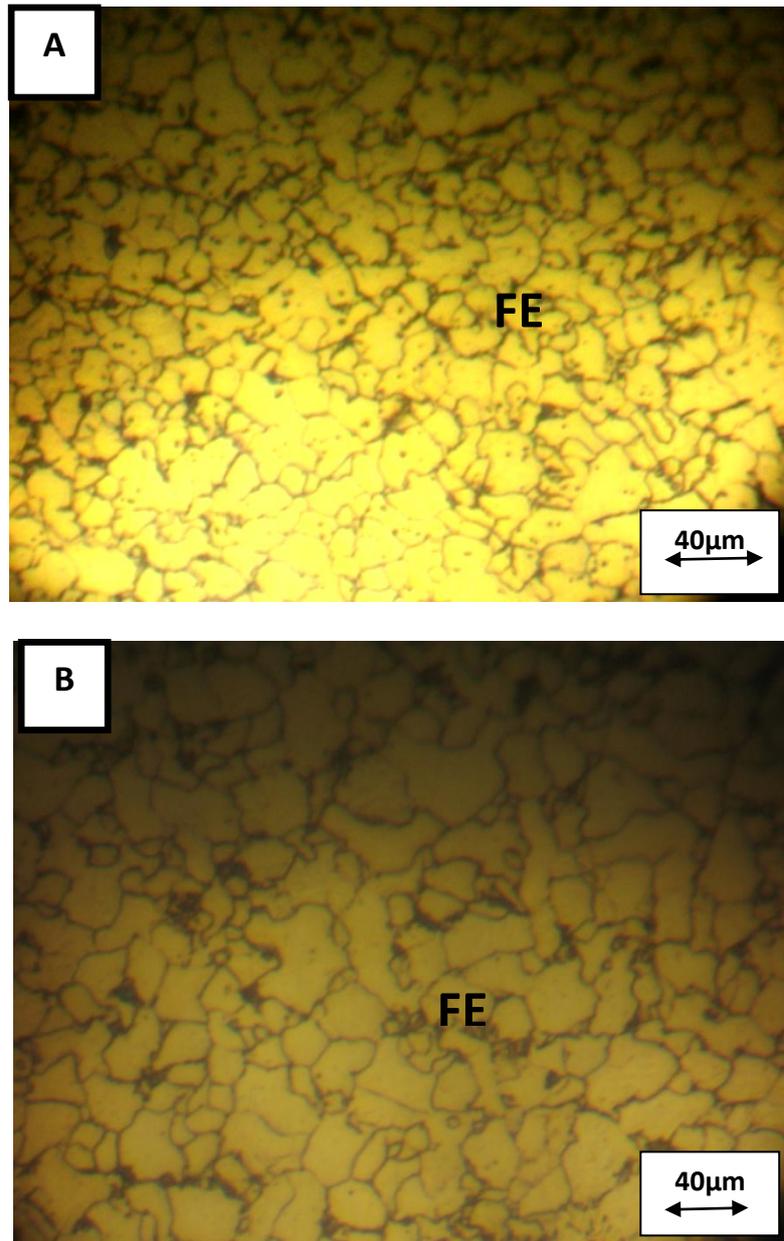


Figure IV.2 : Micrographie de la zone affectée thermiquement avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures.

IV.2.3. Micrographie de la zone fondue avant et après traitement thermique

On note qu'au centre du joint soudé se trouve la zone fondue. C'est elle qui est liquide durant l'exécution de la soudure. Dans le cas de soudage multi-passes, on a observé plusieurs microstructures durant l'exécution des passes successives. Les microstructures apparaissant lors de la première passe peuvent changées de façon notable par les passes suivantes. (La figure VI.4) Représente les principales microstructures de la zone fondue en première passe avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures :

L'observation microscopique, (Figure IV.3) représente les principales microstructures de la zone fondue en passe (Pass 1 de l'acier soudé a révélé les phases suivante : avant traitement thermique la microstructure est composé par la ferrite equiaxe et la perlite, mais après le traitement thermique, nous remarquons une nouvelle morphologie ferritique qui est la ferrite aciculaire (**FA**).

La figure VI.4 illustre les différentes phases da la zone fondue (Pass 2) avant et après traitement thermique, microstructure de cette zone sont riches en ferrite aciculaire, à coté de ferrite de joint des grains (**FJG**). La présence de ferrite aciculaire donne des bonnes propriétés mécaniques aux matériaux.

