

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الكيمياء الصناعية

Mémoire présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de Master en : Génie des Procédés  
Option : Génie chimique

## Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines

Présentée par : BARKAT YASSINE

Devant le jury composé de :

Président : Dr. LAIADI DJEMOUI

Encadreur : M<sup>me</sup> DIGHECHE KELTHOUM

Examineur : M<sup>me</sup> HAMDI INES

Promotion Juin 2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *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 suis très reconnaissant pour la patience dont il a fait preuve le long de ce projet.*

*Je tiens également à remercier aussi 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.*

*Enfin, nos respectueuses salutations et remerciements aux membres du jury qui auront l'honneur d'apprécier et de juger ce travail, à monsieur **LIADHI Djemouai** et madame **HAMEDI Ines**.*

*Merci à tous.*

**BARAKAT Yassine**

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

Remerciement.....	i
Sommaire.....	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux .....	viii
Introduction générale .....	1

## **Chapitre. I : Généralités sur les aciers**

I.1 Introduction .....	3
I.2 Définition de l'acier .....	3
I. 3 Classification des aciers .....	4
I. 3.1 Les aciers au carbone .....	4
I. 3.1.1 Aciers à faible carbone.....	4
I. 3.1.2 Les aciers à moyen carbone .....	4
I. 3.1.3 Aciers à haute pourcentage de carbone .....	5
I.3.2. Aciers alliés ou non .....	5
I.3.2.1 Aciers non alliés .....	5
I.3.2.2 Aciers alliés .....	6
I.4.1 Influence spécifique des éléments d'addition .....	9
I.4. 2 Eléments alphagènes et gammagènes .....	13
I.5 Diagrammes de phases fer - carbone .....	14
I.5.1 Les principaux phase de diagramme de Phase .....	15
I.5.1.1 La ferrite .....	15
I.5.1.2 L'austénite .....	15
I.5.1.3 La cementite .....	16
I.5.1.4 La perlite .....	16
I.5.1.5 Le point eutectoïde .....	16
I.6. Traitement thermique des aciers .....	18
1.6.1 Définition .....	18

I.6.2 Effe des traitement .....	18
I.6.3 But traitement thermique .....	18
I.6.4 Les différents types de traitements thermiques .....	18
I.6.4.1 Le recuit .....	18
I.6.4.2 La trempe .....	19
I.6.4.3Le revenu .....	20
I.7 Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers .....	21

## **Chapitre II : Procèdes de soudage**

II.1 Introduction .....	24
II.2 Procèdes de soudage .....	24
II.2.1 Principe du soudage à l'Arc et notion d'électricité .....	24
II.2.1.1 Le procédé de soudage SMAW .....	25
II.2.1.2 Le procédé de soudage GMAW .....	27
II.2.1.3 Les procédé de soudage MIG/MAG .....	29
II.2.1.4 Soudage à Parc sons gaz de protection procédé TIG .....	32
II.3 Conséquences du procédé de soudage .....	34
II.3.1 Conséquences thermiques du soudage .....	34
II.3.2 Conséquences métallurgiques du soudage .....	34
II.3.3 Conséquences mécaniques du soudage .....	34
II.3.4 Couplage thermique, métallurgique et mécanique .....	35
II.4 Les défauts des soudages .....	36
II.4.1 Les fissures .....	36
II.4.2 Fissure à chaud (ou de solidification) .....	37
II.4.2.1 Définition .....	37
II.4.2.2 Causes possibles .....	37
II.4.2.3 Méthodes de détection .....	38
II.4.2.4 Méthode de réparation .....	38
II.4.2.5 Mesures préventives .....	38
II.4.3 Fissures à froid (fissures d'hydrogène).....	38
II.4.3.1 Définition .....	38
II.4.3.2 Causes possibles .....	39
II.4.3.3 Méthodes de détection .....	39
II.4.3.4 Méthode de réparation .....	39

II.4.3.5 Mesures préventives .....	40
II.5 Contrôle non destructif (CND) .....	40
II.5.1 contrôle visuel .....	40
II.5.2 contrôle par ressuage .....	41
II.5.3 contrôle par magnétoscopie .....	42
II.5.4 contrôle par radiographie .....	43
II.5.5 contrôle par ultrasons .....	44

### **Chapitre III : Méthodes expérimentales**

III.1 Introduction .....	47
III.2 Choix de procéder .....	47
III.2.a) Soudage Manuel .....	47
III.2.b) Soudage automatique .....	49
III.3 Identification du métal de base et métal d'apport .....	49
III.3.1 Métal de base .....	49
III.3.2 Métal d'apport (les électrodes) .....	50
III.4 Présentation des soudures étudiées .....	50
III.5 Prélèvement de l'échantillon .....	50
III.6 Traitements thermiques .....	51
III.7 Examen Métallographique .....	52
III.7.1 polissage .....	52
III.7.2. Attaque chimique .....	52
III.7.3 L'observation microscopique .....	53
III.8 Caractérisations structurales .....	53
III.8.1.1 Diffraction des rayons X .....	53
III.9 Analyse par le microduromètre (Microdureté Vickers) .....	56
III.9.1 Machine d'essai de microdureté .....	56
III.9.2 Mode opératoire .....	58

### **Chapitre IV : Résultats et interprétations**

IV.1 Caractérisation Structurale .....	60
IV.1.1 Caractérisation par le microscope optique .....	60
IV.1.1.1 La micrographie du métal de base (MB) .....	60
IV.1.1.2 microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT) .....	61

IV.1.1.2 microstructures de la zone fondue (ZF) .....	64
IV.2 Caractérisation des phases par la diffraction des rayon-x .....	67
IV.2.1 Echantillon soudé manuellement non traité .....	68
IV.2.2 Echantillon soudé automatiquement non traité .....	70
IV.2.3 Echantillon soudé manuellement (traité) .....	72
IV.2.4 Echantillon soudé automatiquement (traité).....	74
IV.2.5 Etude comparative des deux échantillons soudés manuellement et automatiquement.....	75
IV.2.6 Etude comparative de deux échantillons soudés manuellement (avant et après traitement thermique ) .....	78
IV.2.7 Etude comparative de échantillons soudés automatiquement deux (avant et après traitement thermique ) .....	80
IV.3. Mesure de Microdureté .....	97
IV.3.1 Echantillon soudé manuellement.....	97
IV.3.2 Echantillon soudé automatiquement.....	98
Conclusion générale.....	98
Refinance bibliographe.....	



# Liset de Figures

# LISTE DE FIGURE

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>I.1</b>	Mailles élémentaires des structures cristallines: CC et C.F.C	03
<b>I.2</b>	Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition	14
<b>I.3</b>	Diagramme d'équilibre fer-carbone	15
<b>I.4</b>	Structure ferritique ( Fer Armco. Traitement : 950 °C (30 min) - four. Attaque Nital (3 %). Grossissement : 180)	17
<b>I.5</b>	Structure austéritique (avec précipités de carbures) Acier à 0.12 %C- 25 %Cr -20% Ni- 1.5%Mn- 1. %Si Traitement: 1 125 °C(1 h) -eau - 800 K (30 min) Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement : 900	17
<b>I.6</b>	Structure perlitique Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900	17
<b>I.7</b>	Sens longitudinale et transversale de tube	22
<b>II.1</b>	Circuit électrique pour le soudage à l'arc	25
<b>II.12</b>	Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée	26
<b>II.3</b>	principe de fonctionnement du procédé GMAW	27
<b>II.4</b>	Principes du procédé de soudage MIG/MAG	30
<b>II.5</b>	du procédé de soudage MIG/MAG	31
<b>II.6</b>	du procédé de soudage MIG/MAG	32
<b>II.7</b>	schéma du procédé TIG	33
<b>II.8</b>	Couplages entre les phénomènes thermique, métallurgique et mécanique induits lors d'une opération de soudage	35
<b>II.9</b>	Fissure à chaud (ou de solidification).	37
<b>II.10</b>	Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement	38
<b>II.11</b>	Fissure à froid (fissure d'hydrogène)	39
<b>II.12</b>	principe de contrôle visuel	40
<b>II.13</b>	Principe de contrôle par ressuage	41

<b>II.14</b>	Principe de la magnétoscopie	42
<b>II.15</b>	principe de contrôle par radiographie	44
<b>II.16</b>	exemple de cliché de radiologie gamma ou X	44
<b>II.17</b>	Schéma montre le principe de contrôle par ultrason	45
<b>III.1</b>	présente un joint de soudure obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique	47
<b>III.2</b>	l'appareillage pour le soudage des pipelines ou COSIDER	48
<b>III.3</b>	L'enchaînement des passes de soudure	49
<b>III.4</b>	pièce automatisée soudée à l'arc électrique	49
<b>III.5</b>	repère de référence	50
<b>III.6</b>	Les deux morceaux prélevés a partir pipelines soudé manuellement et automatiquement	51
<b>III.7</b>	Les échantillons de l'étude	51
<b>III.8</b>	Polisseuse à deux vitesses	52
<b>III.9</b>	Microscope optique (Hund)	53
<b>III.10</b>	Schéma montrant Le principe de travail du diffractomètre	54
<b>III.11</b>	Diffractomètre BRUKER D8 ADVANCE AXS (XRD)	54
<b>III.12</b>	Illustration d'un pic de diffraction	55
<b>III.13</b>	Microduromètre Vickers	57
<b>III.14</b>	Schémas représentatifs d'un pénétrateur pyramidal	57
<b>III.15</b>	Localisation des Positions	58
<b>IV.1</b>	Microstructures de métal de base(MB) : (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)	60
<b>IV.2</b>	microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT , passe1) ) : (a) Ech non traité (soudé manuellement) et (b) Ech traité (soudé manuellement)	61
<b>IV.3</b>	microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT , passe 2) ) : (a) Ech	62

	non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)	
<b>IV.4</b>	microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT , passe 3 ) : (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)	63
<b>IV.5</b>	microstructures de la zone fondue (ZF , passe1 ) : (a) Ech non traité (soudé manuellement) et (b) Ech traité (soudé manuellement)	64
<b>IV.6</b>	: microstructures de la zone fondue (ZF , passe 2 ) (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)	65
<b>IV.7</b>	microstructures de la zone fondue (ZF , passe3 ) (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)	66
<b>IV.8</b>	le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé manuel non traité thermiquement	68
<b>IV.9</b>	le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé manuel non traité thermiquement	69
<b>IV.10</b>	le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé automatique non traité thermiquement	70
<b>IV.11</b>	le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé automatique non traité thermiquement	71
<b>IV.12</b>	: le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé manuel traité thermiquement	72
<b>IV.13</b>	le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé manuel traité thermiquement	73
<b>IV.14</b>	le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé automatique traité thermiquement	74
<b>IV.15</b>	: le diffractogramme de zone soudé(ZAT+ZF) d'un échantillon soudé automatique traité thermiquement	75
<b>IV.16</b>	les diffractogrammes de deux échantillons non traité soudé manuellement et automatiquement de métal de base. a) vue en 2D, b) comparaison, c)vue agrandie de pic (110)	76
<b>IV.17</b>	les diffractogrammes de deux échantillons non traité soudé manuellement et	77

	automatiquement de la zone soudé. a) vue en 2D, b) comparaison, c)vue agrandie de pic (110)	
<b>IV.18</b>	les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé manuellement) de métal de base. a) vue en 2D,b) comparaison, c)vue agrandie de pic (110)	78
<b>IV.19</b>	les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé manuellement) de la zone soudé. a) vue en 2D,b) comparaison, c)vue agrandie de pic (110)	79
<b>IV.20</b>	les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé Automatiquement ) de métal de base. a) vue en 2D,b) comparaison, c)vue agrandie de pic (110)	80
<b>IV.21</b>	les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé Automatiquement) de la zone soudé. a) vue en 2D,b) comparaison, c)vue agrandie de pic (110)	81

# Liste de Tableaux

# LISTE DE TABLEAUX

<b>Tableaux</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>I.1</b>	Caractéristique mécanique par (N/mm <sup>2</sup> ) (Tubes de conduite PSL 1)	22
<b>II.1</b>	Applications de type de soudage GMAW	29
<b>III.1</b>	Composition chimique d'un acier microallié du type X60 suivant les normes API	50
<b>III.2</b>	la composition chimique des électrodes utilisées	50
<b>IV.1</b>	les caractéristiques des pics (métal de base) soudé manuel de l'échantillon non traité thermiquement	68
<b>IV.2</b>	les caractéristiques des pics (zone soudé) soudé manuel de l'échantillon non traité thermiquement	69
<b>IV.3</b>	les caractéristiques des pics (métal de base) soudé automatique de l'échantillon non traité thermiquement	70
<b>IV.4</b>	les caractéristiques des pics dans la zone soudé de l'échantillons soudé automatiquement avant le traitement thermique	71
<b>IV.5</b>	les caractéristiques des pics (métal de base) soudé manuel de l'échantillon traité thermiquement	72
<b>IV.6</b>	les caractéristiques des pics (zone soudé) soudé manuel de l'échantillon traité thermiquement	73
<b>IV.7</b>	les caractéristiques des pics (métal de base) soudé automatique de l'échantillon traité thermiquement	74
<b>IV.8</b>	les caractéristiques des pics (zone soudé) soudé automatique de l'échantillon traité thermiquement	75
<b>IV.9</b>	Les variations des positions des pics de diffraction dans le métal de base (MB) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés manuellement	84
<b>IV.10</b>	Les variations des positions des pics de diffraction dans la zone soudé (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés manuellement	85
<b>IV.11</b>	Les variations des positions des pics de diffraction dans le métal de base(MB) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés automatiquement	86
<b>IV.12</b>	Les variations des positions des pics de diffraction dans la zone soudé (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés automatiquement	87
<b>IV.13</b>	Les caractéristiques des cinq premier pics de métal de base (MB) des	90

	échantillons soudés manuellement et automatiquement	
<b>IV.14</b>	Les caractéristiques des cinq premier pics de la zone soudé (ZS) des échantillons soudés manuellement et automatiquement	91
<b>IV.15</b>	Les caractéristiques des cinq premier pics de métal de base (MB) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé manuellement	92
<b>IV.16</b>	Les caractéristiques des cinq premier pics de la zone soudée (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé manuellement	93
<b>IV.17</b>	Les caractéristiques des cinq premier pics de métal de base (MB) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé automatiquement	94
<b>IV.18</b>	Les caractéristiques des cinq premier pics de la zone soudé (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé automatiquement	95
<b>IV.19</b>	les mesures de microdureté de première et dernier passe des échantillons soudé manuellement	97
<b>IV.20</b>	les mesures de microdureté de première et dernier passe des échantillons soudé automatiquement	98
<b>IV.21</b>	la moyenne de la microdureté de première et dernier passe des échantillons soudés manuellement et automatiquement	98



**INTRODUCTION**

**GENERALE**

## *Introduction générale*

De tous les alliages métalliques, les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large.

Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations.

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

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Le but de ce mémoire est l'étude de l'aspect métallurgique de soudage manuel et automatique d'acier .

Pour aboutir à notre objectif, on a utilisé trois techniques caractérisation :

- ❖ Microscopie optique.
- ❖ Mesure de microdureté
- ❖ Diffraction de rayons X.

L'objectif était de mettre en évidence C'est la détermination de la procédé de soudage optimale pour les pipelines.

Après introduction générale, le mémoire est composé de quatre chapitres et conclusion générale :

- ✚ le premier chapitre est réservé aux généralités sur les aciers.
- ✚ le deuxième chapitre traite les différentes procédés de soudage.
- ✚ le troisième chapitre c'est les méthodes expérimentales utilisées.
- ✚ le quatrième chapitre est consacré aux résultats et l'interprétation.

# CHAPITRE I

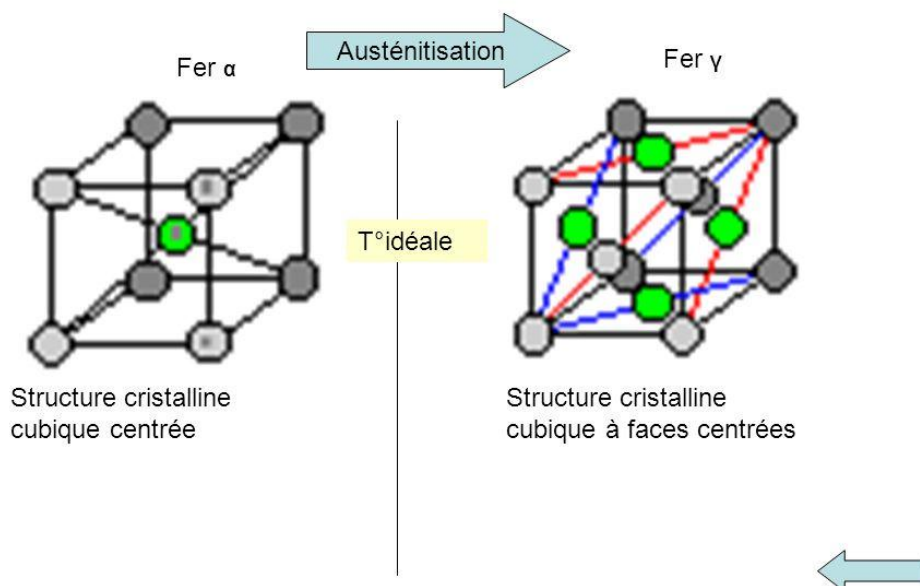
## GENERALITES SUR LES ACIERS

## 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 essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents mécanismes, thermiques et chimiques. [1]

## I.2 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. [2]



**Figure. I.1** : Mailles élémentaires des structures cristallines: CC et C.F.C. [2]

### I. 3 Classification des aciers

Les aciers peuvent être classifiés selon :

- La composition, telle que le carbone, faiblement allié, ou les aciers inoxydables... ;
- Les méthodes de fabrication, telles que le four Thomas, processus de base de l'oxygène, ou méthodes de four électrique
- La méthode de finition, telle que le laminage à chaud ou laminage à froid
- La forme de produit, telle que la barre, le plat, la feuille, la bande, la tuyauterie, ou la forme structurale.
- L'utilisation des désoxydants, telle que l'acier calmé, semi calmé, couvert, ou bordé
- La microstructure, telle que de ferrite, perlitique, et martensitique.....
- Le niveau exigé de force, comme indiqué dans des normes d'ASTM
- Le traitement thermique, tel que le recuit, et le traitement thermomécanique. .

Des systèmes de classification mentionnés ci-dessus, la composition chimique est le plus largement utilisée internationalement et sera soulignée comme suit.

Plus on a de carbone, plus l'acier est dur. On a donc initialement classé l'acier en catégories. [3]

#### I. 3.1 Les aciers au carbone

##### I. 3.1.1 Aciers à faible carbone

Ce type d'aciers contiennent jusqu'à 0,30% C. La catégorie la plus importante de cette classe d'acier est de produits plats laminés (feuille ou bande), habituellement dans l'état laminé à froid et recuite. La teneur en carbone de ces aciers qui sont à haute aptitude à la déformation est très faible, moins de 0,10% de C, jusqu'à 0,4% de Mn. Les utilisations typiques de cette classe sont dans les panneaux de carrosserie automobile, plaque d'étain, et les produits métalliques.

Pour l'acier laminé à plaques structurales et sections, la teneur en carbone peut être augmentée, environ de 0,30%, avec une plus grande teneur en manganèse jusqu'à 1,5%. Ces matériaux peuvent être utilisés pour les pièces embouties, pièces forgées, tubes sans soudure, et plaque de la chaudière.

##### I. 3.1.2 Les aciers à moyen carbone

Sont des aciers similaires à des ceux à faible teneur en carbone, sauf que la teneur en carbone est de 0,30 à 0,60% et le manganèse 0,60 à 1,65%. L'augmentation de la teneur en carbone à environ 0,5%, avec une augmentation concomitante de manganèse permet aux

aciers au carbone d'être à utilisés dans l'état trempé et revenu. Les utilisations des aciers au carbone manganèse moyennes comprennent des arbres, des essieux, des raccords et des pièces forgées. Aciers dans la gamme 0,40 à 0,60% de C sont également utilisés pour les rails, les roues de chemin de fer et les essieux ferroviaires.

Les aciers carbone contiennent de 0,60 à 1,00% C avec des teneurs en manganèse allant de 0,30 à 0,90%. Les aciers aux carbone sont utilisés pour les matériaux élastiques et des fils à haute résistance.

### **I. 3.1.3 aciers à haute pourcentage de carbone**

sont des alliages expérimentaux contenant 1,25 à 2,0% C. Ces aciers sont thermomécanique traités pour produire des microstructures qui se composent de ultrafine grains équiaxes de particules sphériques et discontinues proeutectoïde carbures. [4]

## **I .3.2 Aciers alliés ou non**

### **I .3.2.1 Aciers non alliés**

En faisant abstraction des impuretés, l'acier peut être considéré comme un alliage binaire fer - carbone (jusqu'à 1,7 % de carbone). Les mélanges hétérogènes fer - carbone sont caractérisés par la présence de grains de ferrite (solution solide fer a - carbone) et de grains de perlite (agrégat perlite + cémentite ( $Fe_3C$ )). La cémentite est un composé dur et fragile qui se dispose en fines lamelles alternées sur les grains. A l'examen au microscope optique, ces lamelles de cémentite présentent un aspect nacré à l'origine du nom de cette structure particulière: la perlite. Au dessus de 0,85 % de carbone (eutectoïde), l'acier n'est plus composé que de perlite. De plus, la cémentite supplémentaire s'accumule aux joints de grains. On doit noter que ces structures correspondent à un état recuit (non trempé) de l'acier. Mais nous rappelons que la trempe des aciers consiste à faire subir au matériau un cycle particulier de variation de la température et surtout un refroidissement qui permet la création d'une nouvelle structure appelée martensite : ceci permet d'augmenter les caractéristiques de dureté, de limite élastique...etc. Les différentes structures des aciers en fonction de la température sont représentées dans le diagramme d'équilibre fer-carbone . Il traduit la composition de phases et la structure des alliage dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (6.67%).

### I.3.2.2 Aciers alliés

Pour améliorer certaines propriétés d'un acier (limite élastique, résilience,...), on lui ajoute de faibles proportions d'éléments comme le chrome, le nickel, le vanadium, le zirconium,...etc. Un acier est faiblement allié si les teneurs en éléments d'addition restent inférieures à un certain seuil. Par contre pour une teneur supérieure à 5 % pour l'un quelconque des éléments d'addition, l'acier est dit fortement allié. Le rôle des éléments d'apport devient prépondérant et les propriétés des aciers fortement alliés sont nettement différentes de celles des aciers non alliés. La trempabilité est généralement supérieure et des structures martensitiques peuvent être obtenues par des trempes à l'huile ou à l'eau (aciers autotrempants). [5]

#### Les aciers microalliés

Les aciers microalliés sont des aciers à haute résistance mécanique caractérisés par de faibles additions de niobium (Nb), de vanadium (V) et/ou de titane (Ti). Ces éléments de microalliage (-0.1 % massique) s'associent avec des éléments interstitiels (carbone, et/ou azote) pour former des précipités : nitrures, carbures et/ou carbonitrures. Cette précipitation conduit à un accroissement des propriétés mécaniques par rapport aux aciers de base au carbone manganèse. Ces niveaux de propriétés mécaniques sont garantis par l'affinage des grains austénitiques et le durcissement structural induit par la précipitation de dispersoïdes. Les effets spécifiques de telles additions peuvent être affectés par l'addition d'autres éléments d'alliage (B, Si, Cr, etc.) d'une part, et par la maîtrise des paramètres de traitements thermiques et et/ou thermomécaniques, d'autre part.

Vers la fin des années soixante, les aciers microalliés occupaient une place importante parmi les aciers. Ils ont gagné rapidement l'intérêt des fabricants grâce à la possibilité d'utiliser des procédés de semi-calme dans leur production, de par la faible affinité du niobium et du vanadium pour l'oxygène. Les aciers normalisés dans lesquels l'aluminium jouait le rôle d'agent d'affinage du grain, étaient produits en tant qu'aciers calmés à plus faibles rendements. Néanmoins, leur succès ne s'est confirmé que dans les années soixante-dix. Cet essor est dû, en grande partie, à des facteurs d'ordre économique voire géopolitique (avènement du 1<sup>er</sup> choc pétrolier).

Ces aciers ont investi particulièrement les domaines industriels du bâtiment, du transport et de la pétrochimie. L'usage des aciers microalliés dans l'industrie du bâtiment a permis une réduction considérable de la section des produits, entraînant des économies dans la réalisation des ouvrages (grands projets d'urbanisation, ponts, etc.).

L'usage des aciers microalliés dans l'industrie automobile a entraîné une réduction significative de la masse des véhicules conduisant à des économies aussi bien dans

La fabrication que dans la mise en service, garantissant ainsi une réduction de la consommation énergétique.

L'usage des aciers microalliés dans l'industrie pétrochimique a permis, entre autres, la réalisation de gazoducs et d'oléoducs, avec des diamètres toujours croissants, opérationnels dans des conditions extrêmes (Mer du Nord, Sibérie, etc.)

La mise au point des aciers microalliés a été à l'origine de l'amélioration de la soudabilité des pièces, ce qui a favorisé la généralisation du soudage par fusion.

Deux facteurs apparus récemment contribuèrent également au développement de nouvelles nuances d'aciers microalliés. Il s'agit de la sensibilisation de la société par les problèmes de la sécurité routière et du respect de l'environnement. Ces exigences sociétales ont conduit les différents législateurs à imposer des normes de plus en plus contraignantes (émissions de à effet de serre, économie de carburants, etc.).

Parmi les nuances qui font l'objet des différents programmes de développement, on citer les aciers microalliés à moyen carbone destinés à la forge. [6]

### **Aciers fortement alliés**

On désigne par acier fortement allié un métal dans lequel un des éléments d'addition au moins a une teneur égale ou supérieure à 5 %.

Il se distingue par une lettre majuscule Z, indiquant que ce métal est fortement allié, suivie de 100 fois la teneur en carbone suivie elle-même du symbole des éléments d'addition et des pourcentages exacts de ceux-ci.

dans les Acier fortement allié La teneur en molybdène n'est pas spécifiée, celui-ci entrant dans l'alliage a moins de 1 %.

[7]

### **Categories et specification des aciers HSLA**

Les aciers HSLA incluent un grand nombre de nuances standards et sont conçus pour fournir des combinaisons spécifiques de propriétés telles que la résistance, la ténacité, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique.

Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, bien que leurs propriétés désirées soient accomplies par l'usage de petites additions d'alliages. Au lieu de cela, ils sont classés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier au carbone doux



laminé, avec des propriétés mécaniques rehaussées obtenues par de judicieuses (petites) additions d'alliages et des techniques de traitement spéciales tel que le laminage contrôlé.

Les aciers HSLA peuvent être divisés en six catégories :

❖ **Aciers résistants à la corrosion**

Ils étaient les premiers aciers HSLA développés. Ils contiennent du cuivre et autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement par solution solide et l'affinement du grain ferritique. [8]

❖ **Aciers micro-alliés ferrito-perlitique**

Ils utilisent des additions d'éléments tels que le niobium et le vanadium pour augmenter la résistance de l'acier laminé à chaud sans augmenter la quantité du carbone et/ou du manganèse.

Des études faites sur le niobium et le vanadium ont révélé que de petites quantités de ces éléments (moins de 0.10%) suffisent pour durcir les aciers au carbone- manganèse. Donc, la quantité de carbone pourrait être réduite pour améliorer la soudabilité et la ténacité, les effets durcissant de niobium et de vanadium ayant compensé la décroissance de la résistance due à la réduction du carbone.