La figure VI.5 illustre les différentes phases da la zone fondue (**Pass 3**) avant et après traitement thermique, microstructure de cette zone sont riches en ferrite widmanstatten (**FW**), à coté de ferrite de joint des grains (**FJG**). La présence de ferrite widmanstatten (**FW**) donne des mauvaises propriétés mécaniques aux matériaux.

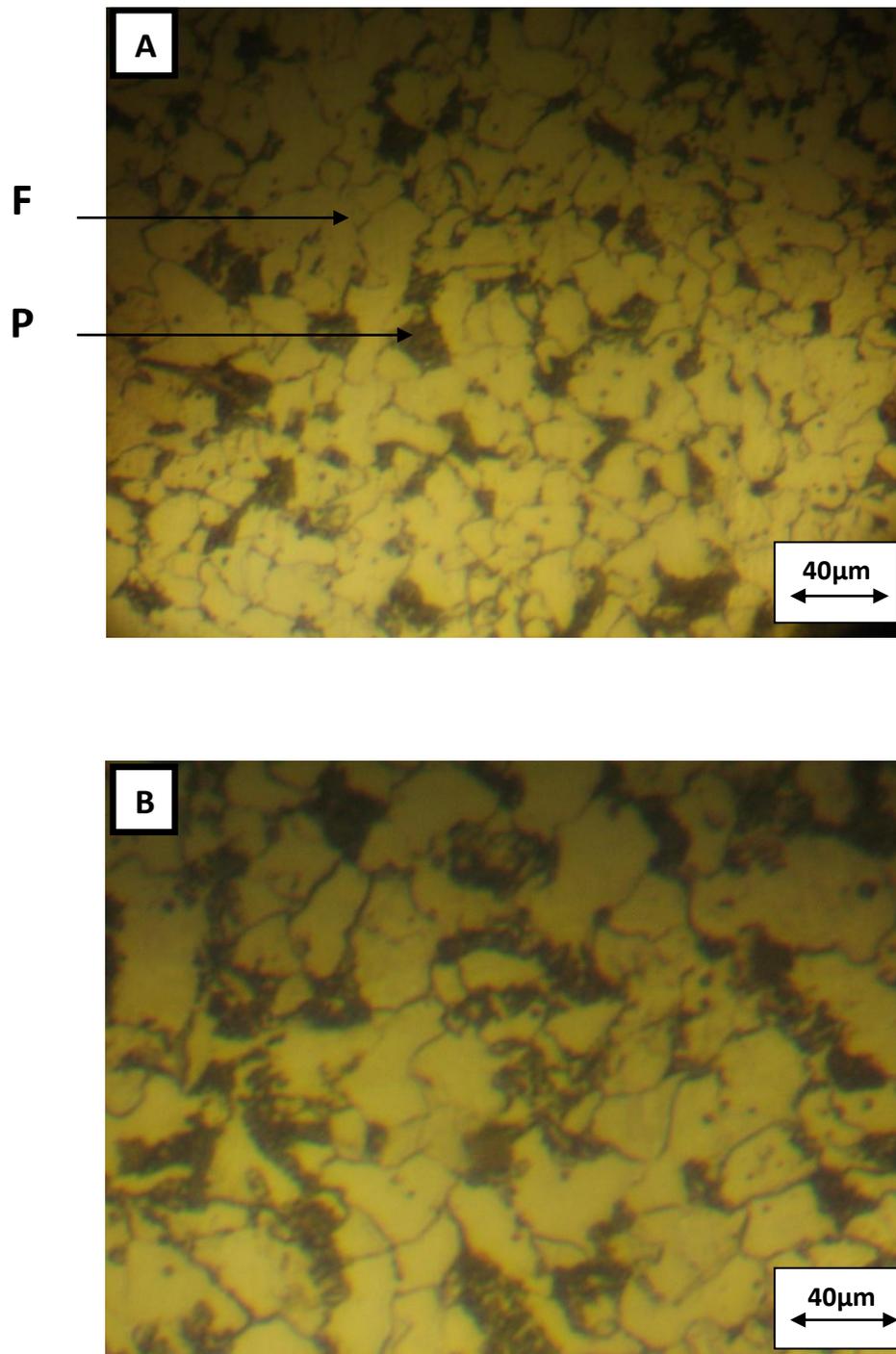


Figure IV.3 : Micrographie de la zone fondue (Pass 1) avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures.