Les différents types d'aciers micro-alliés ferrito-perlitique incluent :

- Aciers micro-alliés au vanadium
- Aciers micro-alliés au niobium
- Aciers micro-alliés au niobium-molybdène
- Aciers micro-alliés au vanadium-niobium
- Aciers micro-alliés au Vanadium-azote
- Aciers micro-alliés au titane
- Aciers micro-alliés au Niobium-titane
- Aciers micro-alliés au Vanadium-titane

Ces aciers peuvent contenir d'autres éléments pour améliorer la résistance à la corrosion et le durcissement par solution solide ou augmenter la trempabilité (si on veut obtenir une microstructure autre que la microstructure ferrito-perlitique). [9]

❖ **Aciers Laminés à Structure Perlitique**

Ils sont un groupe spécial d'aciers dont l'augmentation des propriétés mécaniques (et dans quelques cas, la résistance à la corrosion atmosphérique) est obtenue par l'addition de

quantités modérées d'un ou de plusieurs éléments autres que le carbone.

D'autres aciers perlitiques contiennent de petites quantités d'éléments alliés pour améliorer la soudabilité, la formabilité, la ténacité et la dureté.

#### ❖ **Aciers à Ferrite Aciculaire (bainite à bas carbone)**

Une autre approche au développement des aciers HSLA est d'obtenir une microstructure de ferrite aciculaire très fine et plus résistante, au lieu d'une microstructure de ferrite polygonale habituelle pendant la transformation des aciers à très bas carbone (moins que 0.08%C) avec une trempabilité suffisante (par additions de Molybdène et/ou de bore).

A la différence de la structure polygonale, la structure aciculaire (qui est aussi appelé bainite à bas carbone) est caractérisée par une haute densité de dislocation et des grains fins très déformés.

Les aciers à ferrite aciculaire peuvent être obtenus par trempe ou, de préférence, par refroidissement à l'air avec l'addition d'éléments convenables pour la trempabilité.

L'avantage principal de ce type d'acier est la combinaison exceptionnelle de hautes limites d'élasticité, haute ténacité et d'une bonne soudabilité. Les applications principales de ces aciers sont les pipelines dans les conditions de l'arctique.

#### ❖ **Aciers dual-phase**

Ils ont une microstructure composée de 80 à 90% de ferrite polygonale et 10 à 20% d'îlots de martensite dispersées dans la matrice ferritique. Ces aciers ont une faible limite d'élasticité, donc ils forment un acier à faible résistance, mais ils peuvent aussi fournir une haute résistance pour un composant fini à cause de leur durcissement par un travail à froid.  
[8]

### **I.4.1 Influence spécifique des éléments d'addition :**

Les principaux éléments d'addition du fer sont : le carbone, le chrome, le nickel, le tungstène, le molybdène, le vanadium, le manganèse, l'aluminium, le silicium, le titane, le niobium, l'azote... ; ils ont une influence significative sur les caractéristiques. L'action des éléments d'addition dépend essentiellement des deux facteurs décrits ci-dessous :

- Modification du domaine de stabilité de l'austénite. Certains éléments, comme le carbone, le nickel et le manganèse élargissent le domaine de stabilité de l'austénite et abaissent les températures de transformations. Avec des teneurs en nickel ou en manganèse suffisamment élevées, l'acier présente, même à la température ambiante, une structure austénitique

(additions de plus de 20% de nickel ou de plus de 10 % de manganèse) Ces éléments sont dits gammagènes. D'autres éléments, par contre dits alphagènes rétrécissent le domaine de stabilité de l'austénite et élèvent les températures de transformations on retrouve là, entre autres, Cr, Mo, Ti, W, V, Nb et Si.

- La tendance des éléments d'addition à se substituer en partie aux atomes de fer de la cémentite  $Fe_3C$  (cas du manganèse) ou à former des carbures spécifiques (MC). Citons dans l'ordre croissant d'affinité pour le carbone : Cr, W, Mo, V, Ti, et Nb. Par contre Si et Ni ne forment pas de carbures et se retrouvent en solution dans la ferrite. La présence des carbures autres que la cémentite est souvent souhaitable dans les aciers, car ils augmentent la résistance à l'usure et la tenue à chaud. Toutefois, à cause de la stabilité de ces carbures à haute température, il est souvent difficile de les mettre entièrement en solution dans l'austénite sans provoquer un grossissement des grains, qui est toujours préjudiciable aux propriétés des pièces trempées. [10]

L'acier liquide est naturellement effervescent (présence de gaz sous forme d'oxydes). Lors de la coulée, l'oxygène s'allie avec le carbone du métal pour former du CO qui cherche à s'échapper pendant la solidification. Si la tête du lingot se refroidit trop vite, il se produit, à la partie supérieure, une zone riche en porosités.

Pour éviter ces problèmes, la plupart des aciers sont coulés calmés. On ajoute à la charge des désoxydants dont l'action est plus forte que le carbone (ferro-manganèse, ferro-silicium, etc...) et l'aluminium en poche. Ces corps donnent un composé liquide qui passe dans le laitier qui

surnage. L'acier, en fait, est un corps métallique très complexe incorporant en solution divers éléments volontaires (C, Mn, Si,...) ou ajoutés (Cr, Ni, Nb, V, Mo, Cu, Al, Ti, B...) et des impuretés de l'élaboration (P, S, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>...). [11]

### **Le carbone**

Élément fortement gammagène (diagramme de Schaeffler), il contribue à stabiliser l'austénite lors de déformations à froid. Par contre, il peut provoquer la formation de carbures de chrome  $Cr_{23}CO_6$  intergranulaires qui diminuent la résistance à la corrosion intergranulaire.

### **Le chrome**

Cet élément d'addition alphagène est particulièrement important. Il augmente la trempabilité de l'acier. Par la formation de carbures de types  $M_7C_3$  (1400- 1500 HV), il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation,

retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique). Suite à son rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage).

### **Le nickel**

Grâce à son rôle gammagène, il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Son principal intérêt est d'améliorer la trempabilité et la ténacité. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique.

### **Le molybdène**

Cet élément donne naissance à des carbures de haute dureté (M<sub>6</sub>C -1500HV, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> -2000 HV) qui augmentent la résistance à l'usure à chaud. De plus cet élément ralentit la cinétique d'adoucissement au revenu. Il améliore la ductilité, la mise en solution des carbures diminue la teneur en austénite résiduelle après trempe. Enfin, le molybdène, élément alphagène, est fréquemment utilisé à des teneurs de 2 à 5 % pour améliorer la résistance à la corrosion dans presque tous les milieux, à l'exception des solutions nitriques bouillantes. Cependant, lorsque ce type d'alliage est soumis à des températures comprises entre 500 et 1000°C pendant des durées allant de 1 à 1000 heures, on observe la formation de composés intermétalliques dont la présence altère à la fois la résistance à la corrosion et les caractéristiques mécaniques. C'est le cas de l'alliage X2CrNiMo17-13-5. La composition chimique des précipités est fortement dépendante de celle de la matrice et n'est pas forcément stoechiométrique. Pour les nuances non stabilisées dont la teneur en carbone est de l'ordre de 0,05 %, il existe un risque de précipitation de carbures de type M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (Cr<sub>23</sub>CO<sub>6</sub>) aux joints des grains après des maintiens de longue durée entre 500 et 800°C. Cette précipitation diminue nettement la résistance à la corrosion intergranulaire. Les aciers inoxydables de cette famille contiennent généralement entre 0,02 et 0,10 % de carbone, 17 à 20 % de chrome, 7 à 25 % de nickel et 2 à 5 % de molybdène.

### **Le silicium**

Le silicium, autre élément alphagène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0,3 % en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite élastique,

de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures  $M_2C$  ce qui abaisse la fragilité du métal. Comparativement au chrome et à l'aluminium, l'addition de silicium influe d'une manière plus importante sur la résistance à l'oxydation entre 500 et 700°C. L'effet du silicium dans les alliages Fe-Al-Si. est d'établir une couche d'oxyde riche en silicium au dessus de la couche d'oxyde d'aluminium. L'oxyde formé est plus protecteur que l'oxyde d'aluminium et renforce l'effet protecteur de la couche d'alumine.

#### **Le niobium**

A un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique.

#### **Le titane**

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxidabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome.

#### **Le manganèse**

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant ; il augmente la trempabilité. permet d'obtenir des aciers à structure austénitique stable. Mais il participe à la formation de carbures et se trouve dans la cémentite. où il remplace une partie du fer.

#### **Le cuivre**

Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation par l'air.

#### **Le soufre**

Le soufre il diminue la résistance à la corrosion.

#### **Le vanadium**

Il affine le grain primaire donc la structure de coulée; puissant générateur de carbures, d'où accroissement de la résistance à l'usure, de la tenue en coupe et à la chaleur; de ce fait, utilisation privilégiée comme composant additionnel d'alliage dans les aciers rapides, de

travail à chaud et résistant au fluage à température élevée. Amélioration substantielle de la résistance au revenu, réduction de la sensibilité à la surchauffe. V affinant le grain et inhibant la trempe à l'air suite à la formation de carbures, il favorise l'aptitude au soudage des aciers de traitement. Suite à la constitution de carbures, accroissement de la résistance à l'hydrogène sous pression V rétrécit la zone  $\gamma$  et décale le point Curie en direction de températures plus élevées.

#### **Le zirconium**

Générateur de carbures; utilisation métallurgique en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénituration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge. [10]

### **I.4.2 Eléments alphagènes et gammagènes**

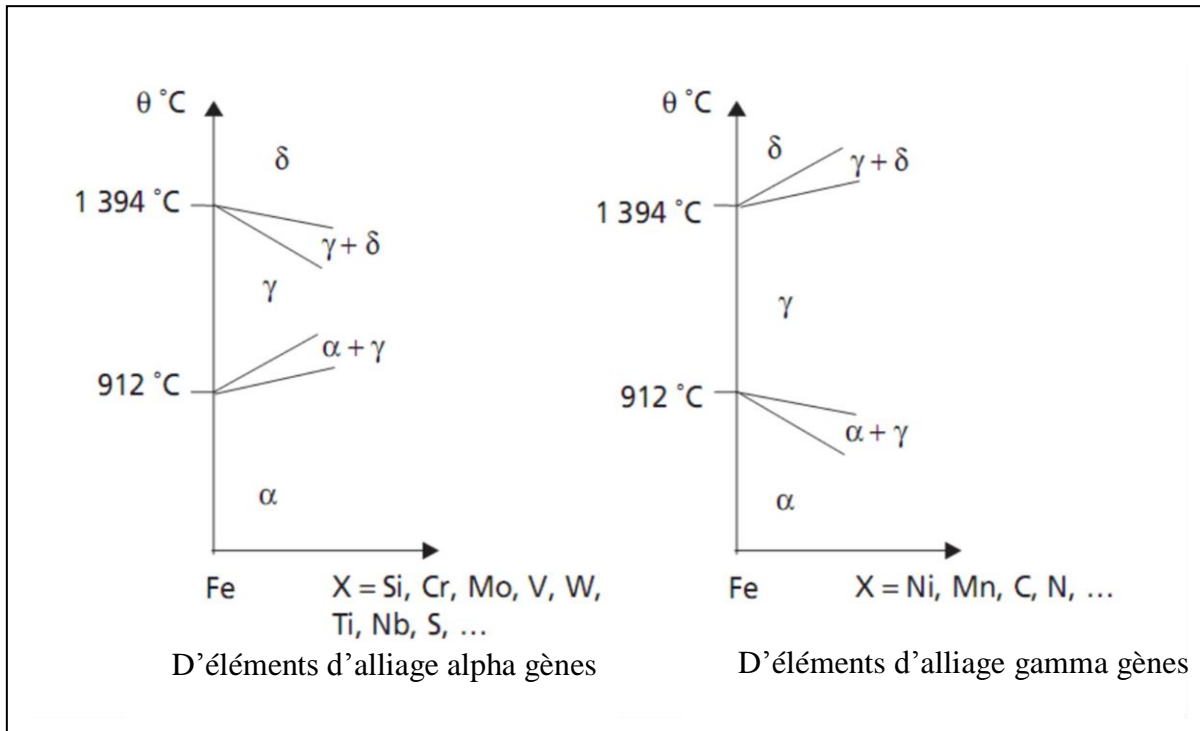
Le fer métallique existe sous deux formes cristallines :

- 1) La variété cubique centrée, stable au-dessous de  $910^{\circ}\text{C}$  (fer  $\alpha$ ) et au-dessus de  $1400^{\circ}\text{C}$  (fer  $\hat{\text{O}}$ ). Les solutions solides dans le fer  $\alpha$  sont appelées ferrites.
- 2) La variété cubique à face centrée, stable entre  $910^{\circ}\text{C}$  et  $1400^{\circ}\text{C}$  (fer  $\gamma$ ). Les solutions solides dans le fer  $\gamma$  sont appelées austénites.

Les éléments d'addition ont des solubilités très différentes dans ces deux variétés. Ce fait entraîne l'existence de domaines de transformations très différentes en présence d'éléments d'addition. Dans le fer pur, le passage de fer  $\alpha$  au fer  $\gamma$  se produit à une température définie. La présence d'un élément d'addition entraîne l'apparition d'un domaine plus ou moins étroit dans lequel les deux variétés allotropiques peuvent coexister en équilibre.

Les diagrammes permettent de classer les éléments d'addition en deux types :

- 1) Les éléments gammagènes qui abaissent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer  $\gamma$  et de ce fait abaissent les limites du domaine d'existence de l'austénite); ce sont essentiellement le nickel et le manganèse auxquels on peut ajouter le cuivre (peu utilisé comme élément d'alliage).
- 2) Les éléments alphagènes qui relèvent cette température (parce qu'ils augmentent la stabilité du fer  $\alpha$  et de ce fait élèvent les limites du domaine d'existence de la ferrite); ce sont les plus nombreux des éléments d'alliage tels chrome, silicium, molybdène, vanadium, tungstène, titane. [12]



*Figure I.2 : Évolution des domaines d'existence des variétés allotropiques du fer par addition. [12]*

## I.5 Diagrammes 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.3) 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.

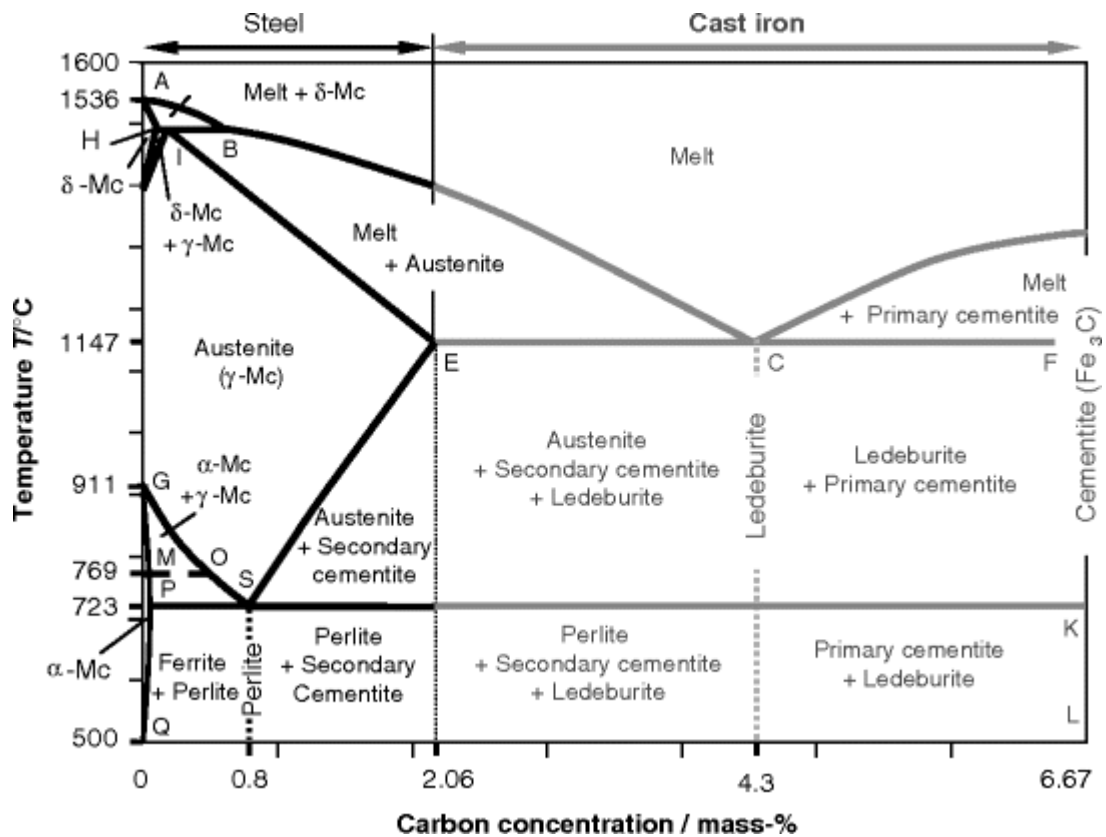


Figure. I.3 : Diagramme d'équilibre fer-carbone. [13]

## I.5.1 Les principaux phase de diagramme de Phase

### I.5.1.1 La ferrite

Région marquée A, contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite alpha ou fer alpha. Cette phase contient un maximum de 0.02% de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue.

Tous les aciers et fontes contiennent de la ferrite. Cette phase comporte la même quantité de carbone, quelle que soit la teneur en carbone de l'acier ou de la fonte. La ferrite se forme seule dans les régions A et E, elle se forme conjointement à de la cémentite E, F et G.

La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace.

### I.5.1.2 L'austénite

L'austénite région C'est la dernière zone importante sur le diagramme fer-carbone. Cette phase est stable au-dessus de 727°C (1341°F) et en dessous de 1538°C (2800°F). L'austénite



peut contenir 1.86% de carbone. Même si elle ne se forme pas à température ambiante, c'est une région importante pour le traitement thermique des aciers. C'est une structure cubique faces centrées, qui est différente de la structure cubique centrée de la ferrite. L'austénite est également appelée fer gamma.

### I.5.1.3 La cémentite

La cémentite pure a la formule moléculaire  $Fe_3C$ . Elle contient 6.69% de carbone. A cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la Comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le nom de carbure de fer.

Quel que soit l'endroit où la cémentite est présente dans le diagramme fer-carbone, elle contient toujours 6.69% de carbone. Dans la région K, entre les températures 1152°C (2106°F) et 727°C (1341°F), la cémentite est mélangée à de l'austénite. En dessous de 727°C (1341°F) on peut trouver de la cémentite seule (dans les régions F et G), ou combinée à de la ferrite sous forme de perlite (régions E, F, et G). Par conséquent, la cémentite se forme dans tous les aciers et fontes.

### I.5.1.4 La perlite

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure. Cette microstructure est illustrée à la figure 1.9.

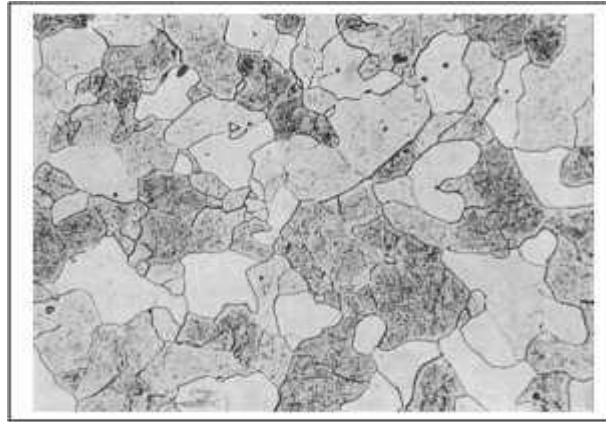
la perlite pure (ligne B) se forme à 727°C (1341°F), et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone, on trouve de perlite et de la ferrite, comme dans la région E. pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite (régions F et G).

### I.5.1.5 Le point eutectoïde

Le point eutectoïde D, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme.

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes (région E). La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers

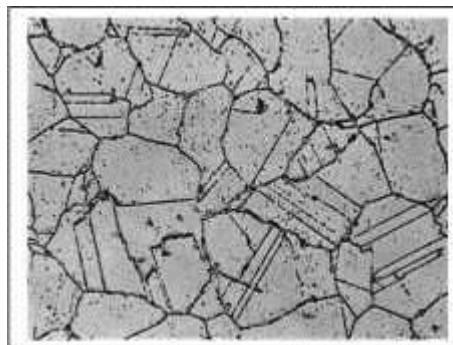
hypereutectoides (région F). La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite. [14]



**Figure. I.4 :** Structure ferritique

( Fer Armco. Traitement : 950 °C (30 min) - four. Attaque Nital (3 %). Grossissement : 180)

[14]



**Figure.I.5:** Structure austénitique (avec précipités de carbures)

Acier à 0.12 %C- 25 %Cr -20% Ni- 1.5%Mn- 1. %Si Traitement: 1125 °C(1h) -eau - 800 K (30 min)Attaque électrolytique (acide oxalique 10 %) Grossissement : 900. [14]



**Figure .I.6 :** Structure perlitique

Acier à 0,8 % C - 0,21 % Mn - 0,22 % Si Traitement : 800 °C (30 min) – four Attaque Nital (3 %) Grossissement : 900. [14]

## I.6 Traitement thermique des aciers

### I.6.1 Définition

On désigne sous le nom de « traitement thermique » une opération au cours de laquelle une pièce de métal est tout d'abord portée de la température ordinaire à une certaine température plus élevée, puis maintenue à cette température pendant un certain temps et enfin ramenée à la température ordinaire.

### I.6.2 Effet des traitements

Les effets de ces traitements thermiques dépendent pour un même métal :

- de la température T.
- de la durée de maintien de la pièce métallique à la température T.
- De la vitesse avec laquelle sont localisées les opérations de chauffage et de refroidissement

### I.6.3 But du traitement thermique

Le but du traitement thermique est d'obtenir une amélioration d'une ou de plusieurs des caractéristiques mécaniques du métal traité.

### I.6.4 Les différents types de traitements thermiques

#### I.6.4.1 Le recuit

Il a pour but de faire disparaître les états hors équilibre provenant des traitements antérieurs, thermique ou mécaniques (tensions internes, écrouissements.)

✓ **Principe** : Il consiste à :

- un chauffage de l'acier en général au-dessus de la température d'austénitisation. Selon le pourcentage de carbone et des éléments d'addition.
- un maintien isotherme
- un refroidissement lent très inférieur à la vitesse critique de trempe.

✓ **Résultats après recuit**

L'état recuit correspond aux valeurs minimales de ténacité (H. R) et aux valeurs maximales de ductilité

(A%, Z%) et sa structure est du type **ferrite - perlite**.

### I.6.4.2 La trempe

✚ **Principe de la Trempe :** C'est un Traitement Thermique qui consiste :

- A chauffer l'acier à une température **d'austénitisation** égale à :

$A_3 + 50 \text{ °C} < A_{c3}$  **pour les aciers** hypoeutectoides

$A_1 + 50 \text{ °C} (A_{c1})$  **pour les aciers** hypereutectoides

\* à le maintenir un certain temps à cette température afin de permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse.

à le refroidir suffisamment vite par immersion dans un fluide (eau, huile, bain de sel).

✚ **Pour un acier donné :**

- ❖ La composition chimique
- ❖ La température de la trempe
- ❖ La loi de refroidissement

Sont des facteurs essentiels dits facteurs de trempe

✚ **Objectif de la trempe :** La trempe pour objectif d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour de puis la température d'austénitisation, jusqu'à la température ambiante et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce.

✚ **Trempabilité de l'acier :** La Trempabilité d'un l'acier caractérise les possibilités de la réalisation de la structure,

- Plus la trempabilité d'un acier augmente, plus est grande la section des aciers des pièces dans lesquelles, pour condition de refroidissement donnée, on peut provoquer la transformation martensitique à cœur.

- Moins est nécessaire de refroidir rapidement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur.

En fonction de la vitesse de refroidissement, l'austénite se transforme en martensite, bainite ou ferrite fine.

- **Martensite :** c'est le constituant le plus dur de la trempe ( $HV = 800$ ) mais il est fragile.

C'est une solution solide d'insertion saturée en carbone dans le fer.

- **Bainite :** c'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (ferrite + cémentite) mais de structure particulièrement fine.

**Remarque :** La plus petite vitesse de refroidissement correspondant à une dureté de trempe acceptable est appelée vitesse critique de trempe. Si cette vitesse de refroidissement est inférieure à la vitesse critique de trempe, la trempe est dite douce et on obtient un constituant appelé troostite (moins dure que la bainite).

Après trempe, on obtient les modifications suivantes sur les caractéristiques mécaniques :

- Rm, Re et H augmentent de valeur
- A%, K et Z% diminuent de valeur

Défaut de la trempe :  
Le refroidissement brusque du métal chaud immergé dans un fluide de trempe est accompagné d'une contraction. L'extérieur de la pièce se refroidissant plus vite que le cœur, il se produit des tensions internes qui risquent d'entraîner sa rupture. Si la contrainte dépasse la résistance à la rupture, il se crée des fentes appelées tapures. Des déformations peuvent aussi apparaître sur les pièces trempées. Pour remédier à ces défauts, la trempe est obligatoirement suivie d'un autre traitement thermique appelé le revenu.

Les aciers doux (%C inférieur à 0.25%) ne prennent pas la trempe

#### I.6.4.3 Le revenu

Traitement thermique effectué sur un produit après durcissement par trempe, modifications lui conférant les caractéristiques d'emploi désirées.

Ce traitement provoque la formation d'une structure plus proche de l'état d'équilibre physico-chimique celle obtenue lors de la trempe

❖ **Principe du Revenu :** Le cycle thermique comporte successivement

- Un réchauffage jusqu'à une température déterminée mais inférieure à celle de Ac1
- Un ou plusieurs maintiens à une ou plusieurs températures déterminées.
- Un ou des refroidissements jusqu'à la température ambiante par un mode approprié ou suivant une loi fixe.

On distingue les revenus à haute température et les revenus à basse température, la température couramment atteinte pour un revenu après trempe martensitique est de 500 à 600°C. En règle générale, le revenu se traduit :

Soit par un adoucissement qui conduit à une amélioration des caractéristiques de ductilité,  
Soit par un durcissement secondaire.

Au niveau de la microstructure, lorsqu'on effectue un revenu, les atomes de carbone qui sont dans la martensite sous forme de solution solide vont pouvoir diffuser car la cinétique

à 500 à 600°C est beaucoup plus rapide qu'à température ambiante où elle est complètement négligeable. Ainsi, la propriété de résilience sera améliorée.

❖ **Différents types de revenu (après trempe) :**

- Le **revenu** dit de **détente** est généralement réalisé à une température comprise entre 180 et 220 °C. il ne fait intervenir que le premier stade du revenu et n'est donc appliqué qu'à une structure totalement martensitique. Il provoque une précipitation généralement incomplète (suivant la température) du carbone. Un tel revenu ne provoque qu'une faible baisse de la résistance à la traction et de la dureté, par contre, il augmente très sensiblement la limite d'élasticité et améliore un peu le niveau des caractéristiques de ductilité.

- Le **revenu** que nous qualifions d'**habituel** ou de banal est réalisé à une température comprise entre 500 et 575 °C environ et provoque la précipitation complète du carbone sous forme de cémentite

Le **revenu de durcissement secondaire** est réalisé à une température comprise entre 600 et 675 °C environ et provoque, dans les aciers contenant des éléments d'alliage carburigène la précipitation complète du carbone sous forme de carbures spéciaux. Ce type de revenu est particulièrement effectué sur les pièces devant travailler à haute température. [15]

## I.7 Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline.

Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis. Le traitement thermomécanique est l'association:

- d'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage- refroidissement (trempe, revenu...);
- d'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écroutissage (laminage, forgeage, tréfilage...).

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent

présenter des propriétés à l’amorçage de rupture d’une part et vis-à-vis de la propagation de l’arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D’autre part, Ils présentent également une limite d’élasticité élevée due à la recherche d’une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d’élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers.