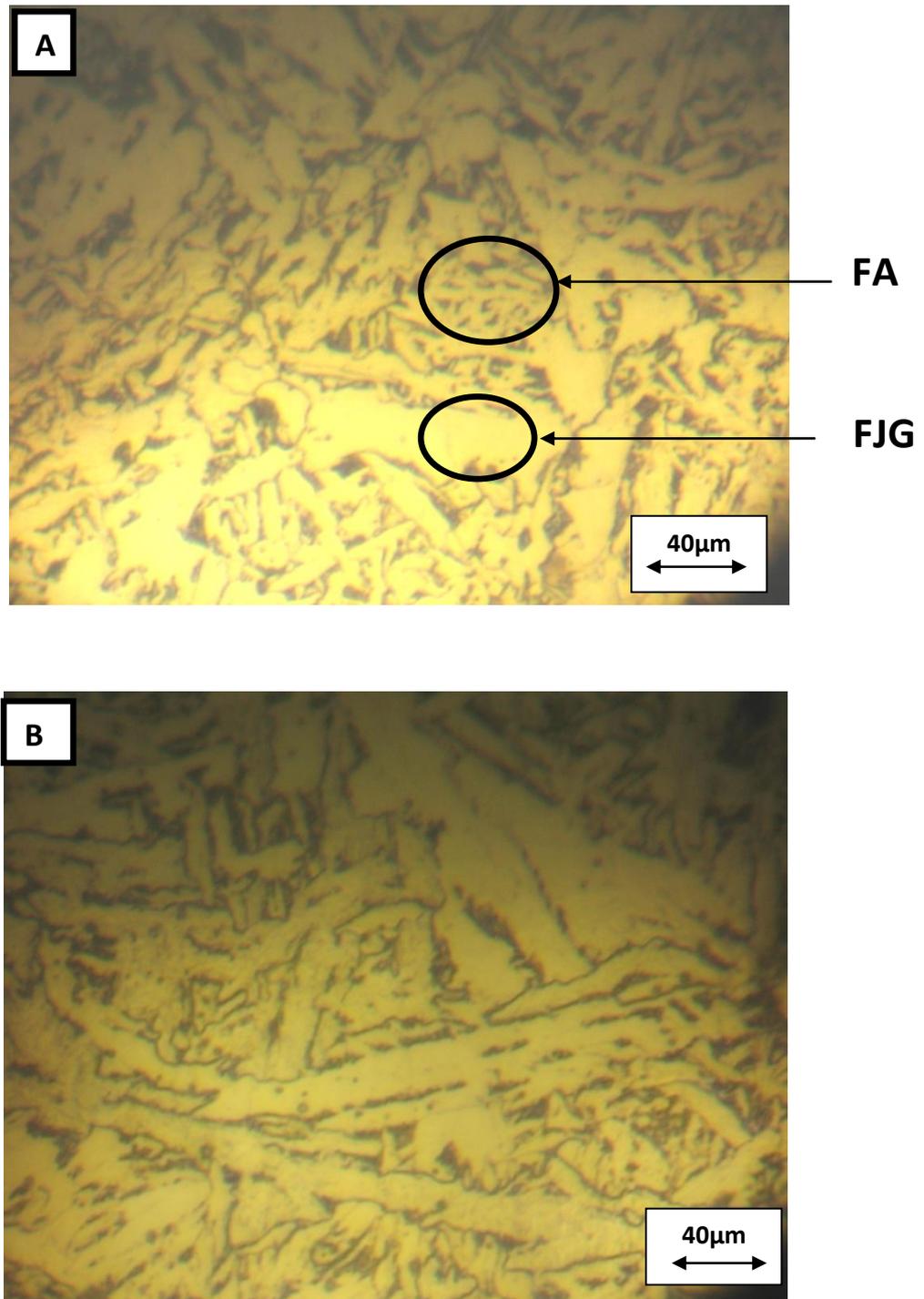


Figure IV.4 : Micrographie de la zone fondue (Pass 2) avant et après traitement thermique à 400°C pendant 2 heures.