Les essais mécaniques sur les aciers sont réalisés dans les deux sens : longitudinale et transversale (Figure.I.7)

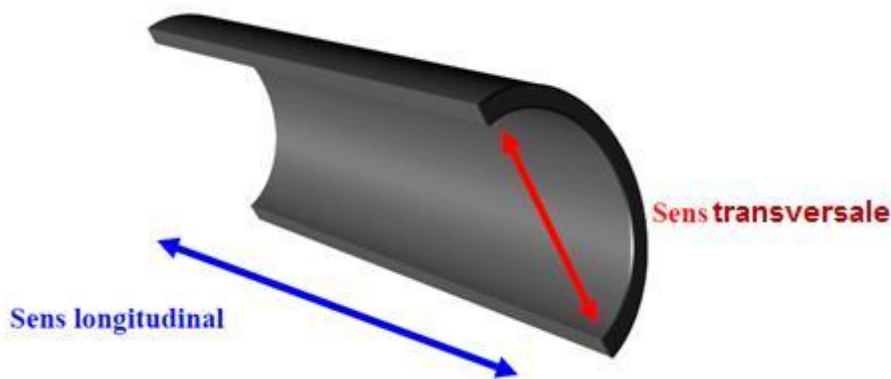


Figure I.7 : Sens longitudinale et transversale de tube. [11]

Le tableau suivant (Tableau. I.2) signifie les caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5 Tubes de conduite PSL 1 et PSL 2 qui utilisé beaucoup dans l'industrie de tube de pipeline, remarque les valeurs de la résistance rupture et la limite élastique d'acier, cela est dû à lrésultats des essais expérimental. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont les suivantes :

Tableau I.1 : Caractéristique mécanique par (N/mm<sup>2</sup>) (Tubes de conduite PSL 1). [11]

API 5L - PSL1	A	B	X42	X52	X56	X60	X70
Résistance rupture N/mm <sup>2</sup>	340	420	420	470	520	517	672

# CHAPITRE II

## *PROCEDES DE SOUDAGE*



## II.1 Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [16].

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base [17].

## II.2 Procèdes de soudage

Les procédés de soudage présentés dans ce chapitre sont des procédés de soudage à l'arc manuels ou semi-automatiques. Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité (pour le courant continu – CC (DC)), le choix d'un gaz protecteur (s'il y a lieu), la vitesse de dévidage du fil-électrode (s'il y a lieu), l'élaboration de la séquence de soudage et, enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.).[18]

### II.2.1 Principe du soudage à l'Arc et notion d'électricité

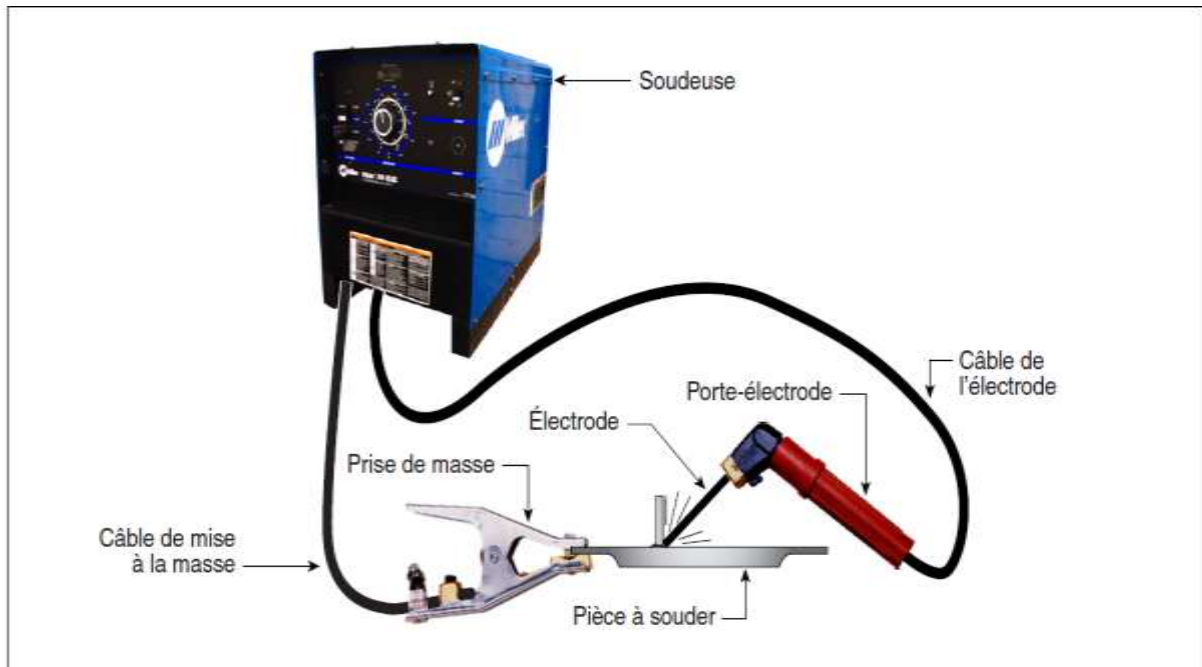
Le procédé de soudage à l'arc a été découvert vers 1885. Pour ce qui est du procédé de soudage avec électrode enrobée, ses applications demeurent nombreuses encore aujourd'hui. Bien que le procédé tende à disparaître de plus en plus des ateliers de fabrication en série, il demeure très utilisé lorsqu'il s'agit d'effectuer des réparations ou dans le cas de certaines applications spécialisées, dans lesquelles des propriétés particulières sont requises. De plus, le procédé SMAW a servi à développer les autres procédés de soudage à l'arc utilisant des fils-électrodes (FCAW, GMAW, SAW, MCAW). Ces derniers sont moins polyvalents que le SMAW, quoique leurs possibilités d'utilisation augmentent chaque année.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) demeure toujours un procédé très utilisé, car il permet une grande liberté d'exécution, une grande autonomie, et l'équipement requis est le moins coûteux qui soit. Ainsi, selon la technique utilisée, il devient possible de

réaliser des soudures dans n'importe quelle position de soudage. Les dépôts obtenus lors de l'application de ce procédé possèdent des qualités non négligeables, puisqu'ils sont souvent plus purs que le métal de base, et que leurs propriétés mécaniques se révèlent meilleures.

Parmi les applications concrètes du procédé de soudage SMAW, on trouve la fabrication et la réparation de :

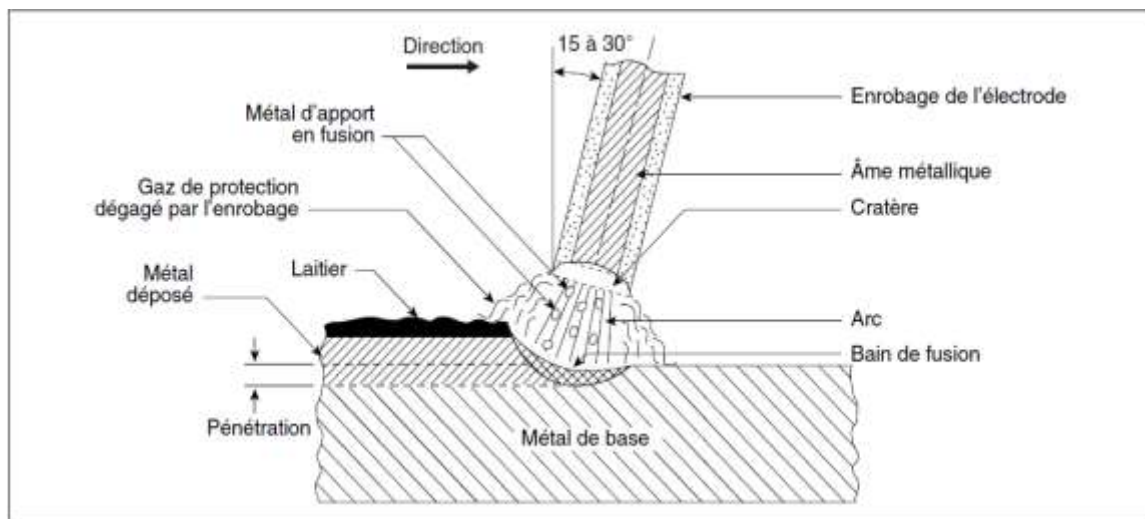
- ✓ récipients et tuyaux sous pression;
- ✓ réservoirs de stockage;
- ✓ ponts et bâtiments;
- ✓ navires et wagons. [18]



*Figure II.1 : Circuit électrique pour le soudage à l'arc. [18]*

### II.2.1.1 Le procédé de soudage SMAW

Le procédé de soudage SMAW consiste à créer la fusion des métaux par la chaleur d'un arc électrique établi entre une électrode métallique enrobée et le métal de base. Le métal d'apport est fourni par l'électrode. Le bain de fusion est protégé de la contamination atmosphérique par la décomposition de l'enrobage de l'électrode (Figure II.2). [19]



**Figure II.2 :** Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée. [19]

Le poste de soudage produit un puissant courant électrique qui circule entre l'extrémité de l'électrode (baguette de métal d'apport) et le métal de base à souder. Le courant électrique produit un arc d'une chaleur si intense (de 3 982 à 5 537 °C) que l'extrémité de la baguette de métal d'apport ainsi que la surface du métal de base sont portées à la fusion. La force de l'arc dirige le métal d'apport fondu vers le bain de fusion de façon à former le cordon de soudure. Dans le procédé de soudage SMAW, la source de chaleur (énergie électrique) et l'apport de métal (électrode) sont indissociables. Le soudage à l'arc est un procédé de soudage avec fusion des bords et addition de métal d'apport.

Le courant électrique circule à l'aide d'un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base. Puis, il poursuit sa course en passant par le câble de mise à la masse pour retourner au poste de soudage. [19]

### ➤ **Avantages et inconvénient**

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

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.

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.

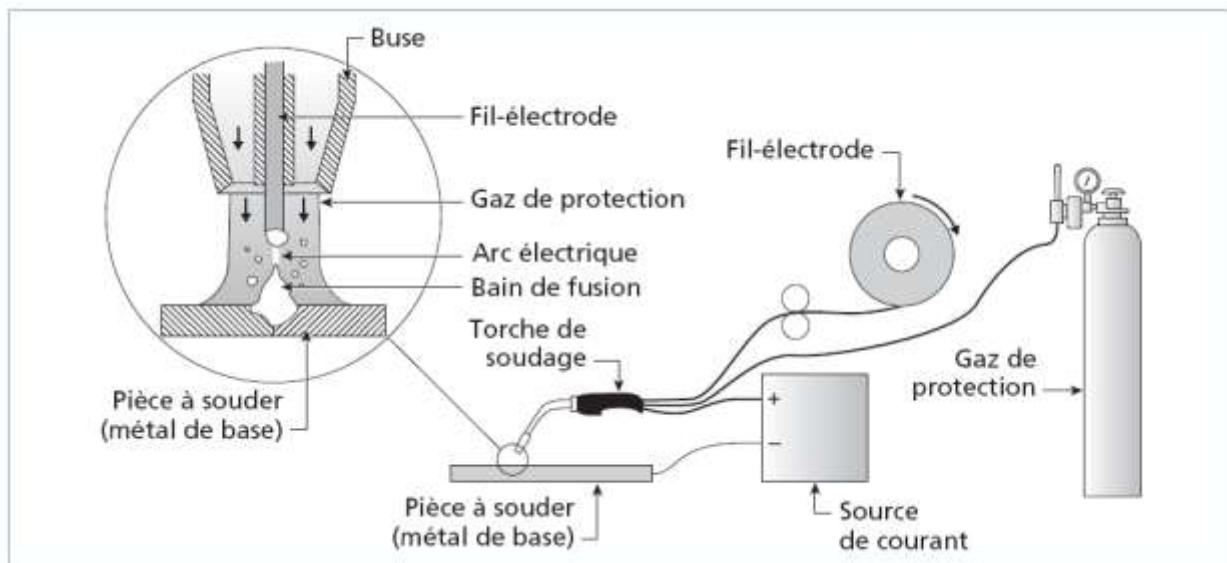
### ➤ Applications

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, 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 avec une précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier. [19]

#### II.2.1.2 Le procédé de soudage GMAW

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (Figure I.3).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.



*Figure II.3: principe de fonctionnement du procédé GMAW. [20]*

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

1. Le procédé MIG (Metal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;

2. Le procédé MAG (Metal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif. [20]

#### ➤ **Avantages et inconvénients**

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) 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.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier. La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables. [20]

#### ➤ **Applications**

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. Les applications spécifiques dépendent généralement du mode de transfert choisi dans le tableaux : [20]

Tableau II.1: Applications de type de soudage GMAW. [20]

Mode de transfert	Applications
Par court-circuit	· Soudage de tuyauterie · Soudage en position des aciers · Passe fond sur plaques épaisses
Transfert globulaire	· Soudage avec CO <sub>2</sub> comme gaz de protection pour les acier (le CO <sub>2</sub> est plus économique) · Grosses pièces épaisses comme, par exemple, des dents de pelles mécaniques
Par pulvération axiale	· Soudage avec au moins 85% d'argon comme gaz de protection · Soudage rapide à pénétration profonde · Soudage de tôles épaisses
GMAW pulsé	· Mode le plus polyvalent, peut souder à peu près tout
Transfert à froid	· Plaques minces d'acier · Soudage de plaques minces d'acier avec l'aluminium

### II.2.1.3 Les procédé de soudage MIG/MAG

L'arc est protégé entre un fil consommable et les bords de la pièce à souder. Le fil en fusion et le bain de soudure est protégé de l'oxydation de l'air par un flux de gaz inter (le procédé se dénomme alors M.I.G = métal inert gaz) ou actif (procédé M.A.G = métal active gaz). Le déroulement du fil à vitesse constant permet d'alimenter en métal d'apport le bain de fusion.

Ces différentes fonctions de protection et d'amenée de métal sont remplies par une installation qui comprend:

- ✓ Le générateur de courant continu;
- ✓ Une source de gaz protecteur;
- ✓ Un système de refroidissement à la troche;
- ✓ La torche ou pistolet. [21]

### ➤ Fil d'apport et gaz de protection

On distingue les gaz internes et les gaz actifs:

- ✓ Les gaz internes à base d'argon, pur ou mélange à l'oxygène, ou d'hélium sont surtout utilisés pour les métaux légers et les aciers inoxydables;
- ✓ Les gaz actifs servent au soudage des aciers au carbone ou faiblement alliés (acier à tube). Le gaz carbonique, parfois mélangé à l'oxygène, est le gaz actif le plus fréquemment utilisé. Il permet d'obtenir une pénétration plus importante et augmente la concavité du cordon.

La composition des fils dépend:

- ✓ La nature des matériaux à souder;
- ✓ Des pertes d'éléments pendant le soudage. [21]

### ➤ Principes du procédé de soudage MIG/MAG

Un fil métallique passe dans la torche et se trouve fondu dans l'arc. Le fil constitue à la fois un conducteur de courant et un métal d'apport. L'énergie électrique est fournie par une source d'alimentation de soudage. L'arc et le bain de fusion sont protégés par un gaz de protection soit inerte, soit actif. [20]

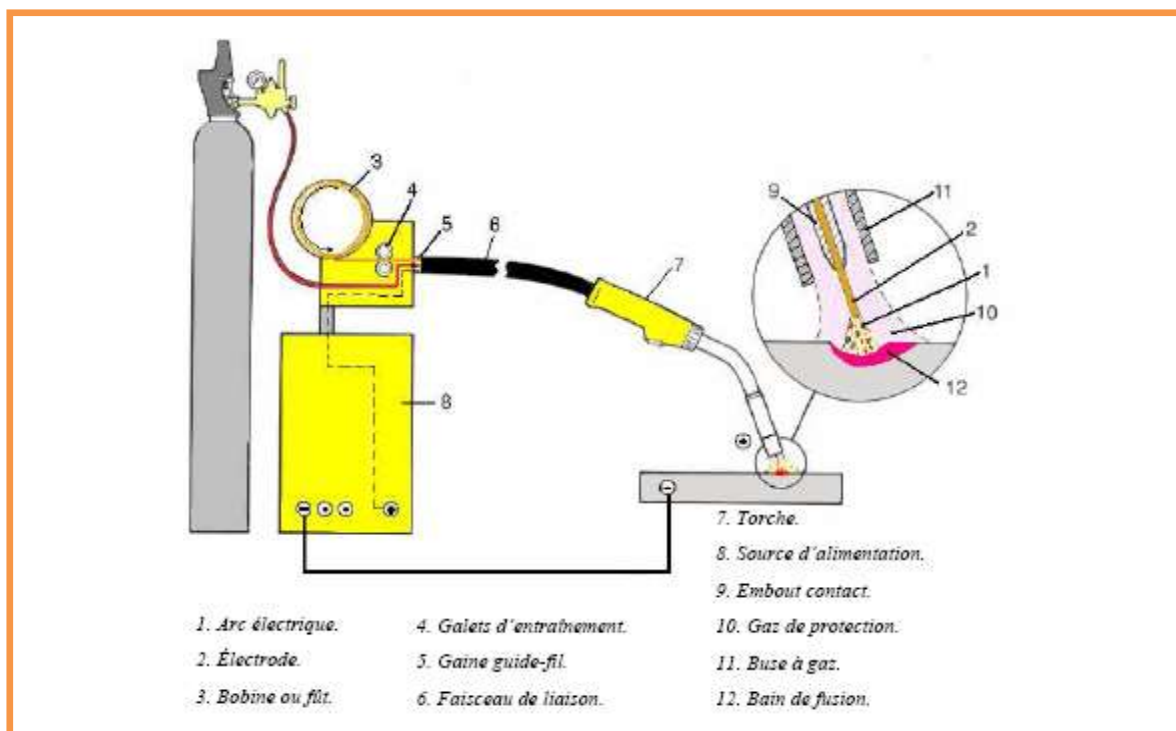


Figure II.4:Principes du procédé de soudage MIG/MAG. [20]

**➤ Les avantages du procédé MIG/MAG**

Le procédé de soudage MIG/MAG est plus utilisé que tout autre procédé et garantit :

- ✓ De hautes performances.
- ✓ Un apport d'énergie vers la pièce relativement faible.
- ✓ Une automatisation simple.
- ✓ La productivité en MIG/MAG face au MMA.
- ✓ Pas de remplacement continu d'électrodes.
- ✓ Pas de laitier à enlever, sauf sur certains fils fourrés.
- ✓ Le taux de fusion est plus élevé qu'en MMA, (plus forte concentration de courant dans le fil).

[21]



*Figure II.5.a: du procédé de soudage MIG/MAG. [21]*

**➤ Les inconvénients du procédé MIG/MAG**

- ✓ Un équipement de soudage plus complexe, plus coûteux et moins compact que dans le cas du MMA.
- ✓ Peu de possibilités d'utilisation en extérieur dans lamesure où le gaz de protection doit être protégé des courants d'air.
- ✓ Les torches de soudage sont plus grandes. L'accessibilité au métal de base peut être plus limitée lors de certaines utilisations. [22]





*Figure II.6.b: du procédé de soudage MIG/MAG. [22]*

### ➤ Les Applications MIG/MAG

Le procédé de soudage MIG/MAG est flexible :

- ✓ Une large plage d'épaisseur de métaux (à partir de 0,5 mm).
- ✓ Le faible apport d'énergie permet d'éviter la déformation et la distorsion de métaux fins.
- ✓ Dans le cas de métaux plus épais, les passes de remplissage peuvent être effectuées, garantissant de hautes performances.
- ✓ Permet de souder les métaux les plus communs tels que le métal doux, faiblement allié et inoxydable, l'aluminium et ses alliages, et d'autres métaux non-ferreux.
- ✓ Permet de souder dans toutes les positions de soudage.
- ✓ Le soudo-brasage MIG/MAG peut joindre des métaux sans endommager les protections anti-corrosion (exemple : les métaux galvanisés).
- ✓ Les avantages du procédé MIG/MAG ont permis d'obtenir de nombreuses applications, à la fois dans l'industrie générale et dans de plus petits ateliers.
- ✓ Quelques exemples d'industries dans lesquelles ce procédé est communément utilisé : l'automobile, la construction navale, le BTP et l'industrie offshore. [20]

#### II.2.1.4 Soudage à Parc sans gaz de protection procédé TIG

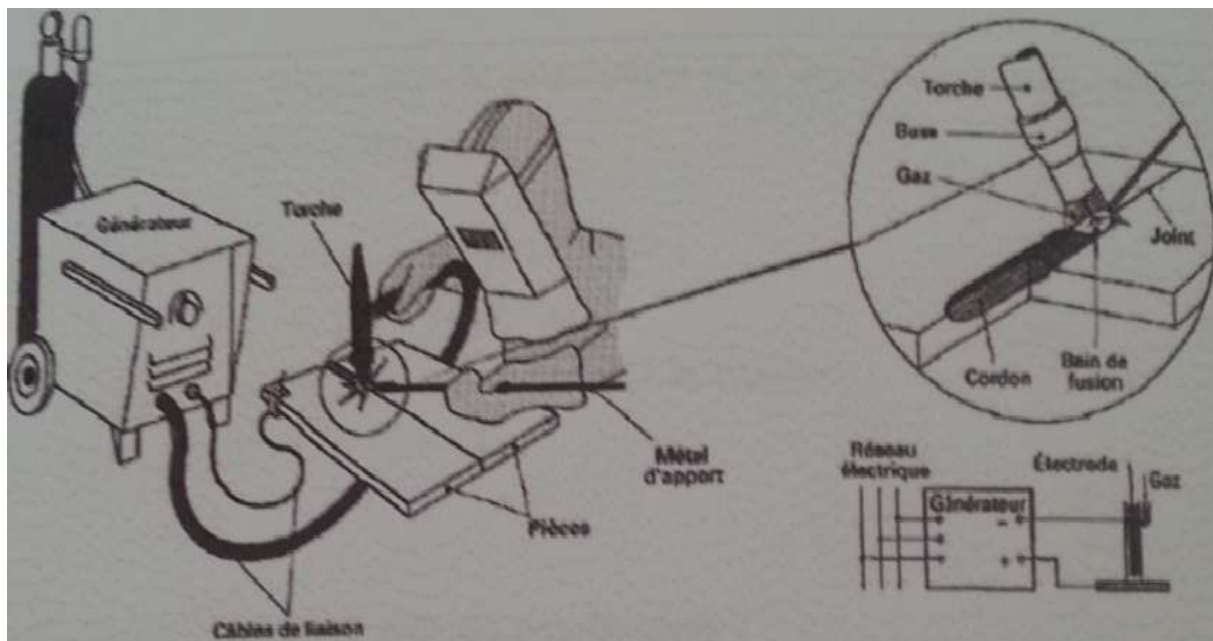
Le TIG produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui dans bien des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. De plus, autre aspect non négligeable, ce procédé s'applique à des matériaux aussi divers que les aciers au carbone, inoxydables, alliages de nickel, titane, zirconium, les alliages d'aluminium et de cuivre.

➤ **Principe et mise en œuvre du procédé**

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungsten Iner Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) gas tungstène arc welding).

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires(Figure.II.7).

A l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle du métal de base, on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce ainsi que le métal d'apport. Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de l'air le métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation d'électrode au tungstène. [21]



*Figure II.7 : schéma du procédé TIG. [21]*

### ➤ Les gazs de protection en TIG

Les gazs inertes utilisés sont soit de l'argon, soit de l'hélium soit des mélanges argon-hélium. L'argon, de qualité commerciale « soudage », est le gaz le plus utilisé car il convient à presque tout les cas d'application. L'hélium, plus coûteux que l'argon, est utilisé lorsque Ton peuttirer profit du fait qu'il permet de plus grandes vitesses de soudage et une pénétration plus profonde. Quant aux mélanges (généralement à **25%**, **50%** ou **70%** hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix. [21]

## II.3 Conséquences du procédé de soudage

### II.3.1 Conséquences thermiques du soudage

Les opérations do soudage engendrent des cycles thermiques qui conduisent à des changements de phase à l'état liquide et solide dans la zone soudée. Les cycles thermiques sont caractérisés par un chauffage suivi d'un refroidissement. L'amplitude et la durée de ce trajet thermique varie en fonction de la distance par rapport à la source de la chaleur qui peut être mobile (ex. soudage à l'arc) ou non (ex. soudage par résistance).

### II.3.2 Conséquences métallurgiques du soudage

Les cycles thermiques du soudage conduisent à des modifications métallurgiques du matériau de hase dans la zone où la température maximale obtenue au chauffage est suffisamment importante. Ces modifications métallurgiques dépendent de la composition chimique locale du matériau de base et des conditions de soudage telles que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la source de chaleur et les conditions de refroidissement.

### II.3.3 Conséquences mécaniques du soudage

L'histoire thermique et les modifications de microstructures provoquées par le soudage s'ac- compagnent naturellement d'évolutions importantes des propriétés mécaniques par rapport au métal de base. D'autre part, la localisation de la source de chaleur ou autrement dit. les dila- tations hétérogènes et les variations des propriétés mécaniques du matériau en fonction de la température et de la microstructure ainsi que les conditions de bridage des pièces engendrent les contraintes et les déformations résiduelles dans les structures après soudage.

### II.3.4 Couplage thermique, métallurgique et mécanique

Lors d'une opération de soudage, les phénomènes physiques peuvent être répertoriés dans trois catégories :

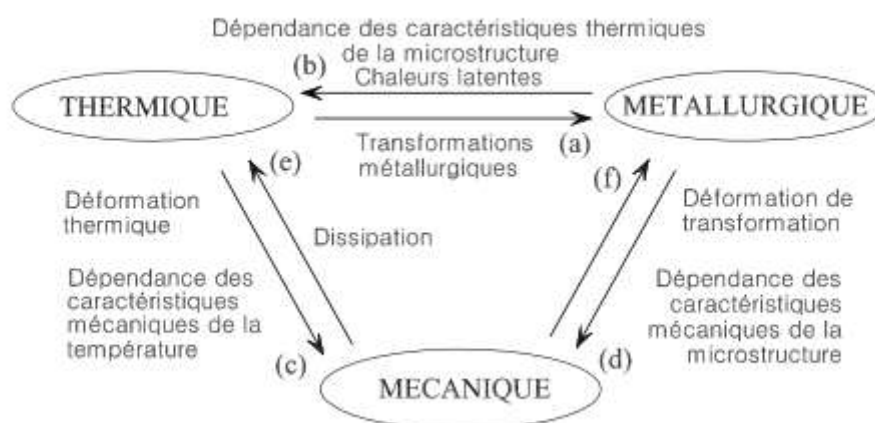
- **thermique** : apport de chaleur, conduction et convection.
- **métallurgie** : transformations allotropiques, évolutions microstructurales.
- **mécanique** : contraintes et déformations résiduelles induites lors du soudage.

Les interactions entre ces trois phénomènes sont souvent représentées par la (Figure.II.8).

Lors de la simulation numérique d'une opération de soudage, le calcul thermique permet de simuler le champ de température dans la pièce. Ce calcul nécessite la connaissance des caractéristiques thermiques, le comportement thermique du matériau ainsi que la quantification de l'apport de chaleur. Ce calcul est généralement à la base des calculs métallurgique et mécanique.

L'état métallurgique est ensuite obtenu à partir du champ de température, de l'état métallurgique du matériau de base et des cinétiques de transformation de phase pour chaque histoire thermique du soudage.

L'état mécanique est ensuite déterminé à partir de la loi de comportement et des chargements appliqués à la structure (bridage, chargement thermique, chargement mécanique). Il dépend très fortement des états thermiques et métallurgiques précédemment calculés. Le calcul mécanique fournit les champs de contraintes et déformations résiduelles.



**Figure II.8** : Couplages entre les phénomènes thermique, métallurgique et mécanique induits lors d'une opération de soudage. [23]

Généralement, les interactions entre ces différents phénomènes peuvent être classées en six catégories :

- a- Le premier type d'interaction représente l'influence de la température sur la microstructure de l'acier. Pour les aciers, il décrit l'effet de la température sur la cinétique de transformation de phase à l'état solide et le changement d'état liquide-solide.
- b - Le deuxième type d'interaction couvre l'influence de l'état métallurgique sur l'état thermique. Il est caractérisé par les chaleurs latentes de changement d'état liquide-solide et de transformations de phase à l'état solide et par la dépendance des caractéristiques thermiques de la microstructure.
- c - Le troisième type d'interaction représente l'influence de la température sur l'état mécanique du matériau. Il provient de la dépendance des caractéristiques mécaniques de la température et de la dilatation thermique du matériau.
- d - Le quatrième type d'interaction représente l'influence de l'état métallurgique- sur l'état mécanique, il décrit la dépendance du comportement du matériau par rapport à l'évolution de la microstructure et permet d'obtenir une déformation de transformation (TRIP - Transformation Induced Plasticity).
- e - Le cinquième type d'interaction décrit l'influence de l'état mécanique sur l'état thermique par la prise en compte des dissipations dues aux mécanismes irréversibles.
- f - Le sixième type d'interaction concerne l'influence de l'état mécanique sur les cinétiques de transformation métallurgique. [23]

## II.4 Les défauts des soudages

### II.4.1 Les fissures

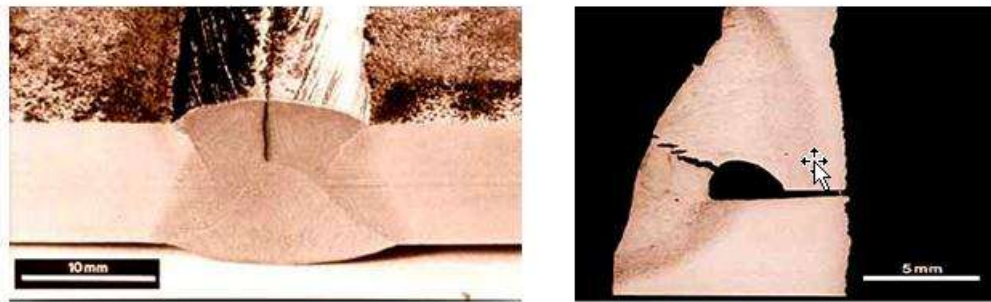
Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le Métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. La fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique...Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être

complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. [24]

## II.4.2 Fissure à chaud (ou de solidification)

### II.4.2.1 Définition

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Figure II.9.).

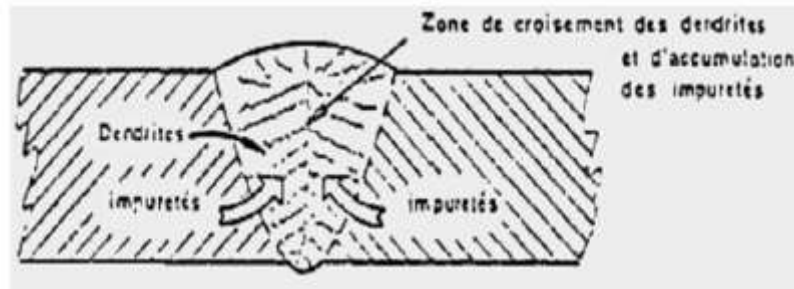


*Figure II.9 : Fissure à chaud (ou de solidification).* [24]

### II.4.2.2 Causes possibles

Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/ largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).

- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Figure II.10.). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.
- Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.
- Soudures d'angle avec concavité importante : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.
- Transformations allotropiques: on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.



**Figure II.10** : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

[25]

#### II.4.2.3 Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes: examen par ultrasons ou radiographie.

#### II.4.2.4 Méthode de réparation

Eliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

#### II.4.2.5 Mesures préventives

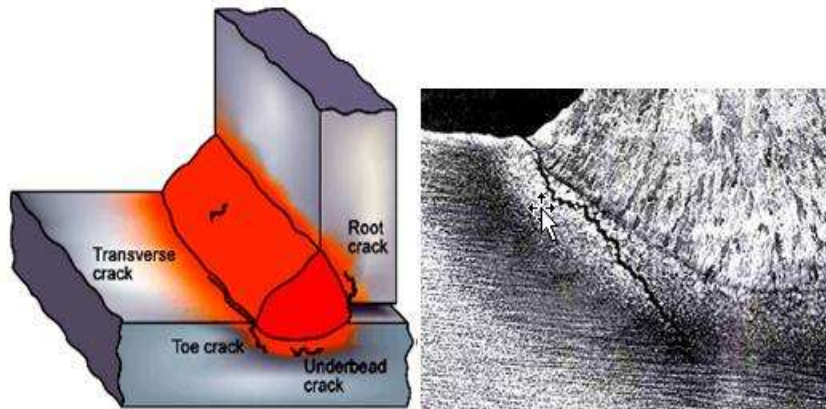
- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0.05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important. [25]

### II.4.3 Fissures à froid (fissures d'hydrogène)

#### II.4.3.1 Définition

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les

Travaux de soudage (Figure II.11.)



*Figure II.11 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène). [25]*

#### II.4.3.2 Causes possibles

La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une structure de trempe et qui est donc fissurant.

Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur.

De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments.

#### II.4.3.3 Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

#### II.4.3.4 Méthode de réparation

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration.



### II.4.3.5 Mesures préventives

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les Électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique.
- S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.
- Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement. [21]

## II.5 Contrôle non destructif (CND)

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. [26]

### II.5.1 contrôle visuel

C'est le premier des CND. il est le préliminaire indispensable à tous les autres examens de compacité qui peuvent être réalisés.

Il commence dès la réalisation de la soudure ; la personne la mieux placée pour le réaliser à ce stade est donc le soudeur lui-même qui doit être qualifié. Cette qualification sanctionne en effet sa « compétence », c'est-à-dire non seulement son habilité à souder, mais également son aptitude à juger de sa propre réalisation (auto contrôle de sa fabrication) .

Le contrôle visuel porte sur l'aspect et les défauts géométriques des cordons (dimension de la gorge, caniveaux, morsures, surépaisseur ou affaissement, défaut d'alignement, déformation angulaire,...).

Généralement à l'œil nu, il est amélioré par l'utilisation d'un petit matériel (jauges, loupe, endoscope). [26]



*Figure .II.12 : principe de contrôle visuel. [26]*

### II.5.2 contrôle par ressuage

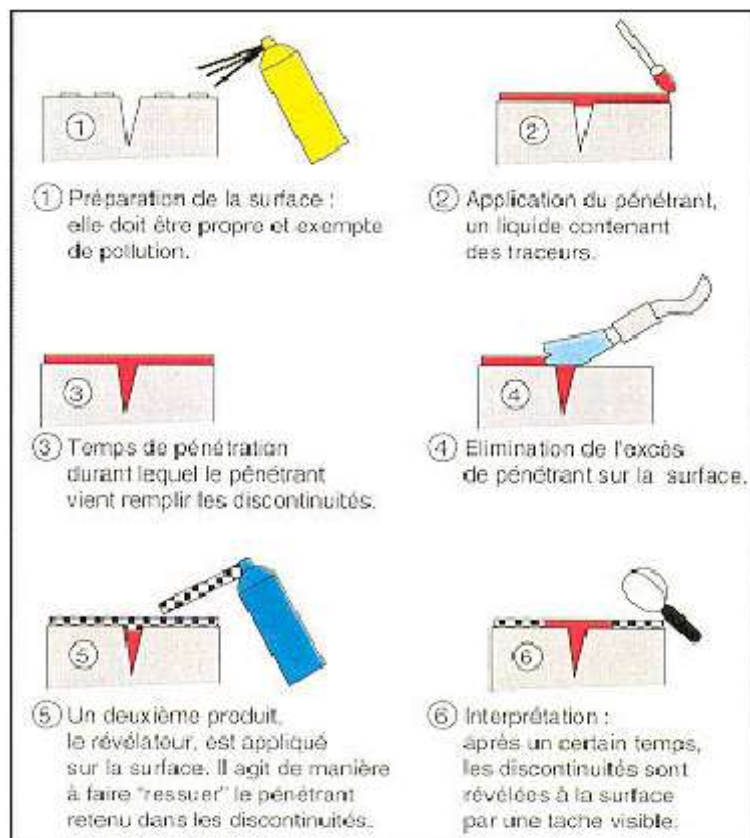
Ce procédé permet de détecter la présence de défaut débouchant à la surface des pièces ou soudures.

Cet examen consiste en l'application (pinceau, bombe aérosol) sur la surface des matériaux et des soudures d'un liquide « pénétrant » à faible tension superficielle contenant des pigments visible (traceur coloré fluorescent).

Ce liquide pénètre par capillarité dans tous les interstices constitué par les défauts débouchant à la surface de la pièce.

Après pénétration du liquide, élimination de l'excès de pénétrant en surface, et éventuellement séchage, on applique (pulvérisation) un révélateur (poudre) après quelque temps, le liquide retenu dans les défauts débouchant est absorbée par capillarité dans le révélateur d'où le terme ressuage.

En pratique, il est important d'observer l'apparition des indications dès le début du séchage du révélateur, en effet, cette méthode ne permet pas de donner une valeur quantitative aux résultats fournis : l'interprétation du contrôle est formulée en terme d'induction linéaire (longueur > 3 fois la largeur) ou non linéaire. [26]



**Figure .II.13 :** Principe de contrôle par ressuage. [26]

### II.5.3 contrôle par magnétoscopie

Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchant (obstrués ou non) et sous-jacents sous la surface.

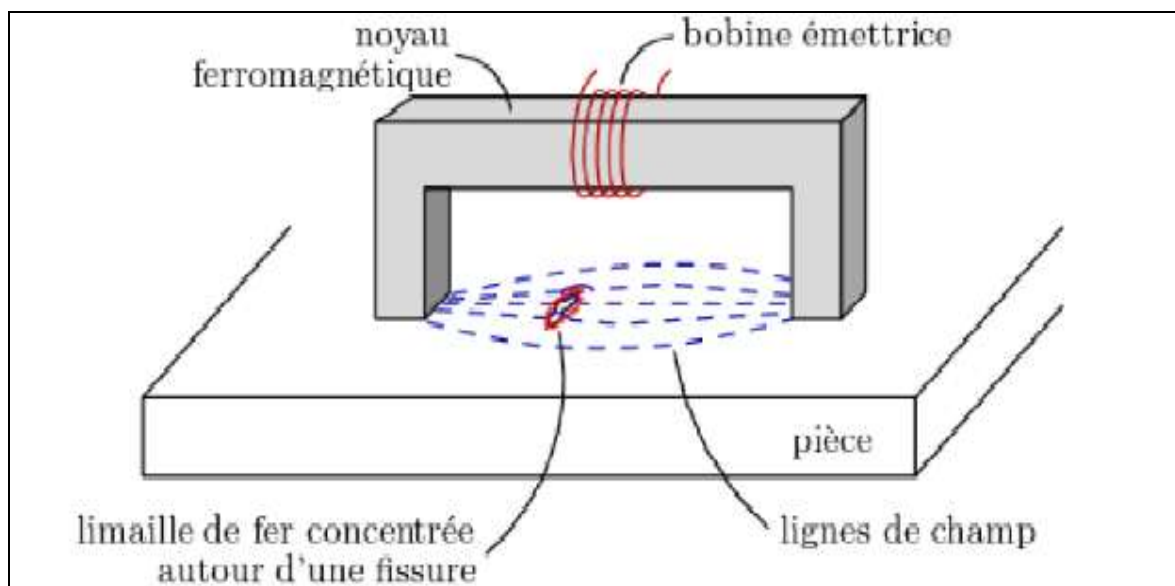
Cet examen consiste à soumettre une pièce à l'action d'un champ magnétique jusqu'à sa saturation ; ce champ se trouve dévié s'il trouve un obstacle sur son parcours; si cet obstacle est proche de la surface , les lignes de force du champs peuvent sortir à l'extérieur de la pièce en créant à l'endroit du défaut une sorte de mini aimant sur les pôles duquel peut s'accumuler une poudre magnétique très fine (utilisée à sec ou en suspension dans un liquide).

Pour être révéles, les défauts doivent être perpendiculaires aux lignes magnétiques (ils sont indécélabes lorsqu'ils sont parallèles aux lignes de champs).

Les pièces peuvent être aimantées par passage de champ ou par passage de courant. Le contrôle des charpentes métallique fait essentiellement à la première méthode.

On utilise généralement un électro-aimant mobile en forme de U, dont les pièces polaires sont articulées, posé au contact de la pièce, en fer à cheval au des dessus de la soudure à examiner. Dans la mesure où l'on ne connaît pas a priori l'orientation des défauts, la zone soumise à examen doit faire l'objet d'une exploration faisant prendre successivement aux pôles des positions à 90° l'une de l'autre.

Comme pour le ressuage, l'interprétation du contrôle est formulée en terme d'indication linaire ou non linaire. [26]



*Figure II.14 : Principe de la magnétoscopie. [26]*

### II.5.4 contrôle par radiographie

La radiographie est une méthode qui utilise les particularités des rayons X ou  $\gamma$  : ce sont des ondes électromagnétique de très faible longueur d'onde, aptes traverser des corps opaques à la lumière visible.

L'intensité de la radiation pénétrante durant sa traversée est modifiée entre un parcours dans le matériau sain et dans les défauts qu'il renferme se phénomène et appelé « absorption différentielle ».

Un récepteur radiographique placé sous l'objet enregistre le faisceau émergent se qui se traduit par une différence de densité ou contraste sur le film développé. Ce contraste entre l'image d'un domaine contenant un défaut et celle d'un domaine exempt de défaut permet à l'observateur de distinguer l'imperfection.

Les deux procédés ne diffèrent que par la source de radiation :

- Rayons X : on utilise un tube en verre dans le quel règne un vide poussé. Il est alimenté en courant électrique et émet des électrons par échauffement d'un filament incandescent de tungstène (cathode). Le faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de volts) vers une cible (anode ou anti cathode). L'impact des électrons sur la cible génère chaleur (99% ) et rayons X (1%).
- Les rayons  $\gamma$  : sont émis lors de la désintégration spontanée d'un noyau atomique (par exemple Iridium 172, cobalt 60).

Une interprétation des radiographies passe par un ensemble de paramètres interdépendants qui conditionnent la qualité des images du film, protection de ces derniers contre les rayons secondaires (écrans renforçateurs), flou géométrique (compromis entre le diamètre de la source et la distance source film : nature).

La qualité d'image est appréciée par des « indicateurs de qualité d'image » (IQI).

L'exposition d'une partie quelconque du corps humain aux rayons X ou  $\gamma$  peut être préjudiciable à la santé, aussi toute utilisation de matériels à rayons X ou de sources radioactives est soumise à des dispositions légales ou réglementaires qu'il y a lieu de suivre scrupuleusement. [26]



Figure .II.15: principe de contrôle par radiographie.

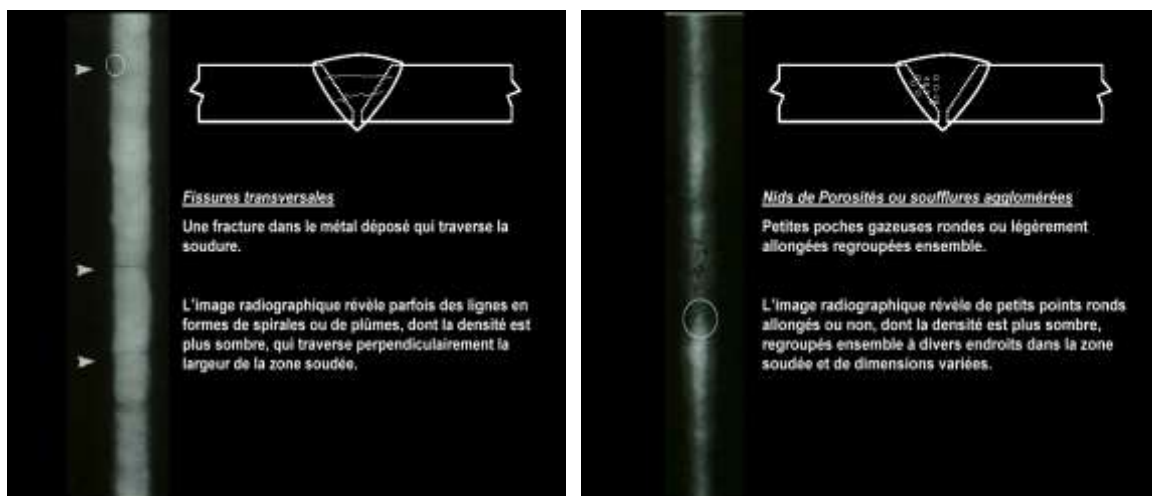


Figure .II.16 : exemple de cliché de radiologie gamma ou X. [26]

### II.5.5 contrôle par ultrasons

Les ondes ultrasonore sont émises au moyen de traducteurs (ou palpeurs) contenant un élément piézoélectrique (quartz par exemple) qui a pour particularité de transformer un courant électrique alternatif en oscillations mécaniques.

En présence de modifications des caractéristique du milieu dans le quel elles se propagent, les ondes voient leur propagation perturbée selon les lois de la réflexion – réfraction –absorption : l'onde incidente, lorsqu'elle arrive à une interface entre deux milieux, transmet une partie de son énergie au second milieu et en réfléchit une partie dans le premier.

Dans le cas particulier de l'air, les lois de la réflexion montrent qu'aucune énergie n'est transmise au second milieu (l'air) ; cette particularité importante est exploitée lorsque l'onde rencontre une fissure ou une inclusion gazeuse.

C'est également pourquoi on utilise un produit couplant (eau, colle de tapissier) sous le palpeur, à son interface avec la pièce à contrôler. [26]

La méthode la plus usuellement employée est la méthode « par réflexion » qui n'utilise qu'un seul transducteur jouant simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur.

En raison de la forme des assemblages soudés et de l'orientation la plus fréquente des défauts plans (fissure, manques de liaison) qui sont susceptibles d'être rencontrés, le contrôle par ultrasons des soudures est généralement effectué au moyen d'un faisceau d'ondes transversales obliques (palpeurs d'angle).

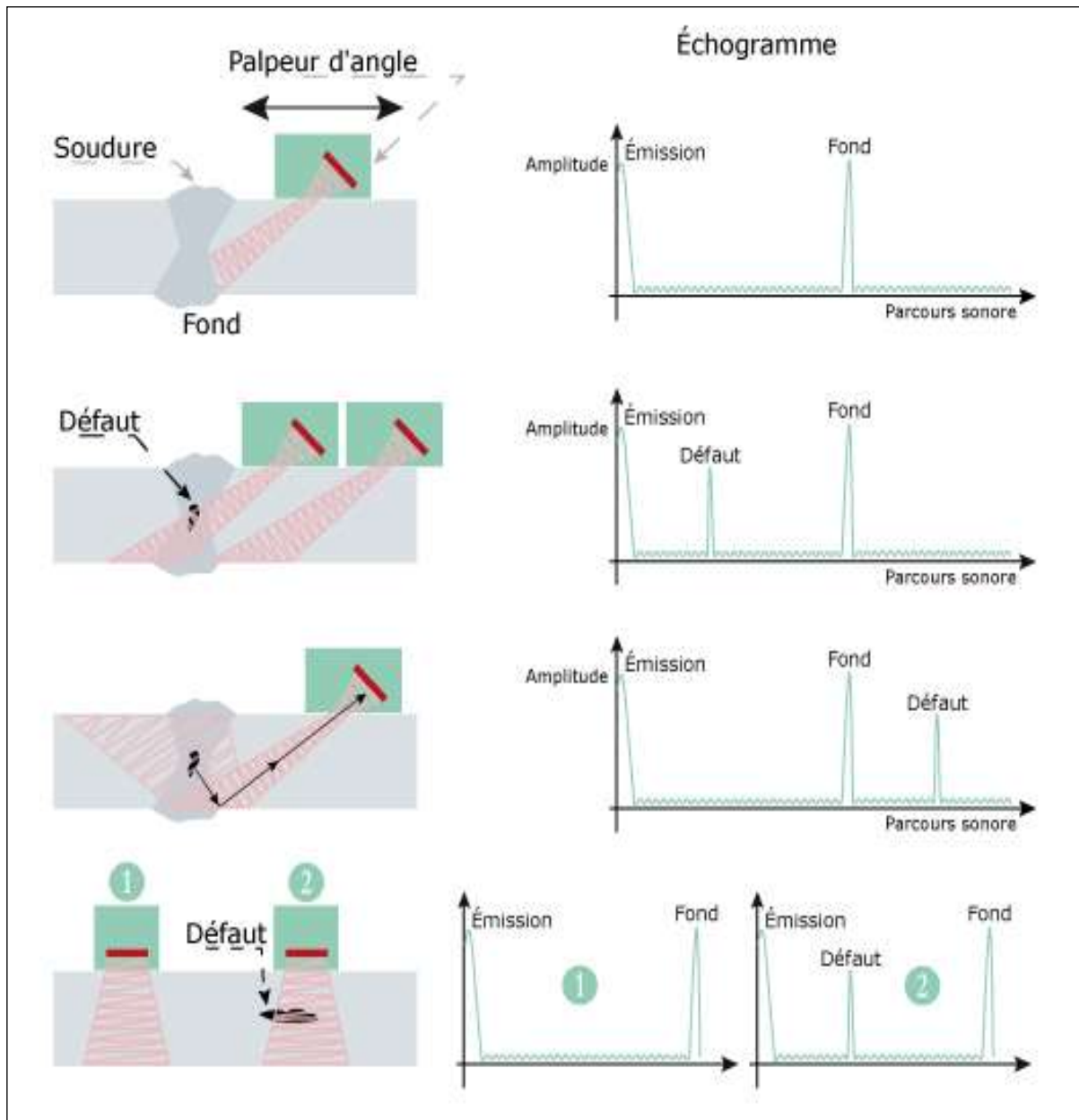


Figure II.17: Schéma montre le principe de contrôle par ultrason. [26]

# CHAPITRE III

## *METHODE EXPERIMENTALE*

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, le but est de présenter les différentes techniques expérimentales utilisées pour l'étude des caractéristiques de la structure de l'acier X60 à  $0,176C\%$  de carbone.

Cette étude est basée sur la caractérisation structurale de métal de base MB, la zone affectée thermiquement ZAT, la zone de fusion ZF.

Diverses techniques ont été utilisées pour caractériser nos échantillons : les observations micrographiques, la diffraction des rayons X et des mesures de la microdureté (Hv).

Le travail a été abordé en respectant les étapes suivantes :

Prélèvement de l'échantillon ;

- Réalisation du traitement thermique ;
- Examen Métallographique ;
- Une observation micrographique à l'aide d'un microscope optique ;
- Caractérisation par diffraction des rayons X .
- Mesure de la microdureté.

### III.2 Choix de procéder

Au niveau de Filiale COSIDER, il existe deux types de soudage, le soudage manuel et le soudage automatique ou semi-automatique.

#### III.2.a) Soudage Manuel

Durant mon stage pratique à COSIDER CANALISATION on a réalisé la continuité de deux tubes d'acier X60 par assemblage en utilisant le soudage à l'arc électrique, selon le procédé de « soudage avec électrodes enrobées »

(Figure .III.1).



*Figure III.1 : présente un joint de soudure obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique*



Le soudage à l'électrode enrobée (Shielded metal arc welding –SMAW-) est l'un des plus simples procédés de soudage à l'arc. L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte électrode, un câble de liaison et un câble de masse.

L'électrode enrobée est serrée sur la pince porte électrode reliée au câble de sortie de poste de soudage. Le connecteur de pièce est relié au générateur et il est placé sur la pièce à souder (Figure .III.2).



**Figure III .2** : l'appareillage pour le soudage des pipelines ou COSIDER.

A noter toutefois que l'assemblage est effectué en plusieurs passes (soudage multiplace). voir (Figure .III.3).

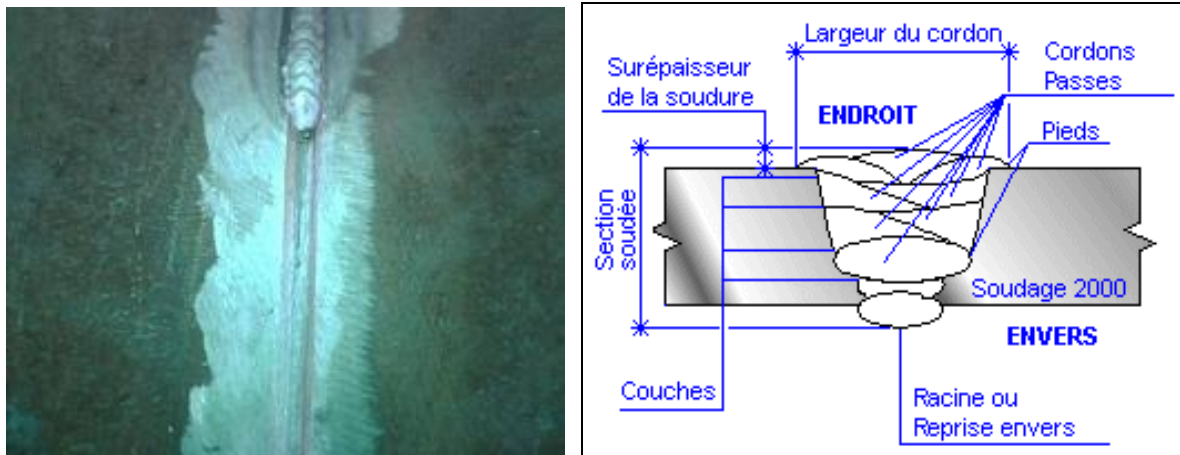


Figure III.3: L'enchaînement des passes de soudure .

### III.2.b) Soudage automatique

On note que le soudage automatique est aussi utilisé par la société COSIDER et qui est effectué par l'utilisation d'un appareil de soudage automatique afin d'accélérer l'assemblage des tubes de pipeline.

(Figure .III.4) montre un exemple de joint de soudure obtenu par ce même procédé.



Figure III.4 : pièce automatisée soudée à l'arc électrique

## III.3 Identification du métal de base et métal d'apport

### III.3.1 Métal de base

Le métal de base est un acier au carbone du type 5 L grade X60 selon la norme API : Composition chimique de notre acier est résumé dans le (Tableau III.1)

**Tableau III. 1 :** Composition chimique d'un acier microallié du type X60 suivant les normes API

Type D'acier	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo
X60	0,176	0,320	1,500	0,01	0,043	0,012	0,02	0,042	-	-	-

### III.3.2 Métal d'apport (les électrodes)

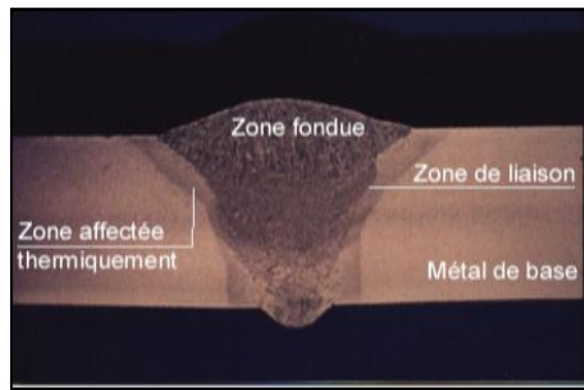
Le (Tableau III.2) rassemble la composition chimique des électrodes utilisées.

**Tableau III.2 :** la composition chimique des électrodes utilise.

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.4 Présentation des soudures étudiées

Les soudures étudiées le long de toutes les expérimentations engagées dans ce présent manuscrit ont été réellement réalisées selon le repère de la (Figure .III.5).



*Figure.III.5 : repère de référence.*

### III.5 Prélèvement de l'échantillon

Pour cette étude la coupe est réalisée, généralement en deux étapes dans le sens traversé la soudure.

- ❖ Première étape : On prélève un échantillon de (30\*20 cm) de longueur comme il est illustré ci-dessous (Figure.III.6)



*Figure .III.6: Les deux morceaux prélevés a partir pipelines soudé manuellement et automatiquement .*

❖ Deuxième étapes : On découpe deus échantillon de (2.5cm) de longueur à l'aide d'une scie électrique à partir de morceau soudé manuellement et deux soudé automatiquement à partir de cel , en versant de l'eau pour éviter l'échauffement et la modification structurale de l'échantillon (Figure.III.7)



*Figure.III.7 : Les échantillons de l'étude.*

### III.6 Traitements thermiques

Il est nécessaire, ou même obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage dont le but est d'améliore ou d'obtenir des propriétés jugées importante relativement aux conditions de service ou par fois d'illuminer ou de réduire les contrainte résiduel, différents types de traitements thermiques isothermes ont été effectués dans le domaine de température à  $950^{\circ}\text{C}$  , pondant 45mn pus refroidissement dans le fourre .