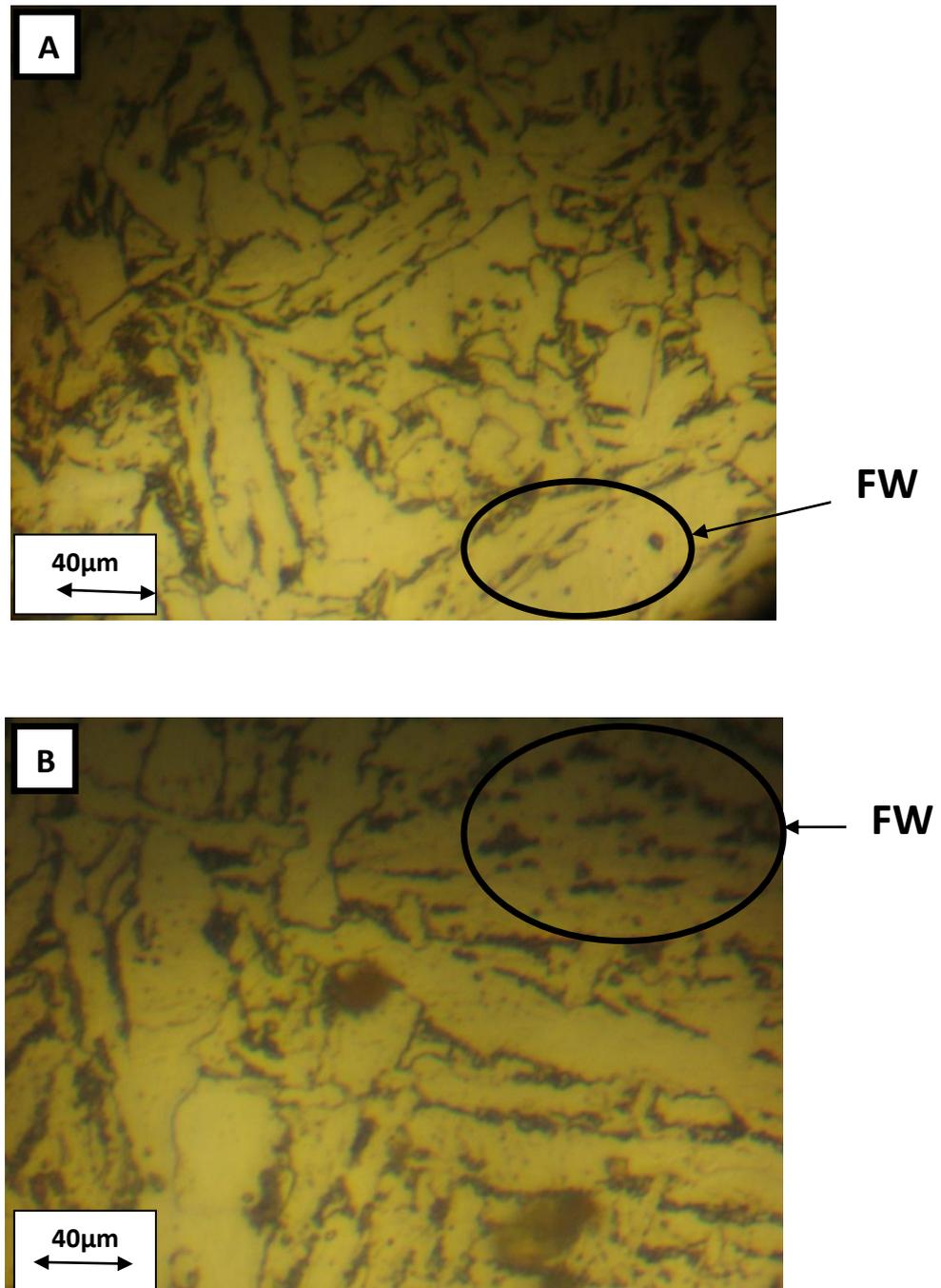


Figure IV.5 : Micrographie de la zone fondue (pass 3) avant et après traitement thermique a 400°C pendant 2 heures.

IV.3. Caractérisation de micro-dureté

L'essai de micro-dureté est une approche habituelle pour déterminer les propriétés mécaniques du métal de base et les différents zones de joint soudé et de connaître la limite de chaque zone dans le joint soudé. Dans ce contexte, on a mesuré les valeurs moyennes de la micro-dureté sur MB, la ZAT et la zone fondue (ZF).