### III.7 Examen Métallographique

L'examen métallographique permet de révéler la microstructure de l'échantillon examiné et les phases présentes.

La réalisation d'une micrographie nécessite un certain nombre d'opérations :

- polissage .
- Attaque par le Nital de 4°/° .
- L'observation microscopique .

#### III.7.1 polissage

Les échantillons sont polis mécaniquement aux papiers abrasifs de désignation : 120,180,320,600,800,1000,1200 , puis au papier feutre couvert d'une pate d' alumine (0,3 Um et 0,005Um) .



*Figure.III.8 : Polisseuse à deux vitesses.*

#### III.7.2 Attaque chimique

Pour révéler la microstructure, l'échantillon est attaqué par un réactif d'attaque très utilisé pour les aciers qui est le Nital de 4°/° . C'est une solution composée de 96°/° d'éthanol  $C_2H_5OH$  et 4°/° d'acide nitrique  $HNO_3$ . La méthode la plus courante consiste à immerger l'échantillon dans cette solution chimique.

La durée d'attaque varie entre de 15 et 20 secondes à température ambiante, et ceci selon l'état de l'échantillon.

### III.7.3 L'observation microscopique

La microscopie optique est la technique de base de notre étude, cette technique nous permet de suivre l'évolution microstructural de l'échantillon. Le microscope utilisé peut agrandir l'image en 4 objectifs x4, x16, x40, x100 ; et équipé d'un appareil photo numérique qui peut aussi de zoomer l'image de x4 jusqu'à x16. Cette méthode nous permet d'observer les différentes phases présentes et commenter leurs morphologies respectives.



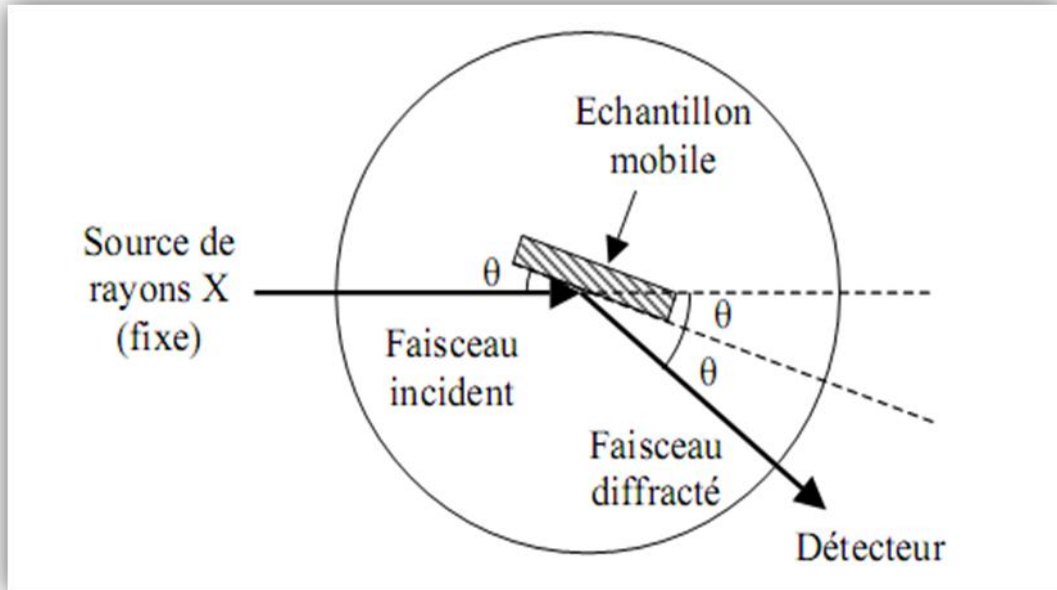
*Figure.III.9 : Microscope optique (Hund).*

## III.8 Caractérisations structurales

### III.8.1.1 Diffraction des rayons X

Nous avons utilisé le diffractomètre automatisé (D8 ADVANCE08), lié à micro-ordinateur celui-ci est caractérisé par la source de la radiation  $\text{CuK}\alpha$ , ayant une longueur d'onde de  $1,541838 \text{ \AA}$ , avec une tension de 40 KV, un courant de 40 mA et une anticathode de cuivre en filtre de Nickel. [26]

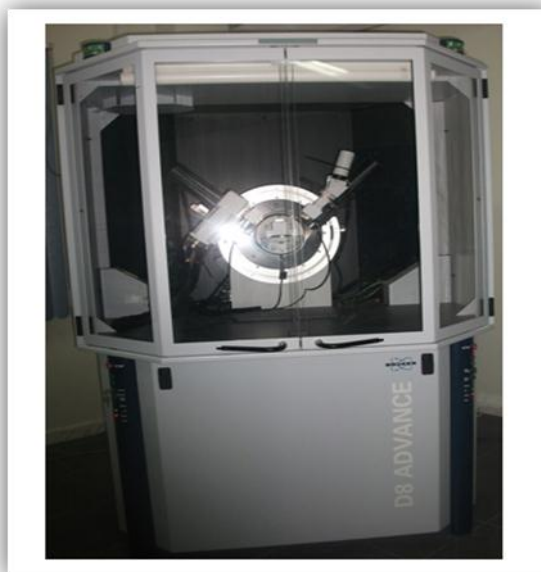
Lors d'une analyse par cette technique, un faisceau de rayons X, émis par une source, est envoyé sur l'échantillon à analyser sous un angle  $\theta$  (figure (III.10)) et un détecteur reçoit le faisceau de rayons X diffracté par cet échantillon et enregistre l'intensité en fonction de l'angle de diffraction  $2\theta$  [26] , est présenté dans Le schéma suivant :



**Figure III.10:** Schéma montrant Le principe de travail du diffractomètre.

L'analyse des spectres de rayons X permet d'obtenir des informations sur :

- La ou les phases cristallines (position des pics);
- La taille des cristallites (largeur des pics à mi-hauteur);
- Les défauts d'empilement (forme de pics)
- L'orientation des cristallites (absence ou présence de réflexions).



**Figure III.11:** Diffractomètre BRUKER D8 ADVANCE AXS (XRD).

Cette technique est donc particulièrement intéressante pour l'investigation structurale des matériaux polycristallins.

Un matériau polycristalin est formé d'une multitude de grains, chacun d'entre eux étant en fait un monocristal constitué d'un empilement régulier d'atomes. Cet empilement peut être décrit par des ensembles de plans cristallins définis par une distance  $d_{hkl}$  qui dépend des indices de MILLER. Cette distance  $d_{hkl}$  est mesurable par la diffraction des rayons X grâce à la loi de BRAGG.

$$n\lambda = 2 d_{hkl} \sin\theta \quad (\text{III} - 1)$$

Où :

$n$  : 1,2,...ordre de la diffracté,

$\lambda$  : la longueur d'onde du faisceau diffracté.

$d_{hkl}$  : est la distance entre les plans cristallins parallèles.

$\theta$  : l'angle d'incidence du faisceau des Rayons X.

Dans le cas d'un matériau polycristalin constitué d'un très grand nombre de grains par rapport à la dimension du faisceau incident, il y aura toujours une famille de plans  $\{hkl\}$  donnant lieu à une diffraction : on obtient donc simultanément les faisceaux susceptibles de diffracter sous forme de cônes de demi-angle au sommet  $2\theta$  (un cône par famille de plans  $\{hkl\}$ ).[26]

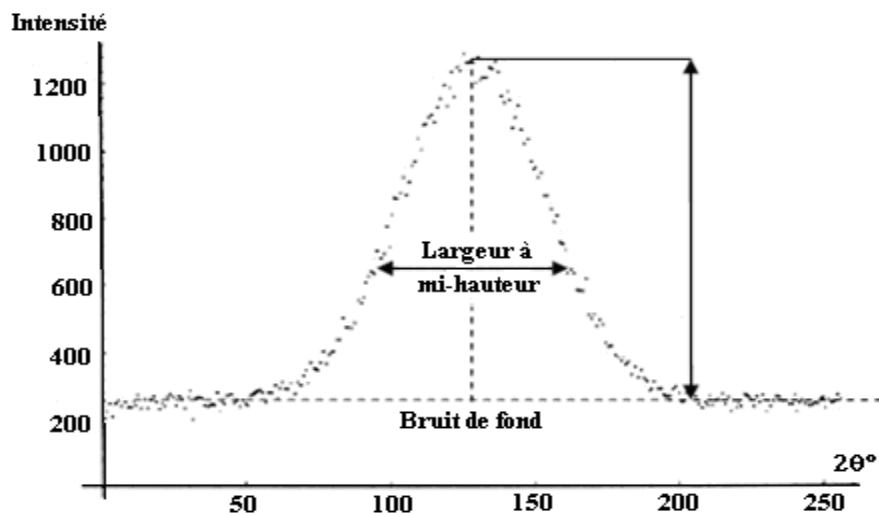


Figure III.12: Illustration d'un pic de diffraction.



### III.9 Analyse par le microduromètre (Microdureté Vickers)

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose la pénétration d'un autre corps plus dur.

Du point de vue scientifique on peut séparer les essais de dureté des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelque fois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe définir des propriétés l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants.

Les mesures de microdureté, pour donner des résultats satisfaisants doivent être faites en précisant tous les paramètres, charge appliquée, vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage).

Les structures micrographiques nécessitent des précautions multiples, comme l'élimination des vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme de diamant, caractéristiques optiques, précision mécanique).

Dans ces conditions, la microdureté permet d'obtenir des résultats extrêmement intéressants.

#### III.9.1 Machine d'essai de microdureté

C'est un micromètre pour dureté Vickers de marque 'LEITZ DURIMET' (figure III.13) avec une charge de 0,05N à 20N. On utilise pour cette essai un diamant en forme de pyramide, à base carré angle au sommet entre faces opposées 136° (figure III.14);

profondeur de pénétration égale à de la diagonale de l'empreinte

Dureté Vickers : 
$$HV = \frac{1854,4 P}{d^2} \quad [\text{Kg/mm}^2]$$

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{A}$$

$$A = \frac{d^2}{2 \cos 22^\circ} = \frac{d^2}{2 \sin \frac{136^\circ}{2}} = \frac{d^2}{1,854} \quad (\text{mm}^2)$$

Donc :

$$HV = \frac{0,102 \cdot F \cdot 1,854}{d^2}$$

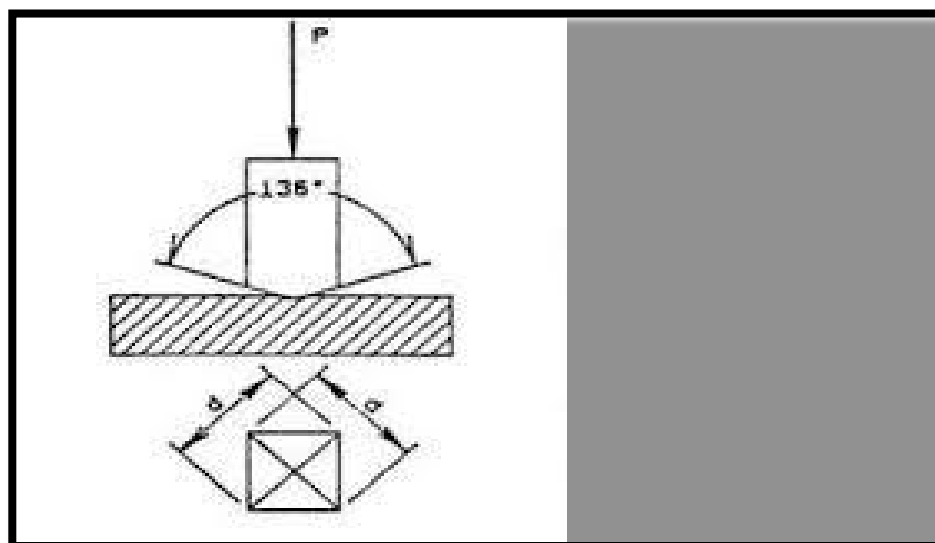
P ou F : charge appliquée

d : moyenne des deux diagonales de l'empreinte ( $\mu\text{m}$ )

Un tube de microscope avec dispositif de pénétration est associé à notre machine, ce dispositif de est fixé à demeure sur le tube du microscope, te monté sur un dispositif de rotation avec les objectifs 10x et 50x.



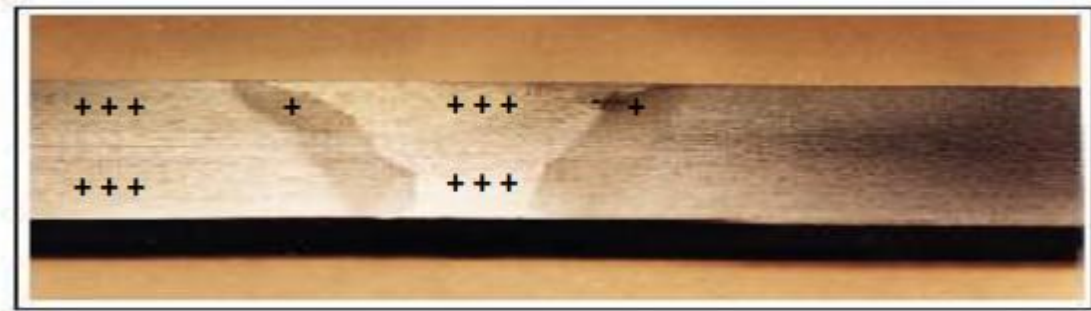
*Figure III.13 : Microduromètre Vickers.*



*Figure III.14 : Schémas représentatifs d'un pénétrateur pyramidal.*

### III.9.2 Mode opératoire

Pour conclure à des résultats satisfaisants, on prend deux positions sur chaque éprouvette, la première sur la passe de finition et la deuxième sur la racine, avec un pas de 1 mm. Ce qui nous permis de voir l'influence de la température de soudage sur la dureté du cordon.



*Figure III.15 : Localisation des Positions.*

# CHAPITRE IV

## *RESULTATS ET INTERPRETATIONS*

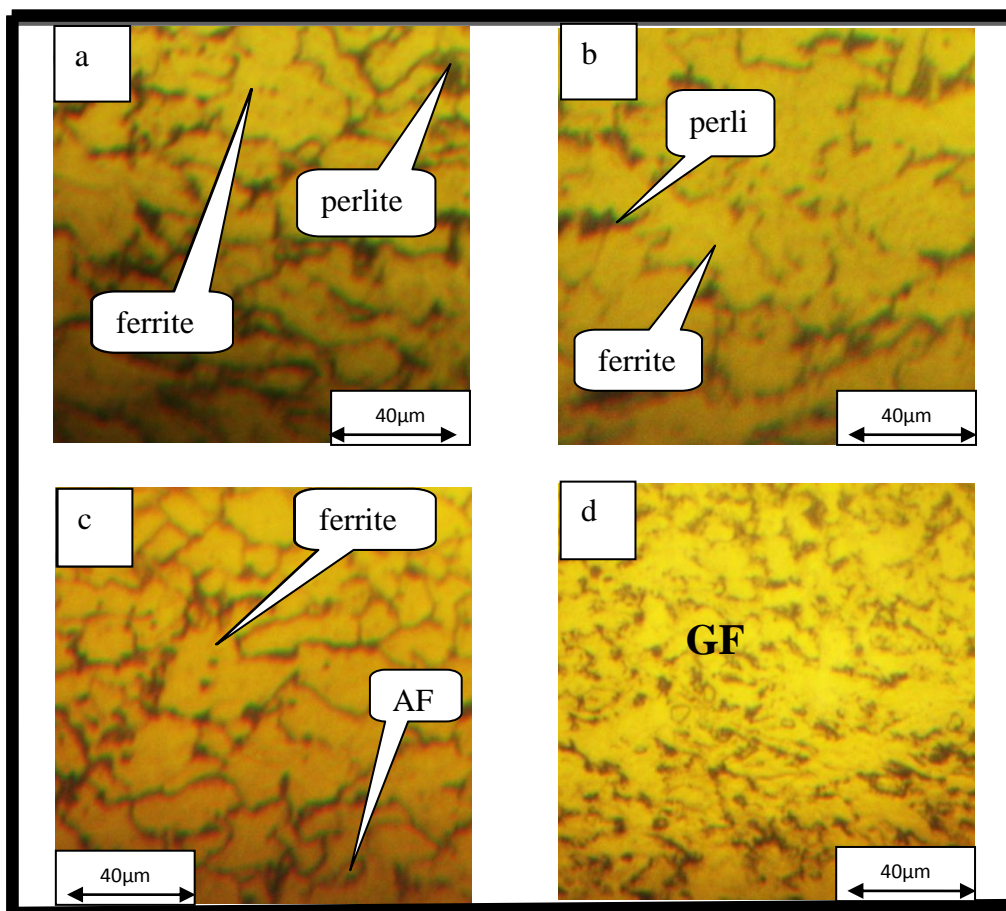
## IV.1 Caractérisation Structurale

### IV .1. 1 Caractérisation par le microscope optique

#### IV.1.1.1 La micrographie du métal de base (MB)

La Figure IV.1 présente les microstructures de métal de base (MB) des échantillons suivant : Non traité (soudé manuellement(a)), non traité (soudé automatiquement(b)) et traité (soudé manuellement(c)), traité (soudé automatiquement(d)) La microstructure de métal de base (MB) présente une structure ferrito-perlitique .Ferrite (la zone claire) et la perlite (la zone en noire).

D'après ce photo le métal de base illustre des microstructures similaires avant traitement thermique (entre les deux échantillons soudé manuellement et automatiquement) mais après Traitement thermique a trouvé le changement dans l'échantillon soudé manuellement ou les grains deviennent très fins (GF), et l'apparition d'une nouvelle phase qui la ferrite aciculaire (FA).

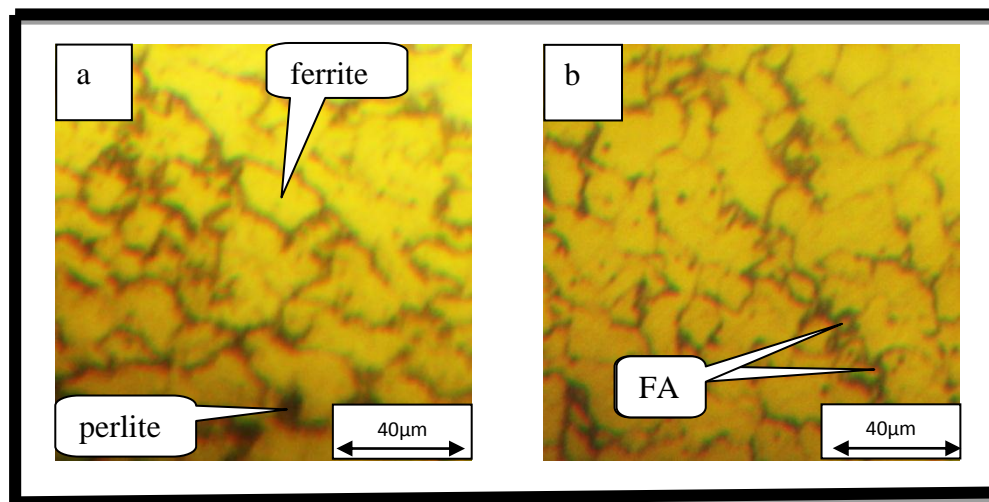


**Figure IV.1** : Microstructures de métal de base(MB) : (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement).

#### IV.1.1.2 microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT)

**Passe 1 :** La figure IV.2 présentes deux microstructures de la zone affecté thermiquement (passe 1). de l'échantillon soudé manuellement et de la même échantillons après le traitement thermique Cette figure présent aussi une microstructure ferrito-perlitique ou la fraction de ferrite est toujours supérieur au fraction de perlite puisque notre acier est un acier à faible pourcentage de carbone (0,176 %).

Après traitement thermique on remarque la présence de nouvelle phase qui est la ferrite aciculaire (sous forme des aiguilles) ou nous savons bien que cette microstructure présente des bonnes propriétés mécaniques



**Figure IV.2 :** microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT , passe1 ) : (a) Ech non traité (soudé manuellement) et (b) Ech traité (soudé manuellement)

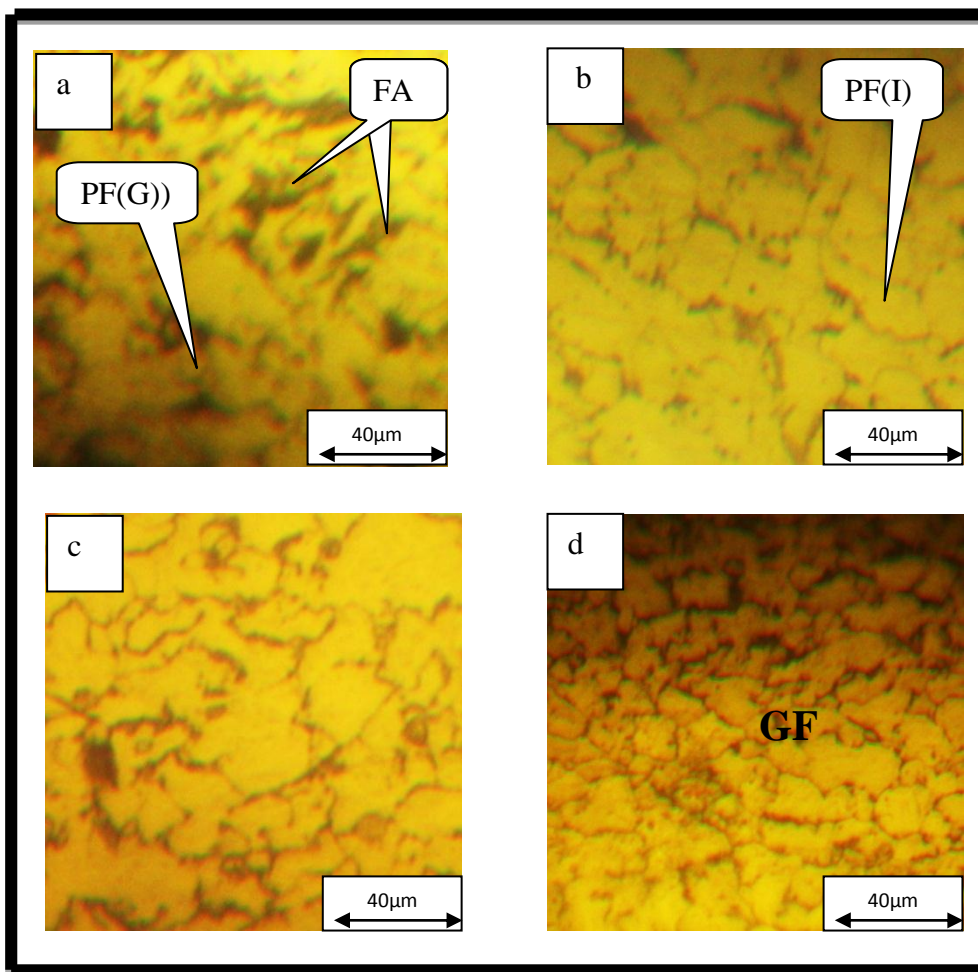
La zone affectée thermiquement (ZAT) est un volume de métal de base qui a été traité par différente pic de température puis refroidit rapidement au cour de fusion. La ZAT peut contenir un nombre des sub-reyion très distingués

Chaque sub-zone possède sa microstructure individuelles, alors elle posse de sa propriété mécanique individuelles aussi, la structure de la ZAT est déterminé par les condition de soudage, historique thermique est mécanique (très important) la composition chimique du matériaux. [27]

**Passé 2 :** La figure IV3 illustre les microstructures de la zone affectée thermiquement (passé 2) avant et après des traitements thermiques

La première microstructure est composée par ferrite proeutectoïde (PF(G)) ferrite aciculaire (FA), mais la deuxième microstructure de l'échantillon soudé automatiquement présente une microstructure composée par la ferrite polygonale (PF(I)).

Après le traitement de l'échantillon soudé manuellement on n'a pas remarqué un grand changement mais après les traitements thermiques de l'échantillon soudé automatiquement il y a un affinement des grains (GF).

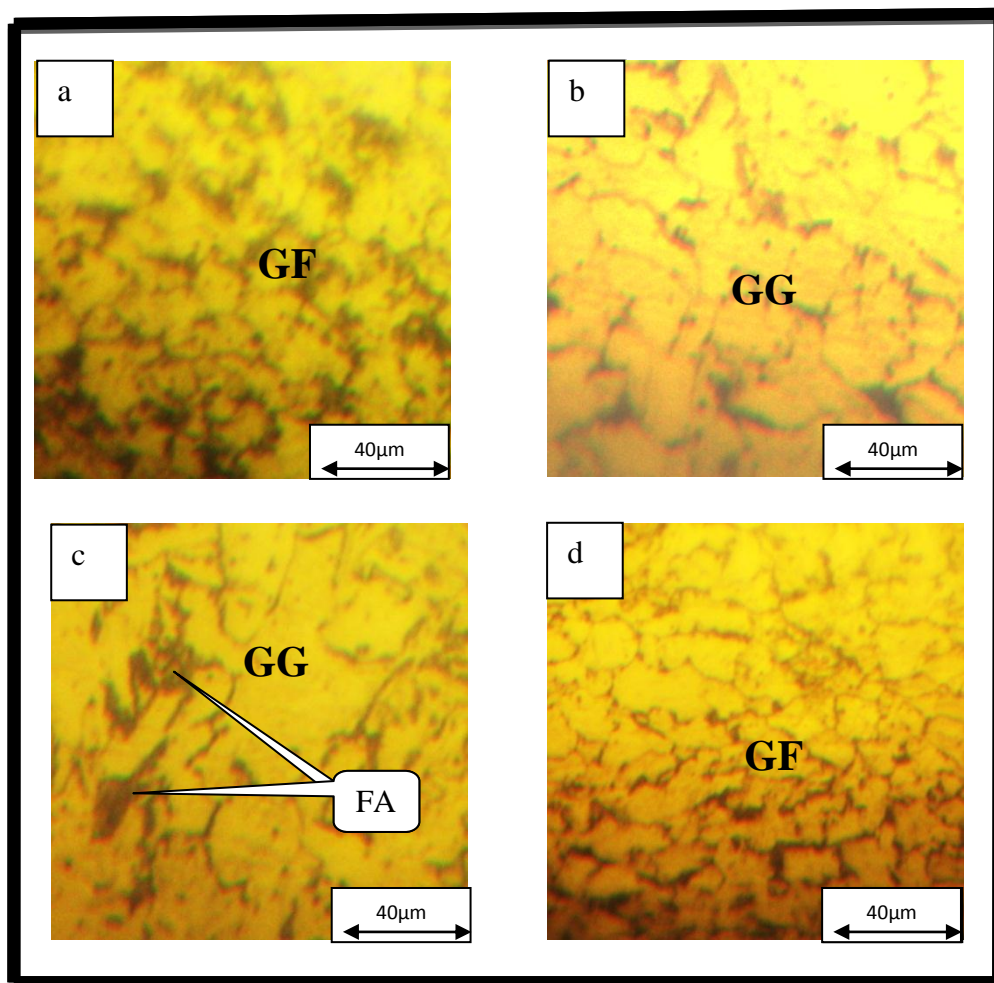


**Figure IV.3 :** microstructures de la zone affectée thermiquement (ZAT , passe 2 ) : (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)

**Passé 3 :** La figure IV4 illustre les microstructures de la zone affectée thermiquement (passé 3) avant et après des traitements thermiques les microstructures contiennent toujours deux phases ferrite (claire) et perlite (noir) mais la différence entre ces photos est localisée sur les tailles des

grains. Entre les photos (IV.4. a) et la deuxième photo (IV.4.b) on remarque La deuxième bien que la première présente des grains ferritique plus fine (GF).

Après traitement thermique on trouve une augmentation de la taille des grains dans l'échantillon soudé manuellement avec l'apparition de nouvelle phase ferritique qui sont (ferrite proeutectoïde (PF(G))) et une faible fraction de ferrite aciculaire mais après ce traitement thermique pour les deuxièmes échantillons soudé automatiquement on 'remarqué seulement qu'il ya une affinement des grains (c. a. d. diminution de la taille des grains).