Nous remarquons une augmentation de la dureté dans la Zone Fondue par rapport à la ZAT qui apparemment présente une diminution de la dureté à cause de l'effet de diffusivité de chaleur de l'énergie de soudage.

Notre résultats sont en bonne agreement avec la littérature, car les grandes valeurs de la micro dureté sont mesurées toujours au niveau de la zone fondue. La variation des propriétés de la zone soudé peut s'influer par plusieurs facteurs, comme les contraintes résiduelles après soudage. D'autre coté, la diminution de la tailles, la présence des inclusions métalliques et la présence de quelques morphologies ferritique comme la ferrite de widmanstätten (FW) et la ferrite aciculaire(FA). La diminution de la micro-dureté peut être provoquée par réduction des défauts de réseau cristallin générés après soudage, l'augmentation de la taille des grains, et la formation de la ferrite dans la microstructure [30]. Les résultats de la résistance mécanique sont inversement proportionnelle avec la micro dureté, c'est-à-dire quand la micro dureté augmente la résistance mécanique diminue et l'inverse.

Tableau IV.1 : Les valeurs de la micro dureté (pass 1)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 400°C
Métal de base	0 mm	195	190,12
Métal de base	1 mm	180,025	170,9
	2 mm	183,03	175,87
	3mm	179,33	163,25
Zone affectée thermiquement	4mm	190,85	185,3
	5mm	////////	////////
	6 mm	193,65	189,25
Zone fondue	7 mm	192,3	186,65
	8 mm	190	182
	9mm	198,26	191,6

Tableau IV.2 : Les valeurs de la micro dureté (pass 2)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 400°C
U.Sample	0 mm	204,35	190,88
Metal de base	1 mm	196,06	178,06
	2 mm	205,03	201,25
	3mm	192,05	175,76
Zone affectée thermiquement	4mm	192,83	191,65
	5mm	205,66	187, 75
	6 mm	196, 05	192,33
Zone fondue	7 mm	198,03	173,55
	8 mm	204,28	192,80
	9mm	194,03	188,55

Tableau IV.3 : Les valeurs de la résistance mécanique (pass 1)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 400°C
Métal de base	0 mm	0.005128	0.005259
Métal de base	1 mm	0.005554	0.005851
	2 mm	0.005463	0.005686
	3mm	0.005576	0.006125
Zone affectée thermiquement	4mm	0.005239	0.005396
	5mm	////////	////////
	6 mm	0.005163	0.005284
Zone fondue	7 mm	0.0052	0.005357
	8 mm	0.005263	0.005494
	9mm	0.005043	0.005219

Tableau VI.4 : Les valeurs de la résistance mécanique (pass 2)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 400°C
U.Sample	0 mm	0.004893	0.005238
Métal de base	1 mm	0.0051	0.005616
	2 mm	0.004877	0.004968
	3mm	0.005206	0.005689
Zone affectée thermiquement	4mm	0.005185	0.005217
	5mm	0.004862	0.005326
	6 mm	0.0051	0.005199
Zone fondue	7 mm	0.005049	0.005762
	8 mm	0.004895	0.005186
	9mm	0.005153	0.005303

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est d'élucider l'importance de l'effet de traitement thermique sur la qualité d'une soudure en acier de type X70 destiné pour la fabrication des pipelines de transport de gaz et huile. Nos échantillons sont soudés manuellement à l'arc électrique, par le procédé SMAW (soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobé).

Ainsi, suite aux deux caractérisations expérimentales réalisées pour les différentes éprouvettes mise en évidence avec l'acier utilisé dans la fabrication des pipelines X70 à gaz en usage du procédé de soudage SMAW sont état avant et après traitement thermique, ces caractérisations expérimentales sont essentiellement :

- ✓ la microscopie optique,
- ✓ la microdureté et la résistance mécanique.

Les principaux résultats obtenus se résument de la manière suivante :

L'observation au microscope optique du métal de base a montré une structure ferrito-perlitique. D'autre part, on constate bien des colonies de perlite mais avec une quantité plus faible par rapport à la phase ferritique car notre acier a un faible pourcentage du carbone. Après le traitement thermique à 400°C pendant 2 heures nous avons remarqués une diminution de la taille des grains.