**Figure IV.4** : microstructures de la zone affecté thermiquement (ZAT , passe 3 ) : (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)

D'après B. Eghbali et al [28] la formation des grains fins ferritique dans la transformation dynamique peut attribuer au ce facteur : la grande pourcentage de nucléation de ferrite et la distribution aléatoire des orientations des grain ferritique. Mais les gros grains



ferritique dans cette microstructure ont été obtenus à cause de ce qu'il y a quelques grains de ferrite nucléés tôt dans ce processus.

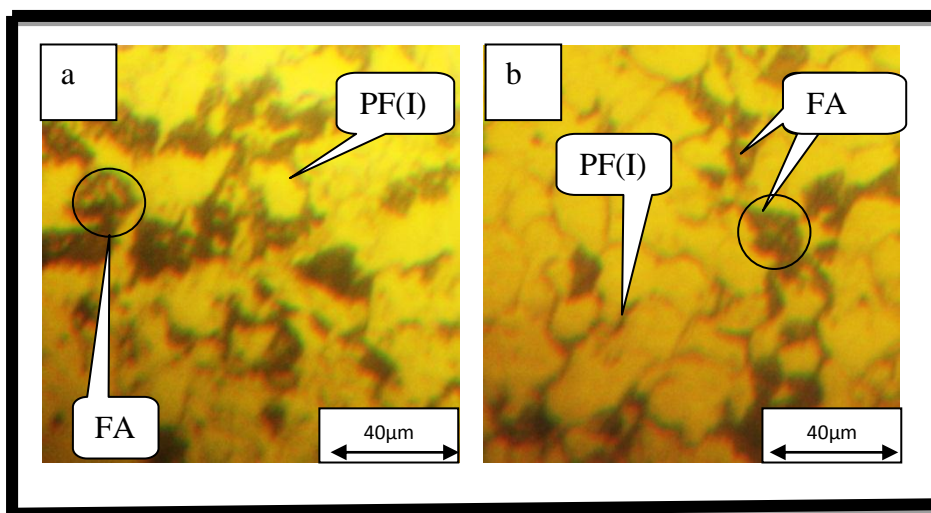
D'après S. Wei et al [29] le grossissement des grains peut contribuer par la mobilité de joint de grains et la fusion. Le mouvement de joint de grain et la zone dépend de la diffusion et de la migration atomique des côtés du joint de grain.

#### IV.1.1.2 microstructures de la zone fondue (ZF)

Il est noté que le centre du joint soudé de la zone soudée. Il a passé à l'état liquide après l'exécution du soudage. Dans le cas de soudage multi-passes, nous avons remarqué plusieurs microstructures obtenues par les passes successives. L'apparition de plusieurs microstructures dans la première passe peut changer par les autres passes.

**Passé 1 :** La figure IV.5 présente les microstructures de la zone fondue de l'échantillon soudé manuellement avant et après traitement thermique

La microstructure de la première passe est toujours constituée par la ferrite polygonale (PF(I)) et la ferrite aciculaire avec l'augmentation de la fraction de la phase polygonale dans cette zone à cause de la baguette utilisée pour le soudage qui a un pourcentage de carbone élevé (0,176 %) on remarque qu'il y a un petit changement après le traitement thermique mais la structure devient plus régulière

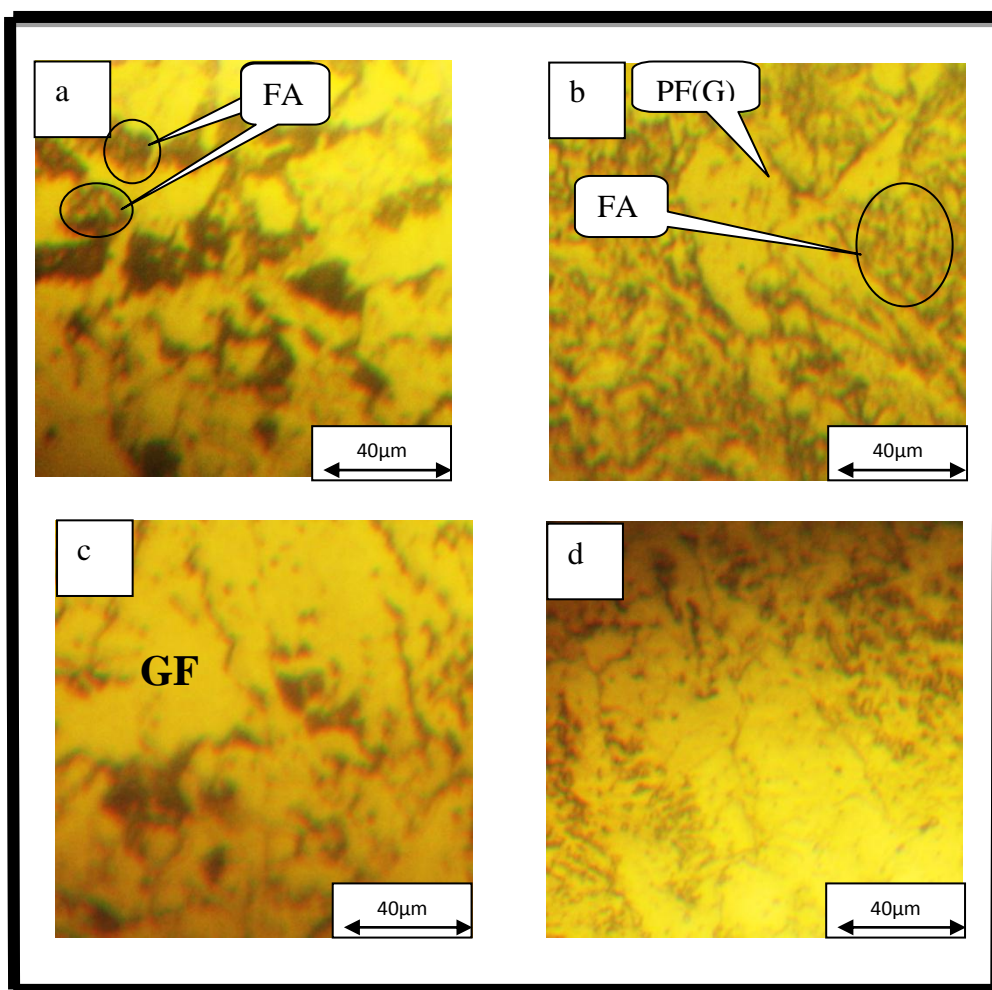


**Figure IV.5 :** microstructures de la zone fondue (ZF, passe 1) : (a) Ech non traité (soudé manuellement) et (b) Ech traité (soudé manuellement)

**Passe 2 :** La figure IV.6. illustre des microstructures de la zone fondue (passe 2) la structure de deuxième passe reste toujours ferrito-perlitique .

Pour l'échantillon soudé manuellement et non traité présente la microstructure de la ferrite polygonale avec un faible pourcentage de la ferrite aciculaire mais après traitement thermique les grains ferritiques deviennent sous forme de ferrite proeutectoïde (PF(G)) avec un faible pourcentage de la ferrite aciculaire (FA).

Pour l'échantillon soudé automatiquement la microstructure présente une très grande fraction de la ferrite aciculaire avec quelques grains de ferrite proeutectoïde (PF(G)), mais après traitement thermique.

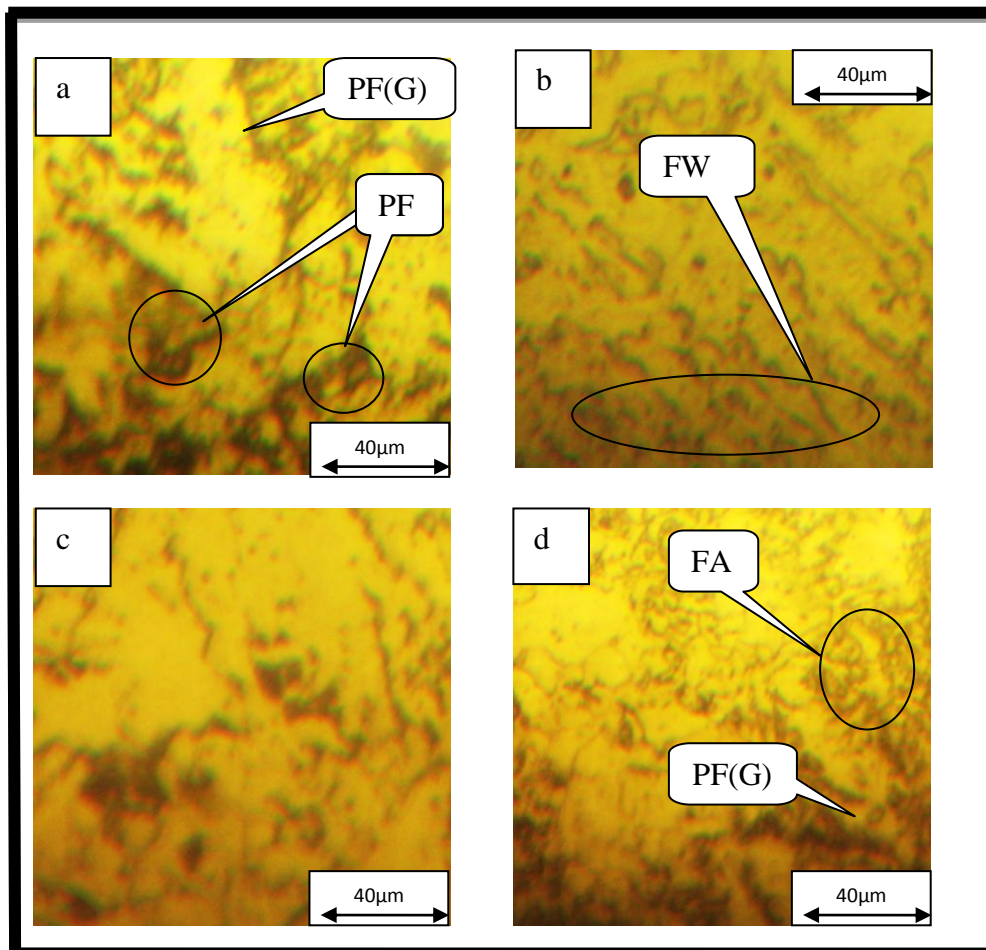


**Figure IV.6 :** microstructures de la zone fondue

(ZF , passe2) ) (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement)

**Passé 3 :** La figure IV .7 présente les microstructures de la zone fondue de la dernière passe (passe 03) des l'échantillon non traités et traité après un soudage manuel et automatique.

Pour l'échantillon non traité qui a soudé manuellement, elle présente une structure Constituée par la ferrite aciculaire, ferrite polygonale (PF(I)) ferrite proeutectoide (PF(G)). Mais la deuxième échantillon soudé automatiquement illustres une microstructure très différent es que la première ou elle composé par une la ferrite aciculaire (AF) la ferrite de widmanstatten (FW). Après traitements thermique on a remarqué qu'il ya un grossissement très remarquable des grains, avec la diminution de la fraction des ferrites aciculaire pour l'échantillon soudé manuellement, mais la microstructure de l'échantillon soudé automatiquement est constitué par la ferrite aciculaire et la proeutctoide ferrite (PF(G)).



**Figure IV.7 :** microstructures de la zone fondue (ZF , passe3 ) (a) Ech non traité (soudé manuellement), (b) Ech non traité (soudé automatiquement), (c) Ech traité (soudé manuellement) et (d) Ech traité (soudé automatiquement).

La ferrite aciculaire (FA) c'est la phase la plus connue et observée après la transformation de l'austénite au cours de refroidissement des microstructures de la soudure des aciers micro-alliés. Elle est formée dans l'intervalle quand la transformation reconstructive devient relative moins et donne l'occasion à la réaction displacive comme la ferrite de Widmanstätten bainite. H. K. D. H. Bhadeshia et al [30] a démontré que la ferrite aciculaire se forme dans l'intervalle de température (approximativement 400-600 C°).

Dans les aciers micro-alliés, la ferrite allotriomorphe est la première phase qui se forme à partir de l'austénite ( $\gamma$ ) au cours de refroidissement du métal soudé. Elle nucléate tout le long du joint de grains de l'austénite par diffusion. Avec la diminution de la température, le pourcentage de grossissement de la ferrite allotriomorphe diminue, et finalement donne l'accès au développement de la ferrite Widmanstätten (FW) [31].

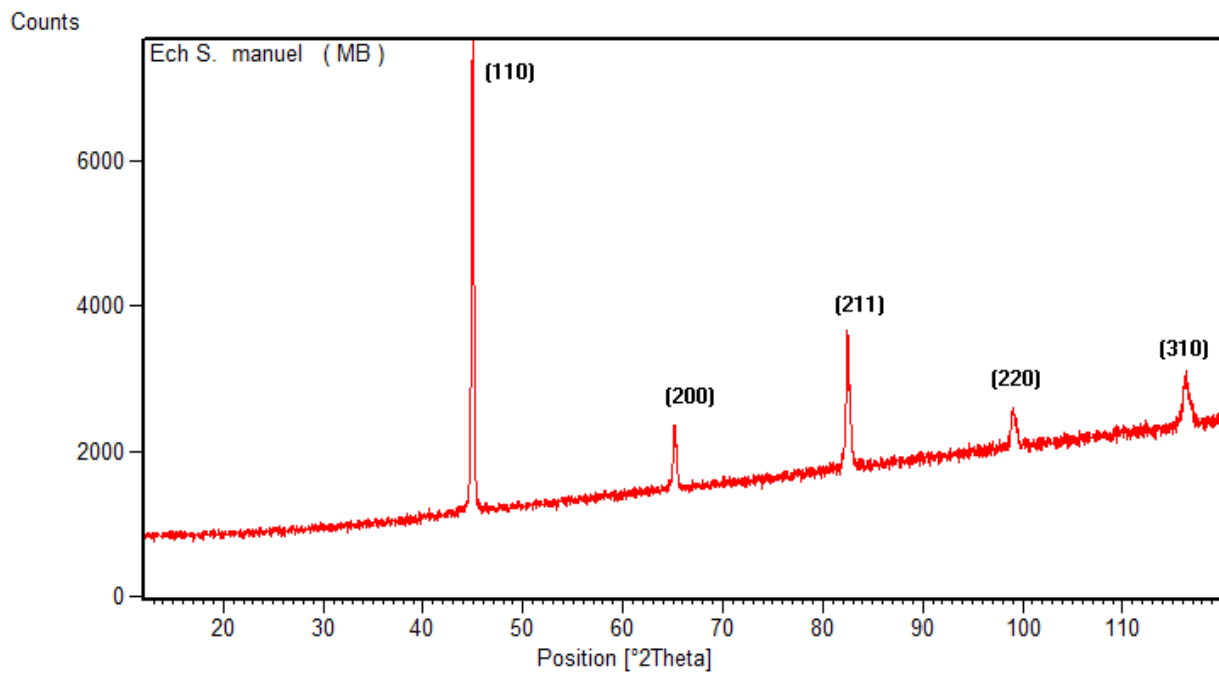
## IV.2 Caractérisation des phases par la diffraction des rayons-x

Les figures IV.8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, illustrent les diffractogrammes de deux zones étudiées (métal de base et la zone soudée) de quatre échantillons étudiés. Elles présentent les cinq pics diffractés qui correspondent à la phase ferrite ( $\alpha$ ), les cinq pics sont correspondants aux plans suivants : (110), (200), (211), (220) et (310).

Les tableaux IV.1.2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, présentent les caractéristiques de ces cinq pics qui sont, le plan (hkl), la position ( $2\theta^\circ$ ), la hauteur des pics à mi-largeur (FWHM), l'intensité intégrale et en fin l'intensité relative de chaque pic.

## IV.2.1 Echantillon soudé manuellement non traité

## ➤ Métal de base



*Figure IV.8: le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé manuel non traité thermiquement*

**Tableau IV.1 :** les caractéristiques des pics (métal de base) soudé manuel de l'échantillon non traité thermiquement.

No.	Pos. [°2Th.]	Hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,9529	110	0,1836	1218,36	2,01489	4976,95
2	65,1819	200	0,2856	245,54	1,43009	644,81
3	82,4581	211	0,1224	271,71	1,16876	1664,88
4	99,0141	220	0,3264	197,94	1,0129	454,83
5	116,2625	310	0,4896	360,78	0,90702	552,66

➤ Zone soudé (la zone affectés thermiquement (ZAT) et zone fondue (ZF))

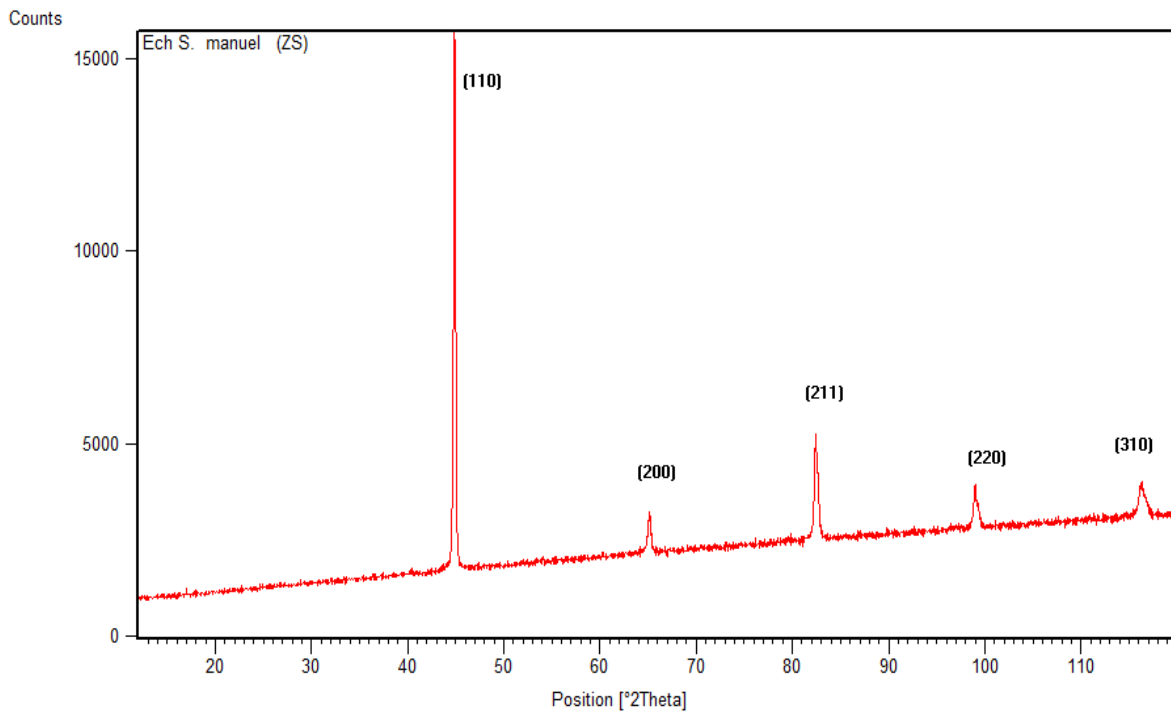


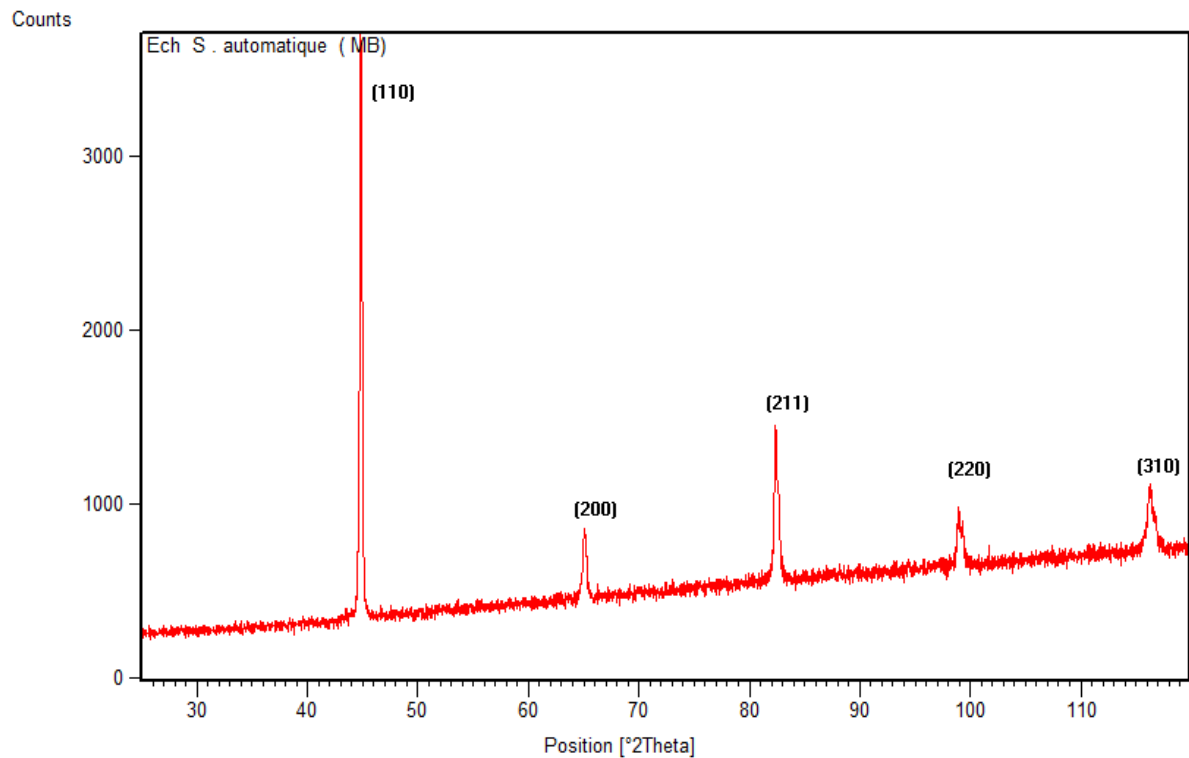
Figure IV.9: le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé manuel non traité thermiquement

**Tableau IV. 2 :** les caractéristiques des pics (zone soudé) soudé manuel de l'échantillon non traité thermiquement.

No.	Pos. [°2Th.]	hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,884	110	0,204	2971,52	2,01782	10924,72
2	65,1322	200	0,2448	253,43	1,43106	776,44
3	82,4524	211	0,204	636,92	1,16883	2341,63
4	99,0254	220	0,2244	272,28	1,01282	910,04
5	116,1897	310	0,2856	261,52	0,90738	686,75

## IV.2.2 Echantillon soudé automatiquement non traité

## ➤ Métal de base



*Figure IV.10: le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé automatique non traité thermiquement*

**Tableau IV. 3 :** les caractéristiques des pics (métal de base) soudé automatique de l'échantillon non traité thermiquement.

No.	Pos. [°2Th.]	hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,7965	110	0,2244	792,58	2,02156	2648,99
2	65,0448	200	0,2448	105,65	1,43277	323,68
3	82,3963	211	0,1632	169,69	1,16948	779,85
4	98,9676	220	0,2448	97,24	1,01326	297,91
5	116,2813	310	0,3264	122,44	0,90693	281,35

➤ Zone soudé (la zone affectés thermiquement (ZAT) et zone fondue (ZF))

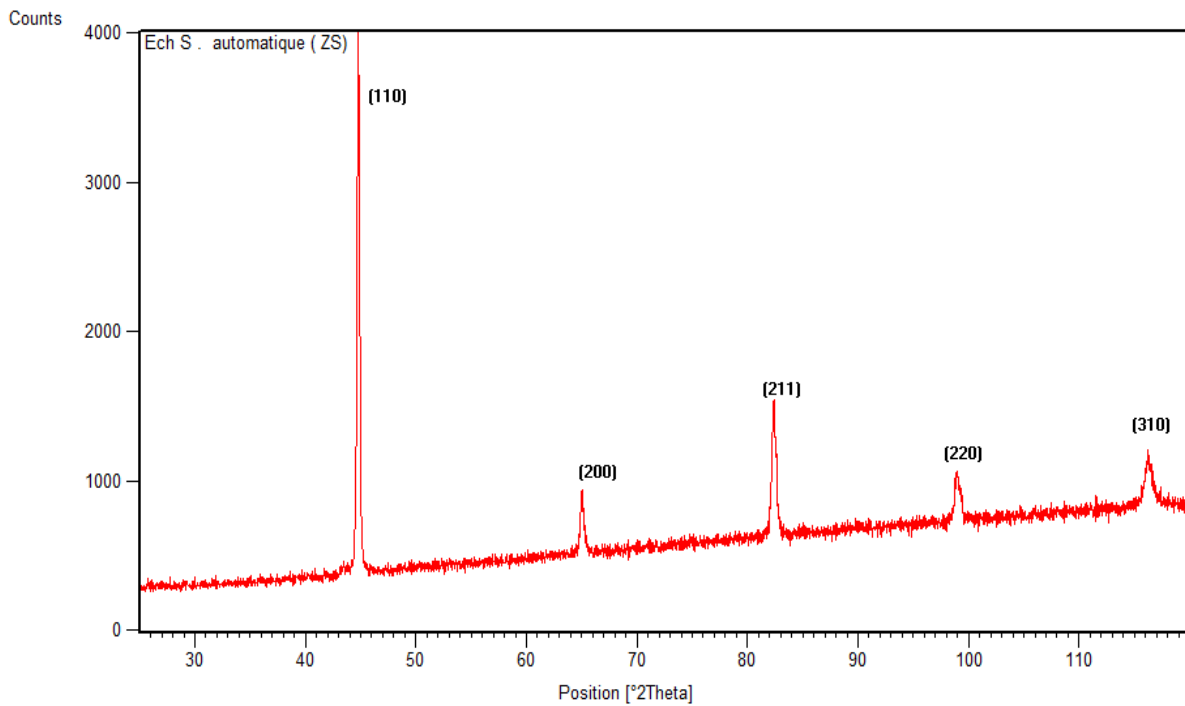


Figure IV.11: le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé automatique non traité thermiquement

**Tableau IV.4 :** les caractéristiques des pics dans la zone soudé de l'échantillons soudé automatiquement avant le traitement thermique.

No.	Pos. [°2Th.]	Hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,788	110	0,1632	611,77	2,02192	2811,44
2	65,0179	200	0,2856	120,94	1,4333	317,6
3	82,3624	211	0,1836	183,38	1,16988	749,1
4	98,9772	220	0,3264	122,32	1,01318	281,06
5	116,2121	310	0,4896	178,94	0,90727	274,12



IV.2.3 Echantillon soudé manuellement (traité)

➤ Métal de base

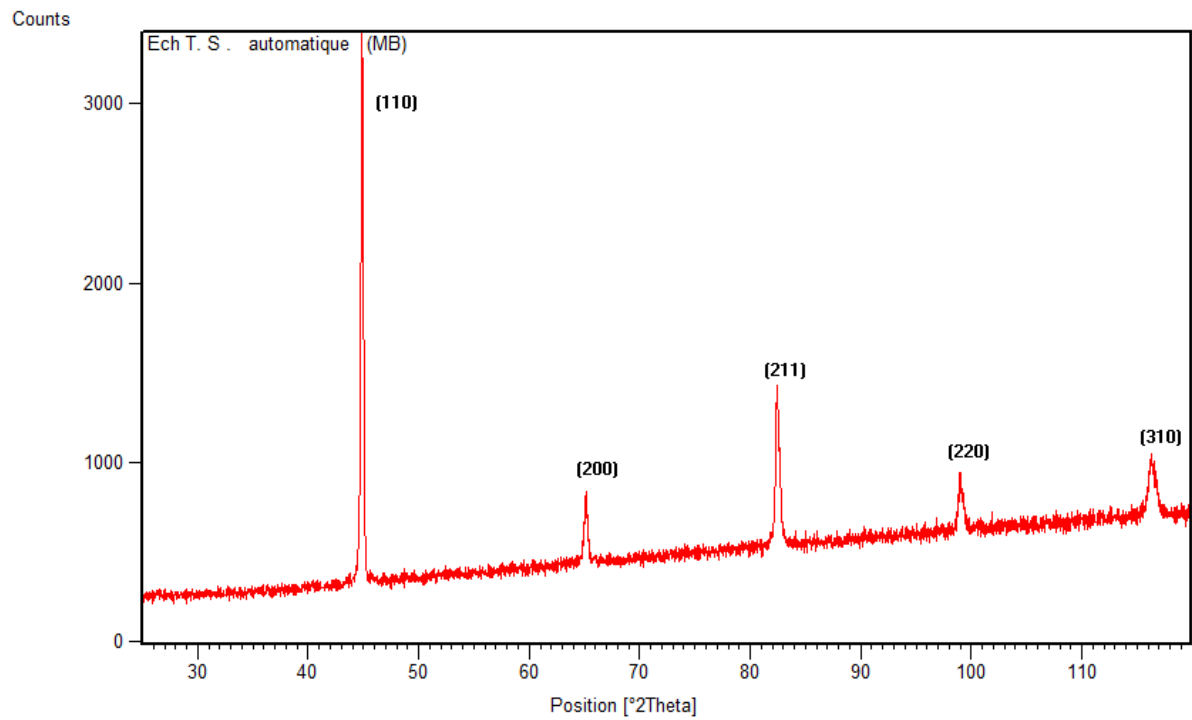


Figure IV.12: le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé manuel traité thermiquement

Tableau IV. 5 : les caractéristiques des pics (métal de base) soudé manuel de l'échantillon traité thermiquement.