La zone affectée thermiquement, au même titre que la zone fondue, les microstructures apparaissantes lors de la première passe peuvent changer de façon notable par les passes suivantes (Pass 1, 2 et trois). Les principales microstructures de la zone affectée thermiquement sont: Ferrite Equiaxe (FE) et faible proportion de perlite.

L'observation microscopique, représente les principales microstructures de la zone fondue en passe (Pass 1 : référence) de l'acier soudé a révélé les phases suivante : avant traitement thermique la microstructure est composé par la ferrite equiaxe et la perlite, mais après le traitement thermique, nous remarquons une nouvelle morphologie ferritique qui est la ferrite aciculaire (FA).

Les différentes phases de la zone fondue (Pass 2) avant et après traitement thermique sont : microstructure de cette zone sont riches en ferrite aciculaire, à côté de ferrite de joint des grains (FJG). La présence de ferrite aciculaire donne des bonnes propriétés mécaniques aux matériaux.

Les différentes phases de la zone fondue (Pass 3) avant et après traitement thermique sont : microstructure de cette zone sont riches en ferrite widmanstätten (FW), à côté de ferrite de joint des grains (FJG). La présence de ferrite widmanstätten (FW) donne des mauvaises propriétés mécaniques aux matériaux.

Nous remarquons une augmentation de la dureté dans la Zone Fondue par rapport à la ZAT qui apparemment présente une diminution de la dureté à cause de l'effet de diffusivité de chaleur de l'énergie de soudage. Après après traitement thermique les valeurs de la microdureté sont diminuées au niveau de toutes les zones.

Les résultats de la résistance mécanique sont inversement proportionnelle avec la micro dureté, c'est-à-dire quand la micro dureté augmente la résistance mécanique diminue et l'inverse.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] **A. AKACHAT**, « Étude de procédé de soudage semi-automatique mig-mag d'un joint soudé en acier st37 », mémoire de master, université Larbi Ben M'hidi-Oum El-Bouaghi, **2018**.
- [2] **N. HICHER**, «Étude des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2) soudé », mémoire de master, université Mohamed Khider de Biskra, **2019**.
- [3] **M. TIGRINE, F. FERADJ**, «Condition de coupes en tournage des aciers durs, dans le but de récupérer les galets de tréfilage, problème posé par l'eurl relly metal, Akbou », mémoire de master, université Abderrahmane Mira de Bejaia, **2014**.
- [4] **F. BOUNAB**, « Évolutions microstructurales lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4) », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra, **2013**.
- [5] **P. MILLET, Cour** « Societe Francophone de Biomateriaux Dentaires, Diagrammes de Phases», **2009**.
- [6] **A. HAMAIDI, Y. MADJOUR**, « Contrôle Qualité Des Soudures X52m Réalisées Par Les Procédés Saw Et SMAW », mémoire de master, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, **2014**.
- [7] **disponible en ligne sur le site :**
<https://www.google.com/search?q=chapitre+3+etude+du+diagramme+fer-carbone&oq=chapitre+3+etude+du+dia> , date de consultation : 24/6/2020 (8h.30min).
- [8] **A. BOUBAKER**, « Effet de traitement de recuit sur les caractéristiques structurales et mécaniques d'un acier faiblement allié de type BS2 soudé : Cas de bouteille à gaz (BAG-Batna) », mémoire de master, université Mohamed Khider de Biskra, **2019**.
- [9] **H. MAROUF**, « Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique acier ordinaire e36/ acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'unité grue de Bejaïa Dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation», mémoire de magister, université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, **2012**.

- [10] **Y. BOUGUERRA, S. BOURAHLA**, « Thème analyse structurale de l'acier XC42 du point de vue fissuration à froid en soudage », mémoire de master, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, **2017**.
- [11] **S. AMAOUCHE**, «Caractérisation d'une soudure hétérogène réalisée par le procédé MAG », mémoire de master, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, **2012**.
- [12] **L. AUSSIEL**, « Méthodes de caractérisation des propriétés thermomécaniques d'un acier martensitique », mémoire de magister, école technologie supérieure-Québec, **2016**.
- [13] **C-S. HADJ MOHAND**, « modélisation et influence des paramètres de cisaillement sur la réponse des structures », mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, **2010**.
- [14] **S. BENZAADA**, « livre de fonderie et soudage ».
- [15] **disponible en ligne sur le site** : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage>
- [16] **B. CHERIFA**, « Etude du joint soudé d'un alliage d'aluminium », thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, **2015**.
- [17] **B. ABDELMADJID**, « Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles », mémoire de master, université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, **2017**.
- [18] **H. BEKOUCHE**, « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers», mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra, **2013**.
- [19] **C-E. DERFOUF**, « Effet de la soudure sur la structure de l'acier », thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, **2011**.
- [20] **J-A. PENDER**, « Le soudage » Edition Métrique, **1977**.
- [21] **A. BELABED**, « Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles », mémoire de master, université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, **2017**.
- [22] **Soudage et assemblage-soudage** (Guide d'auto-apprentissage). Centre d'élaboration des moyens d'enseignement du Québec ISBN : 978-2-89620-269-0 ,2010