No.	Pos. [°2Th.]	hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,8224	110	0,1632	699,29	2,02045	3213,64
2	65,0845	200	0,2448	107,25	1,43199	328,57
3	82,3857	211	0,204	218,38	1,16961	802,87
4	98,9079	220	0,2856	116,39	1,01371	305,65
5	116,3154	310	0,4896	201,98	0,90676	309,4

➤ Zone soudé (la zone affectés thermiquement (ZAT) et zone fondue (ZF))

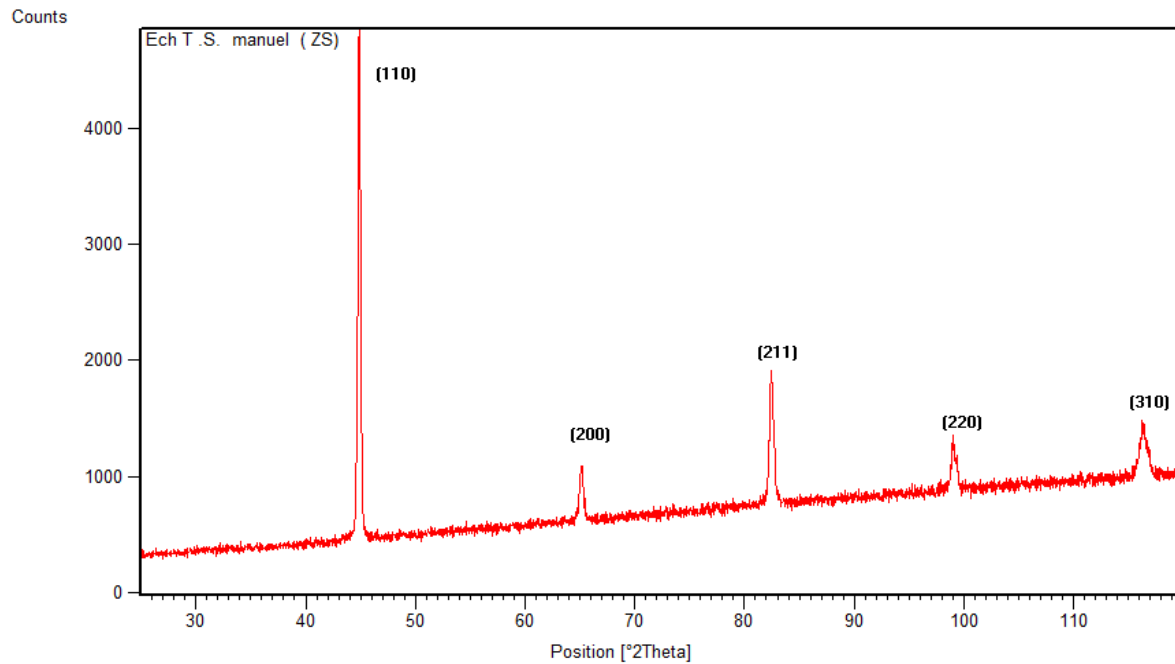


Figure IV.13: le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé manuel traité thermiquement

**Tableau IV. 6 :** les caractéristiques des pics (zone soudé) soudé manuel de l'échantillon traité thermiquement.

No.	Pos. [°2Th.]	hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,842	110	0,1836	847,34	2,01961	3461,35
2	65,0366	200	0,3264	148,4	1,43293	341
3	82,4213	211	0,1632	215,11	1,16919	988,54
4	98,98	220	0,2448	135,43	1,01316	414,93
5	116,3237	310	0,408	199,55	0,90672	366,82

IV.2.4 Echantillon soudé manuellement( traité )

➤ Métal de base

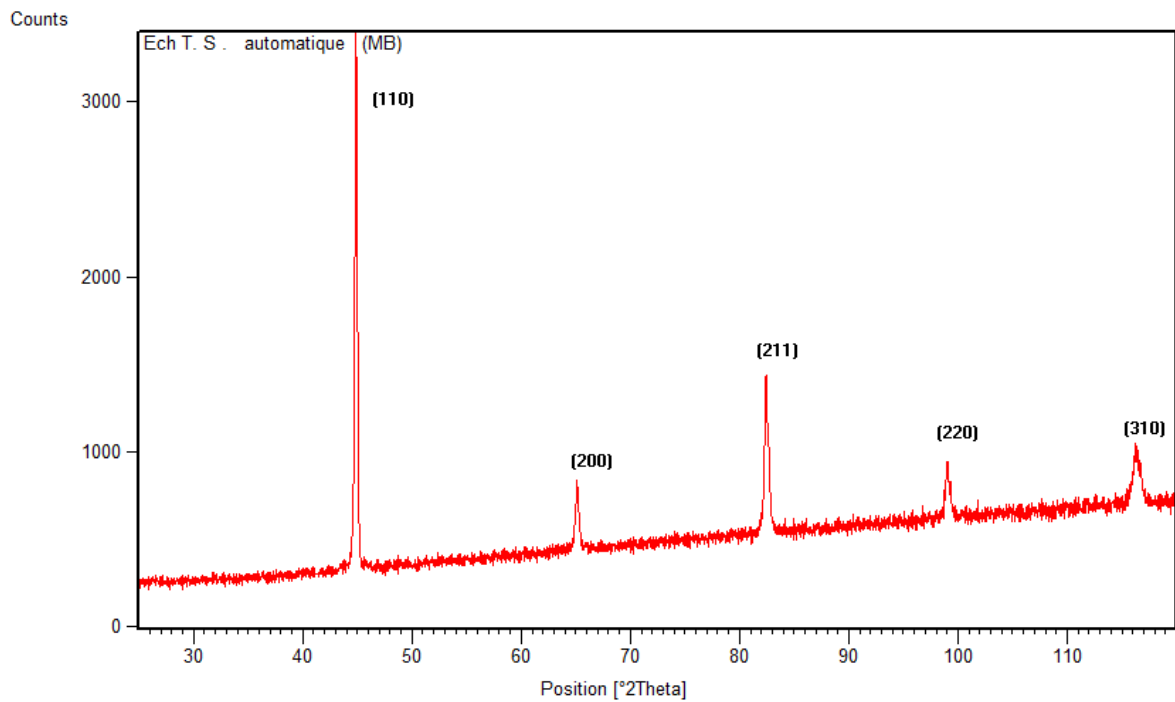
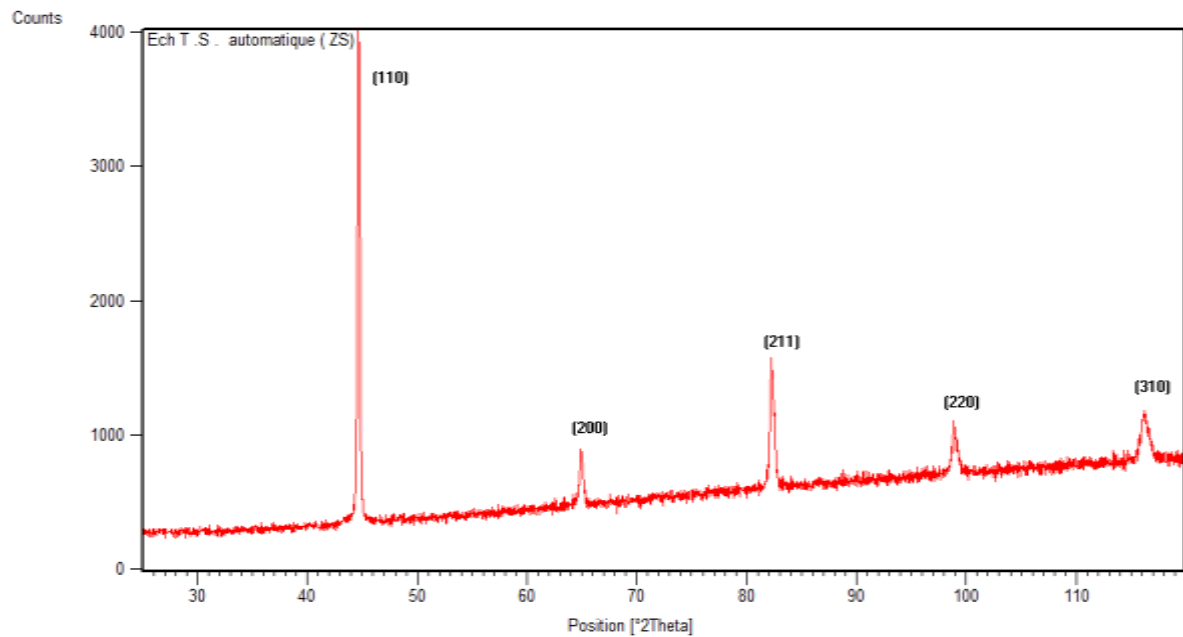


Figure IV.14: le diffractogramme de métal de base d'un échantillon soudé automatique traité thermiquement

**Tableau IV. 7** : les caractéristiques des pics (métal de base) soudé automatique de l'échantillon traité thermiquement.

No.	Pos. [°2Th.]	hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,8683	110	0,1836	604,79	2,01849	2470,55
2	65,1097	200	0,2448	95,61	1,4315	292,92
3	82,4208	211	0,1428	151,87	1,1692	797,62
4	98,9914	220	0,2448	89,13	1,01308	273,06
5	116,2824	310	0,4896	174	0,90693	266,54

➤ **Zone soudé (la zone affectés thermiquement (ZAT) et zone fondue (ZF))**



*Figure IV.15: le diffractogramme de zone soudé (ZAT+ZF) d'un échantillon soudé automatique traité thermiquement*

**Tableau IV. 8 :** les caractéristiques des pics (zone soudé) soudé automatique de l'échantillon traité thermiquement.

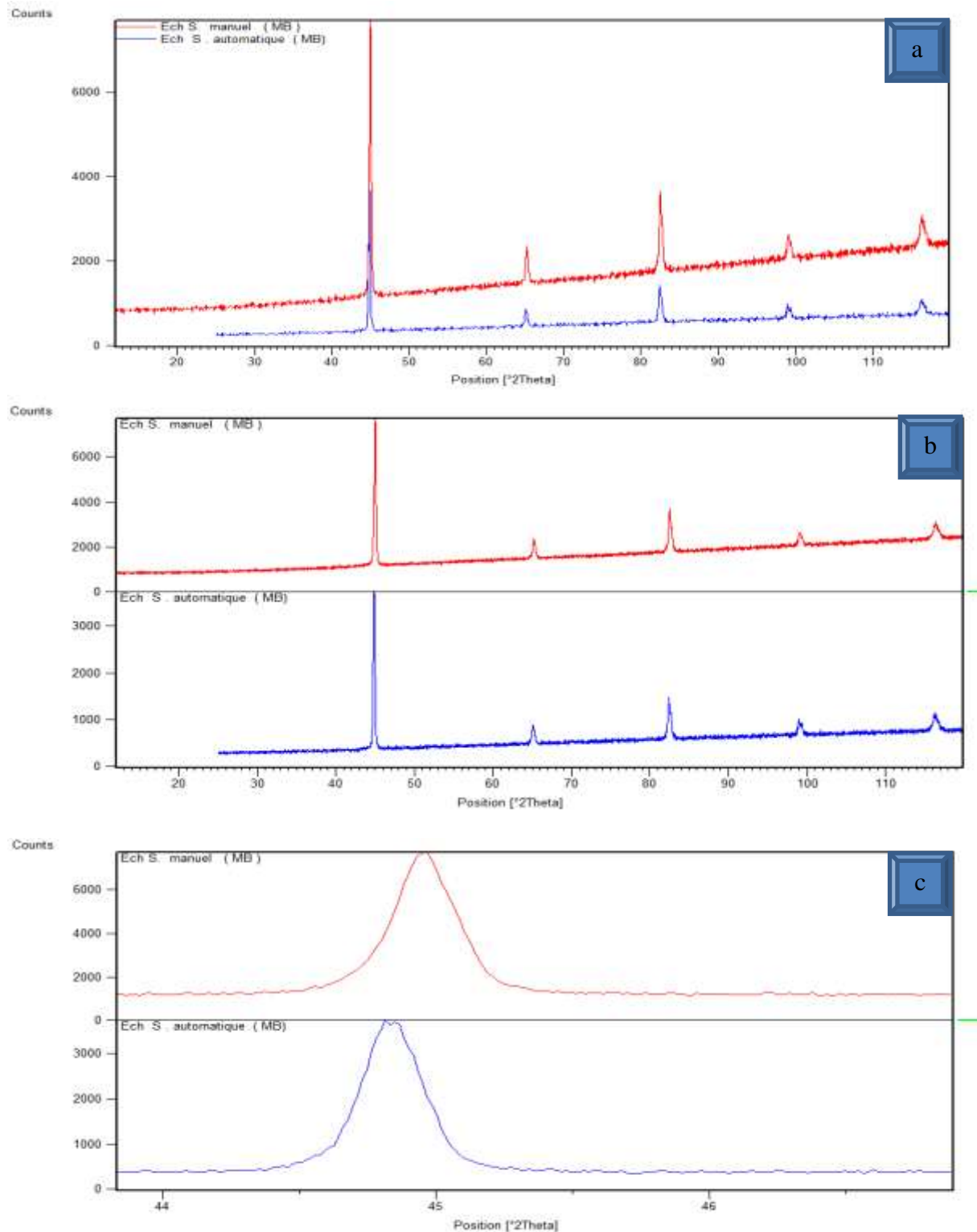
No.	Pos. [°2Th.]	hkl	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
1	44,6666	110	0,204	784,64	2,02714	2884,72
2	64,9248	200	0,204	86,12	1,43513	316,61
3	82,2252	211	0,2448	270,93	1,17149	830,05
4	98,8543	220	0,1632	72,22	1,01411	331,92
5	116,1978	310	0,408	152,05	0,90734	279,5

#### IV.2.5 Etude comparative des deux échantillons soudés manuellement et automatiquement

➤ **Métal de base (MB)**

Les figures IV.16, 17,18, 19,20, 21, illustrent les diffractogramme de deux zones étudiées (métal de base et la zone soudé) de quatre échantillons étudiés. Elles présentent les

cinq pics diffractée qui correspondent au la phase ferrite ( $\alpha$ ), les cinq pics sont correspond aux plans suivant : (110), (200), (211), (220) et (310).



**Figure IV.16:** les diffractogrammes de deux échantillons non traité soudé manuellement et automatiquement de métal de base. a) comparaison, b) vue en 2D, c)vue agrandie de pic (110).

Zone soudé (ZS)

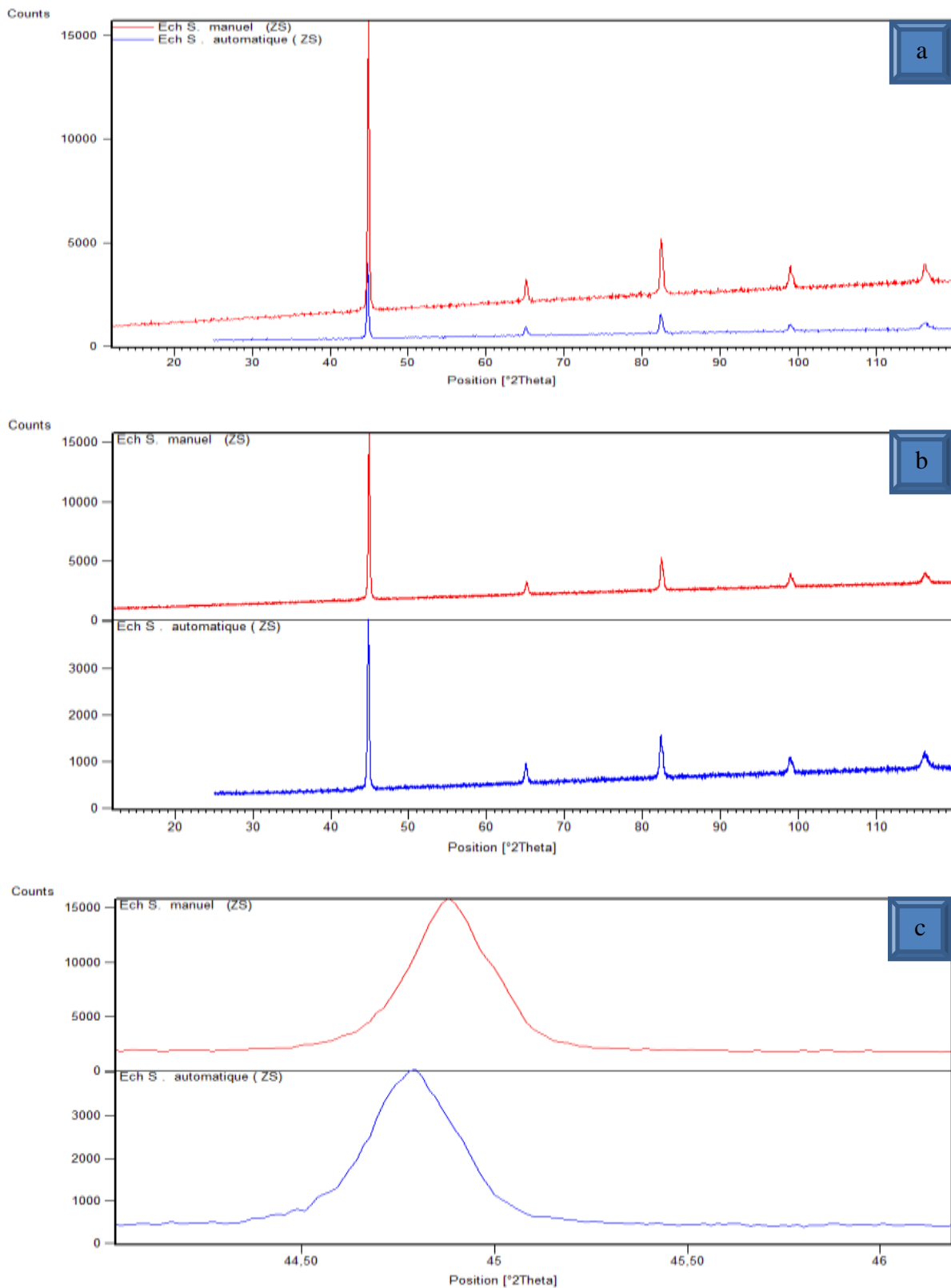
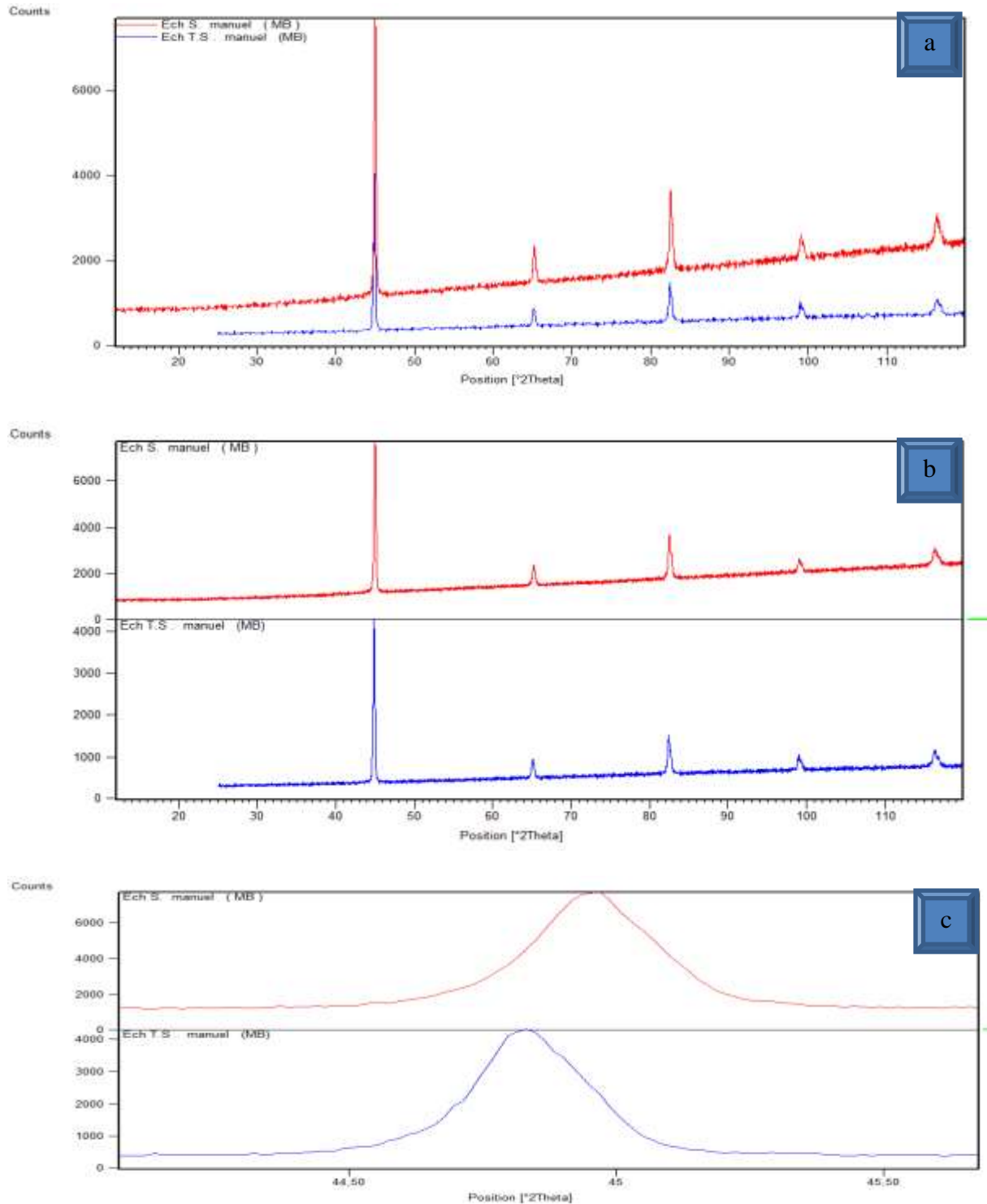


Figure IV.17: les diffractogrammes de deux échantillons non traité soudé manuellement et automatiquement de la zone soudé. a) comparaison, b) vue en 2D, c)vue agrandie de pic (110).

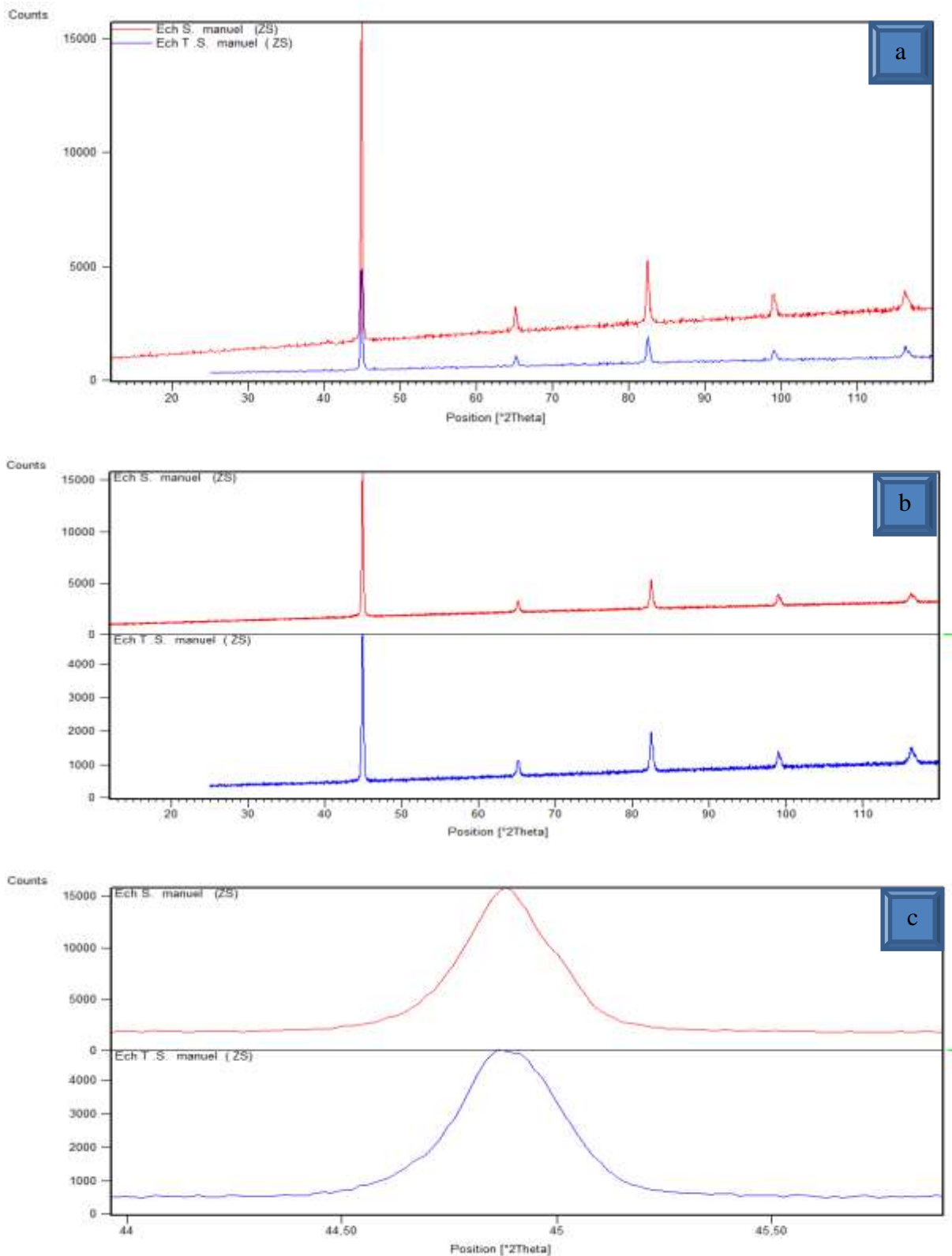
### IV.2.6 Etude comparative de deux échantillons soudés manuellement ( avant et après traitement thermique )

#### ➤ Métal de base (MB)



*Figure IV.18: les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé manuellement) de métal de base. a) comparaison, b) vue en 2D, c)vue agrandie de pic (110).*

➤ Zone soudé (ZS)

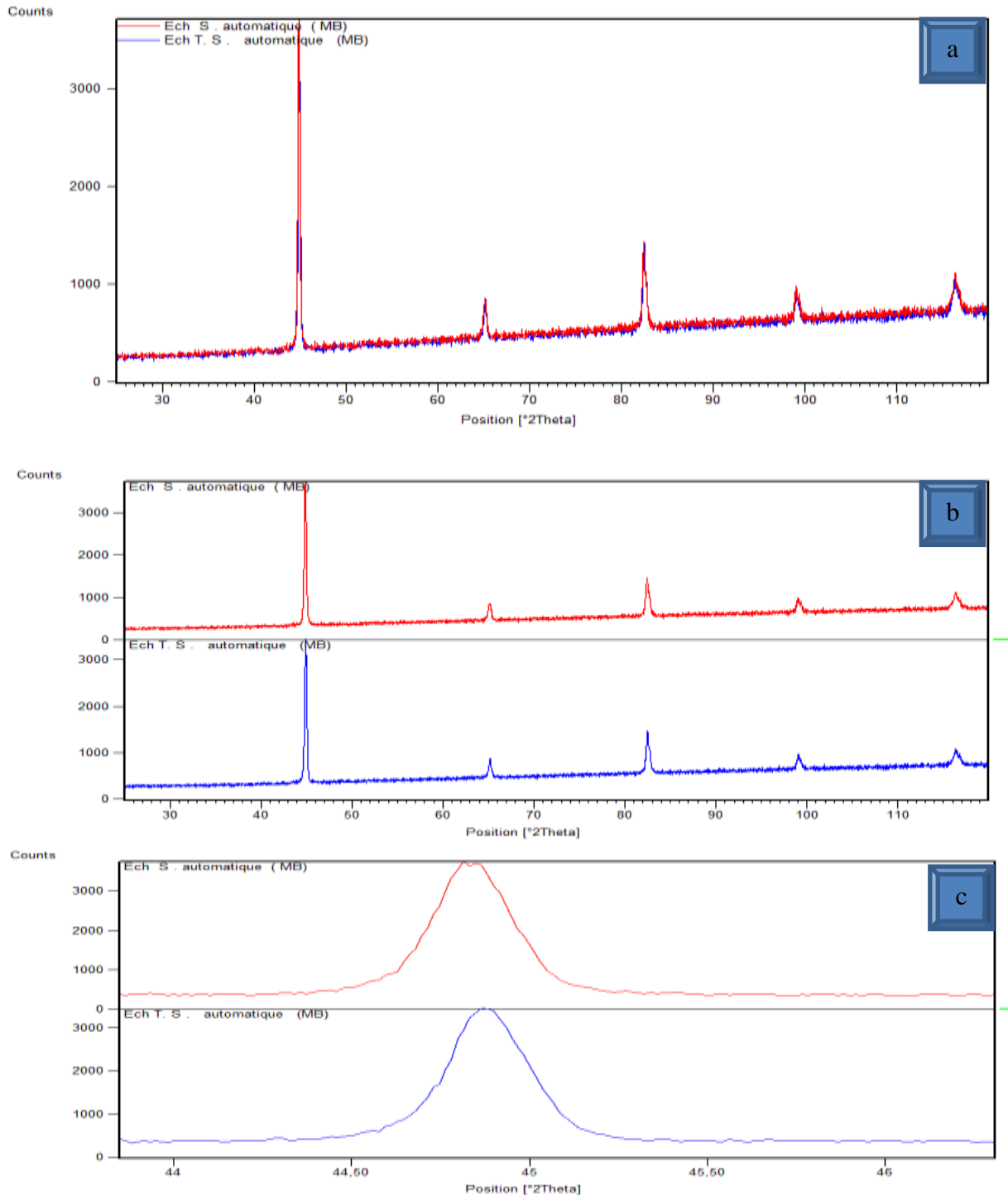


**Figure IV.19:** les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé manuellement) de la zone soudé. a) comparaison, b) vue en 2D, c) vue agrandie de pic (110).