- [23] **Z. GUITOUN**, « Caractérisation mécanique d'un assemblage à clin en acier inoxydable soudé par le procédé MAG », mémoire de master, université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, **2018**.
- [24] **M. ABDELLATIF**, « Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration à froid dans la ZAT », mémoire de master, université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, **2018**.
- [25] **A. DEBABI, M-N. FETITA**, « Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf - M'sila, **2018**.
- [26] **A. MOULOUD**, « Etude de comportement thermique et mécanique des matériaux aéronautiques par des méthodes numériques : application au soudage de structure métallurgies », thèse de doctorat,
- [27] **B. MAAMACHE**, « Comportement structural et mécanique des réparations successives des cordons de soudure dans un acier HSLA », thèse doctorat, université de blida1, **2017**.
- [28] **A. DIHA**, « Effet des traitements thermiques sur les propriétés des fils de cuivre tréfilés à l'ENICAB-Biskra », mémoire de master, université de Tébessa, **2016**.
- [29] **S. BENZAADA**, « Traitements thermiques, classification et designation des aciers et fontes », date de consultation : 16/4/2020 (8h.37min).
- [30] **K. DIGHECHE**, « Etude microstructurale de la zone affectée thermiquement dans un acier soudé », thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, **2016**.

Résumé

Dans cette étude nous avons utilisés éprouvettes soudés en acier X70. Le soudage a été réalisé au niveau de société nationale de transport par canalisation (COSIDER, base Oumech-Biskra), Ces éprouvettes ont été assemblés par soudage manuel à l'arc électrique, avec électrodes enrobées (SMAW). Pour améliorer les caractéristiques microstructuraux et mécaniques des joints soudé nous avons réalisée un traitement thermique à 400°C pour une durée de 2 heures.

Pour ce faire nous avons utilisé des techniques expérimentales : la micro-dureté, et le microscope optique.

Les résultats obtenus ont permis de montrer l'importance de l'application de traitement thermique pour améliorer la qualité de l'acier soudé.

Mots clés : Acier X70, Soudage, Traitement thermique, microscope optique, Microdureté.

ملخص

في هذه الدراسة استخدمنا عينات فولاذية ملحومة X70. تم إجراء اللحام على مستوى شركة نقل خطوط الأنابيب الوطنية ، قاعدة (COSIDER Oumech-Biskra) وتم تجميع هذه العينات عن طريق اللحام اليدوي بالقوس الكهربائي مع الأقطاب الكهربائية المطلية (SMAW). لتحسين الخصائص الهيكلية الدقيقة والميكانيكية للوصلات الملحومة ، أجرينا معالجة حرارية عند 400 درجة مئوية لمدة ساعتين. للقيام بذلك استخدمنا تقنيات تجريبية: الصلابة الدقيقة ، والمجهر الضوئي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أهمية تطبيق المعالجة الحرارية لتحسين جودة الفولاذ الملحوم. **الكلمات المفتاحية:** فولاذ X70 ، لحام ، معالجة حرارية ، ميكروسكوب بصري ، صلابة دقيقة.

Summary

In this study we used welded X70 steel specimens. The welding was carried out at the level of a national pipeline transport company (COSIDER, Oumech-Biskra base). These specimens were assembled by manual electric arc welding with coated electrodes (SMAW). To improve the microstructural and mechanical characteristics of the welded joints, we carried out a heat treatment at 400 ° C for a period of 2 hours.

To do this we used experimental techniques: micro-hardness, and the optical microscope.

The results obtained showed the importance of the application of heat treatment to improve the quality of welded steel.

Keywords: X70 steel, Welding, Heat treatment, optical microscope, Microhardness.