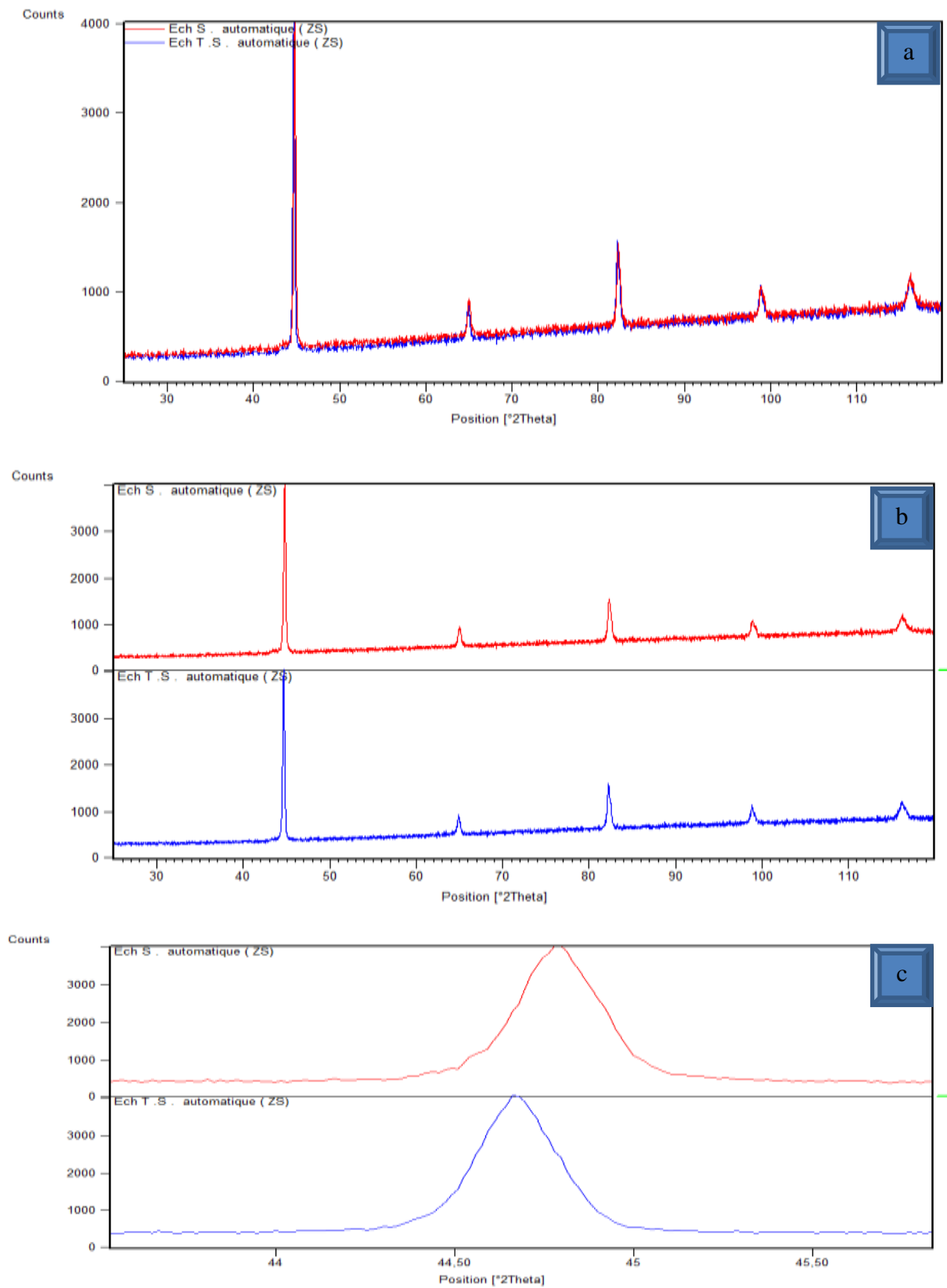
### IV.2.7 Etude comparative de échantillons soudés automatiquement deux (avant et après traitement thermique )

#### ➤ Métal de base (MB)



**Figure IV.20:** les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé Automatiquement ) de métal de base. a) comparaison, b) vue en 2D, c)vue agrandie de pic (110).

➤ Zone soudé (ZS)



**Figure IV.21:** les diffractogrammes de deux échantillons non traité et traité (soudé Automatiquement) de la zone soudé. a) comparaison, b) vue en 2D, c)vue agrandie de pic (110).

Les tableaux IV.9, 10, 11, 12, présentent les caractéristiques de ces cinq pics qui sont, le plan (hkl), la position ( $2\theta$ ), la hauteur des pics à mi-largeur (FWHM), l'intensité intégrale et en fin l'intensité relative de chaque pic.

#### ✚ La position des pics

Les tableaux IV.9, 10 illustrent les valeurs de variation des positions des pics ( $\Delta 2\theta$ ) dans le métal de base (MB) et la zone soudée (ZF) avant et après un traitement thermique de l'échantillon soudé manuellement.

#### ❖ Métal de base (MB)

L'échantillon non traité est considéré comme référence l'échantillon traité thermiquement.

Pour le premier pic (110) est initialement localisé par l'angle  $2\theta = 44.9529^\circ$ , se déplace vers les petits angles après le premier traitement thermique pour avoir une nouvelle position localisée par  $2\theta = 44.8224^\circ$ , soit une remarquable variation positive de  $\Delta 2\theta = 0.1305^\circ$ .

Le deuxième, troisième et quatrième pic qui correspondent aux plans (110), (211), et (220) respectivement, ou ils sont localisés initialement par  $2\theta = 65.1819^\circ$ ,  $82.4581^\circ$  et  $99.0141^\circ$  respectivement présentent des variations proches vers les petits angles aussi, ou on a obtenu les valeurs suivantes :  $\Delta 2\theta = 0.0945^\circ$ ,  $0.0724^\circ$  et  $0.1062^\circ$ .

Le cinquième pic correspond aux plans (310) qui est localisé initialement par  $2\theta = 116.2625^\circ$  présente un déplacement vers les grands angles ou  $\Delta 2\theta = -0.0529^\circ$ .

#### ❖ La zone soudée (ZS)

Le premier, troisième et quatrième pic correspondent aux plans (200), (211), (220) qui sont localisés initialement aux  $2\theta = 44.884^\circ$ ,  $82.4524^\circ$  et  $99.0254^\circ$  présentent de faibles déplacements vers les petits angles (les valeurs sont indiquées dans le tableau IV.10.)

Le deuxième et cinquième pic correspondent aux plans (200) et (310) présentent de remarquables déplacements vers les petits angles et les grands angles ou  $\Delta 2\theta = 0.0956^\circ$ , et  $-0.134^\circ$  respectivement.

Les tableau IV.11, 12 présentent les valeurs des variations des positions des pics ( $\Delta 2\theta$ ) dans le métal de base (MB) et la zone soudée (ZF) avant et après un traitement thermique de l'échantillon soudé automatiquement.

❖ **Métal de base (MB)**

Le premier et le deuxième pic correspondent aux plans (110), et (200) présentent des déplacements vers les grands angles plus importants que les autres pics, ou  $\Delta 2\theta = -0.0718^\circ$  et  $-0.0649$  respectivement. Mais les autres pics se déplacent aussi vers le grand angle ou  $\Delta 2\theta = -0.0245^\circ$ ,  $-0.0238^\circ$

Pour le troisième et quatrième pic, le cinquième pic (310) reste presque dans la même position ou  $\Delta 2\theta = -0.0011^\circ$ .

❖ **La zone soudée (ZS)**

Dans cette zone les quatre premiers pics présentent remarquables déplacements vers les petits angles ou  $\Delta 2\theta = 0.122^\circ, 0.0895^\circ, 0.1372^\circ$  et  $0.1229^\circ$  correspondent aux pics suivants (110) (200), (211) et (220).

Le dernier pic (310) présente un faible déplacement vers les petits angles ou  $\Delta 2\theta = 0.0143^\circ$

<b>Tableau IV. 9</b> : Les variations des positions des pics de diffraction dans le métal de base (MB) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés manuellement			
No.	Hkl	Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	$\Delta 2\theta^{\circ}$
Ech. non traité (S.M)	110	44,9529	0
Ech. traité (S.M)		44,8224	0,1305
Ech. non traité (S.M)	200	65,1819	0
Ech. traité (S.M)		65,0845	0,0945
Ech. non traité (S.M)	211	82,4581	0
Ech. traité (S.M)		82,3857	0,0724
Ech. non traité (S.M)	220	99,0141	0
Ech. traité (S.M)		98,9079	0,1062
Ech. non traité (S.M)	310	116,2625	0
Ech. traité (S.M)		116,3154	-0,0529

<b>Tableau IV. 10</b> : Les variations des positions des pics de diffraction dans la zone soudé (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés manuellement			
No.	hkl	Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	$\Delta 2\theta^{\circ}$
Ech. non traité (S.M)	110	44,884	0
Ech. traité (S.M)		44,842	0,042
Ech. non traité (S.M)	200	65,1322	0
Ech. traité (S.M)		65,0366	0,0956
Ech. non traité (S.M)	211	82,4524	0
Ech. traité (S.M)		82,4213	0,0311
Ech. non traité (S.M)	220	99,0254	0
Ech. traité (S.M)		98,98	0,0454
Ech. non traité (S.M)	310	116,1897	0
Ech. traité (S.M)		116,3237	-0,134

<b>Tableau IV. 11 : Les variations des positions des pics de diffraction dans le métal de base(MB) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés automatiquement</b>			
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	$\Delta 2\theta^\circ$
Ech. non traité (S.A)	110	44,7965	0
Ech. traité (S.A)		44,8683	-0,0718
Ech. non traité (S.A)	200	65,0448	0
Ech. traité (S.A)		65,1097	-0,0649
Ech. non traité (S.A)	211	82,3963	0
Ech. traité (S.A)		82,4208	-0,0245
Ech. non traité (S.A)	220	98,9676	0
Ech. traité (S.A)		98,9914	-0,0238
Ech. non traité (S.A)	310	116,2813	0
Ech. traité (S.A)		116,2824	-0,0011

<b>Tableau IV. 12 : Les variations des positions des pics de diffraction dans la zone soudé (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillons soudés automatiquement</b>			
No.	Hkl	Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	$\Delta 2\theta^{\circ}$
Ech. non traité (S.A)	110	44,788	0
Ech. traité (S.A)		44,6666	0,122
Ech. non traité (S.A)	200	65,0179	0
Ech. traité (S.A)		64,9248	0,0895
Ech. non traité (S.A)	211	82,3624	0
Ech. traité (S.A)		82,2252	0,1372
Ech. non traité (S.A)	220	98,9772	0
Ech. traité (S.A)		98,8543	0,1229
Ech. non traité (S.A)	310	116,2121	0
Ech. traité (S.A)		116,1978	0,0143



### ✚ L'intensité des pics (MB)

Les tableaux IV 13,14 résumant les caractéristiques des pics trouvés qui, sont, plan (hkP), position de pic ( $2\theta^\circ$ ), l'air de pic, la distance entre les plans (d) et l'intensité intégrale de pic dès l'échantillon soudé manuellement et automatiquement.

### ❖ Métal de base (MB)

Nous avons trouvés que les intensités intégrales maximales sont toujours dans l'échantillon non traité qui est soudé manuellement dans la tous les pics. Généralement les intensités de l'échantillon qui est soudé automatiquement égale à la moitié des valeurs de l'échantillon qui est soudé manuellement.

### ❖ La zone soudé (ZS)

La même chose est trouvé dans la zone soudé ou les intensités des pics de l'échantillon soudé manuellement pour toujours supérieures aux celles soudés automatiquement.

Les tableaux IV 15,16 présentent les caractéristiques des pics, de l'échantillons soudé manuellement avant et après un traitement thermique.

On a trouvé que dans le métal de base et la zone soudé les intensités des pics qui correspondant aux plans suivant :

(110), (200), (211), (220) et (310) vont diminuer après ce traitement thermique, c'est-à-dire on a une réorientation des grains (texture) [32.33].

Les tableaux IV 17,18 présente les de l'échantillon soudé automatique

-les intensités maximales des cinq premier pic dans le métal de base (MB) et la zone soudé (ZS) sont trouvés toujours avant traitement thermique, mais après ce dernier les intensités se diminuent légèrement ou les valeurs avant et après traitement dans cet échantillons sont très proche.

**L'hauteur a mis largeur (FWHM)**

L'hauteur a mis largeur des pic peut donner beaucoup d'information sur la taille des grains, ou l'augmentation ou la diminution des valeurs de la FWHM peut indiquer qu'il ya une affinement ou grossissement des grains

-Nous allons parler seulement sur le pic intense (ou la majorité des grains sous orientés verse la même direction

dans le tableaux IV 13 (métal de base) pour le premier pic correspond aux plant (110), la valeur de la FWHM de l'échantillons soudé manuellement est inferieur que cel soudé automatiquement c.a.d qu'il présent des grains plus grande que l'autre procédé ( s. automatique )

- dans le tableau 14 (la zone soudé) dans cette zone, ou a trouvé de la taille des grains après un soudage automatique est supérieur qu'après un soudage manuel car la valeur de la FWHM diminue.

Tableau 15 (métal de base) et la zone soudé, pour le premier pic (110) il ya une diminution de la valeur de la FWHM après ce traitement thermique, alors on peut conclure qu'il ya grossissement des grains.

Tableau 17, 18 la FWHM de premier pic (110) dans le métal de base de l'échantillon soudé automatiquement va diminuer après le traitement thermique, par conter dans la zone soudé la valeurs de FWHM de pic va augmenter après ce traitement thermique.

<b>Tableau IV. 13 :</b> Les caractéristiques des cinq premier pics de métal de base (MB) des échantillons soudés manuellement et automatiquement.						
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
Ech. non traité (S.M)	110	44,9529	0,1836	1218,36	2,01489	4976,95
Ech. non traité (S.A)		44,7965	0,2244	792,58	2,02156	2648,99
Ech. non traité (S.M)	200	65,1819	0,2856	245,54	1,43009	644,81
Ech. non traité (S.A)		65,0448	0,2448	105,65	1,43277	323,68
Ech. non traité (S.M)	211	82,4581	0,1224	271,71	1,16876	1664,88
Ech. non traité (S.A)		82,3963	0,1632	169,69	1,16948	779,85
Ech. non traité (S.M)	220	99,0141	0,3264	197,94	1,0129	454,83
Ech. non traité (S.A)		98,9676	0,2448	97,24	1,01326	297,91
Ech. non traité (S.M)	310	116,2625	0,4896	360,78	0,90702	552,66
Ech. non traité (S.A)		116,2813	0,3264	122,44	0,90693	281,35

Tableau IV. 14 : Les caractéristiques des cinq premier pics de la zone soudé (ZS) des échantillons soudés manuellement et automatiquement.						
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
Ech. non traité (S.M)	110	44,884	0,204	2971,52	2,01782	10924,72
Ech. non traité (S.A)		44,788	0,1632	611,77	2,02192	2811,44
Ech. non traité (S.M)	200	65,1322	0,2448	253,43	1,43106	776,44
Ech. non traité (S.A)		65,0179	0,2856	120,94	1,4333	317,6
Ech. non traité (S.M)	211	82,4524	0,204	636,92	1,16883	2341,63
Ech. non traité (S.A)		82,3624	0,1836	183,38	1,16988	749,1
Ech. non traité (S.M)	220	99,0254	0,2244	272,28	1,01282	910,04
Ech. non traité (S.A)		98,9772	0,3264	122,32	1,01318	281,06
Ech. non traité (S.M)	310	116,1897	0,2856	261,52	0,90738	686,75
Ech. non traité (S.A)		116,2121	0,4896	178,94	0,90727	274,12

<b>Tableau IV. 15 :</b> Les caractéristiques des cinq premier pics de métal de base (MB) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé manuellement						
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
Ech. non traité (S.M)	110	44,9529	0,1836	1218,36	2,01489	4976,95
Ech. traité (S.M)		44,8224	0,1632	699,29	2,02045	3213,64
Ech. non traité (S.M)	200	65,1819	0,2856	245,54	1,43009	644,81
Ech. traité (S.M)		65,0845	0,2448	107,25	1,43199	328,57
Ech. non traité (S.M)	211	82,4581	0,1224	271,71	1,16876	1664,88
Ech. traité (S.M)		82,3857	0,204	218,38	1,16961	802,87
Ech. non traité (S.M)	220	99,0141	0,3264	197,94	1,0129	454,83
Ech. traité (S.M)		98,9079	0,2856	116,39	1,01371	305,65
Ech. non traité (S.M)	310	116,2625	0,4896	360,78	0,90702	552,66
Ech. traité (S.M)		116,3154	0,4896	201,98	0,90676	309,4

<b>Tableau IV. 16 :</b> Les caractéristiques des cinq premier pics de la zone soudée (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé manuellement						
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
Ech. non traité (S.M)	110	44,884	0,204	2971,52	2,01782	10924,72
Ech. traité (S.M)		44,842	0,1836	847,34	2,01961	3461,35
Ech. non traité (S.M)	200	65,1322	0,2448	253,43	1,43106	776,44
Ech. traité (S.M)		65,0366	0,3264	148,4	1,43293	341
Ech. non traité (S.M)	211	82,4524	0,204	636,92	1,16883	2341,63
Ech. traité (S.M)		82,4213	0,1632	215,11	1,16919	988,54
Ech. non traité (S.M)	220	99,0254	0,2244	272,28	1,01282	910,04
Ech. traité (S.M)		98,98	0,2448	135,43	1,01316	414,93
Ech. non traité (S.M)	310	116,1897	0,2856	261,52	0,90738	686,75
Ech. traité (S.M)		116,3237	0,408	199,55	0,90672	366,82

<b>Tableau IV. 17 :</b> Les caractéristiques des cinq premier pics de métal de base (MB) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé automatiquement.						
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
Ech. non traité (S.A)	110	44,7965	0,2244	792,58	2,02156	2648,99
Ech. traité (S.A)		44,8683	0,1836	604,79	2,01849	2470,55
Ech. non traité (S.A)	200	65,0448	0,2448	105,65	1,43277	323,68
Ech. traité (S.A)		65,1097	0,2448	95,61	1,4315	292,92
Ech. non traité (S.A)	211	82,3963	0,1632	169,69	1,16948	779,85
Ech. traité (S.A)		82,4208	0,1428	151,87	1,1692	797,62
Ech. non traité (S.A)	220	98,9676	0,2448	97,24	1,01326	297,91
Ech. traité (S.A)		98,9914	0,2448	89,13	1,01308	273,06
Ech. non traité (S.A)	310	116,2813	0,3264	122,44	0,90693	281,35
Ech. traité (S.A)		116,2824	0,4896	174	0,90693	266,54

<b>Tableau IV. 18</b> : Les caractéristiques des cinq premier pics de la zone soudé (ZS) avant et après traitement thermique de l'échantillon soudé automatiquement.						
No.	hkl	Pos. [°2Th.]	(FWHM)	L'air de pic	d(nm)	L'intensité intégrale
Ech. non traité (S.A)	110	44,788	0,1632	611,77	2,02192	2811,44
Ech. traité (S.A)		44,6666	0,204	784,64	2,02714	2884,72
Ech. non traité (S.A)	200	65,0179	0,2856	120,94	1,4333	317,6
Ech. traité (S.A)		64,9248	0,204	86,12	1,43513	316,61
Ech. non traité (S.A)	211	82,3624	0,1836	183,38	1,16988	749,1
Ech. traité (S.A)		82,2252	0,2448	270,93	1,17149	830,05
Ech. non traité (S.A)	220	98,9772	0,3264	122,32	1,01318	281,06
Ech. traité (S.A)		98,8543	0,1632	72,22	1,01411	331,92
Ech. non traité (S.A)	310	116,2121	0,4896	178,94	0,90727	274,12
Ech. traité (S.A)		116,1978	0,408	152,05	0,90734	279,5



**Discussion**

Il est connu que, si le pic ne quitte pas sa position initial, alors on peut conclure que le me subit pas un contrainte, mais si le pic déplace vers les petites angle, on aura un contrainte uniforme (dilatation de la maille), si y déplace vers les grandes angles on peut dire qu'il ya une contrainte non uniforme (compression de la maille), l'élargissement des pics peut donner une information de la présence d'un contrainte non uniforme aussi [34].

D'après C. Bourmel et G. Benchabane [32.33] la variation des intensités est liées aux phénomènes de la recristallisation ou la réorientation des grains (texture).

### IV.3 Mesure de Microdureté

Le tableau IV.19 rassemble les valeurs de la microdureté Vickers des deux profils réalisée au niveau de la zone supérieure et inférieure du joint de soudé c.a.d la dernier et la première passe.

Les mesure de la microdureté de deux passe (la premier et la dernier) des échantillon soudé manuellement automatiquement .

-d'après ces résultat nous avons remarques que les grandes valeur de la microdureté sout trouvé au niveau de la zone fondue ,sa peut-être deux par la présent des contraintes résiduelle créés au cours de solidification de la bain de fusion [35].

-on a trouvé aussi que les valeurs de la microdureté diminuent de la ZF vers la zone affectée thermiquement.

-en général les mineurs microdureté de passe trois (la dernier passe ) sout toujours supérieur aux celles mesurés au niveau de passe 1 sa peut être provoqué par l'effet thermique des passes successivement [35].

#### IV.3.1 Echantillon soudé manuellement

<b>Tableau IV.19</b> :les mesures de microdureté de première et dernier passe des échantillons soudés manuellement							
Les zones	ZF			ZAT		MB	
H <sub>v</sub> passe 1	214,2	209,1	204,5	187,4	195,8	197,5	195 ,3
H <sub>v</sub> passe 3	299,2	200,9	216,1	176,1	197,9	196,7	203,4
N° d'empreinte	1	2	3	4	5	6	7

## IV.3.2 Echantillon soudé automatiquement

**Tableau IV.20** : les mesures de microdureté de première et dernier passe des échantillons soudé automatiquement

Les zones	ZF			ZAT		MB	
H <sub>V</sub> passe 1	222,5	216	209 ,1	178,9	192,0	202,0	194,5
H <sub>V</sub> passe 3	234 ,5	247,4	243 ,3	188,3	190,5	197,1	201,2
N° d’empreinte	1	2	3	4	5	6	7

**Tableau IV.22** : la moyenne de la microdureté de première et dernier passe des échantillons soudés manuellement et automatiquement

Les zones	ZF	ZAT	MB
H <sub>V moy</sub> (Ech.S.M) passe 1	209,26	191,6	196
H <sub>V moy</sub> (Ech.S.M) ) passe 3	238,73	187, 9	200,05
H <sub>V moy</sub> (Ech.S.A) passe 1	215,86	185,45	198,25
H <sub>V moy</sub> (Ech.S.A) passe 3	241,73	189,4	199,15
N° d’empreinte	1	2	3

Après le calcul de la moyenne ou la microdureté on trouve les valeur mesuré après un soudage automatique dans les trois zone (MB, ZAT et ZF) sont toujours supérieurs aux celle mesurée après un soudage manuelle.

**CONCLUSION**

## *Conclusion générale*

Le travail présenté dans ce mémoire, traite essentiellement et sous différents aspects, le comportement métallurgique d'un acier faiblement allié et à faible pourcentage en carbone (0,176 %) après un soudage multi-passes manuel et automatique à l'arc électrique avec l'usage d'un métal d'apport de composition chimique relativement proche à celle du métal de base.

Dans ce cadre, plusieurs techniques de caractérisations ont été utilisées afin d'investiguer le comportement de ce métal comme l'observation microscopique, la diffraction des rayons X et mesure de la microdureté.

L'analyse des résultats expérimentaux obtenus a permis de tirer certains commentaires dont le plus important est cité ci après.

Après procédé de soudage, une zone visiblement détectable est créée, celle-ci s'appelle la zone affectée thermiquement (ZAT), retrouvée dans toute la littérature du soudage.

Avant traitement thermique, les observations optiques réalisées montrent que les microstructures de métal de base (MB) et la zone affectée thermiquement (ZAT) de trois passes successives présentent des structures proches, constituées par une matrice ferritique avec des petites colonies de perlite, et qui montrent clairement plusieurs zones différentes de part et d'autre de la ZF avec des proportions de phases différentes dans lesquelles nous constatons la présence des gros grains ferritiques, des petites colonies de perlite, ferrite aciculaire, ferrite proeutectoïde et ferrite de Widmanstätten.

Une variation des tailles des grains dans le métal de base et la zone affectée thermiquement qu'on a remarqué par les observations optiques réalisées après le traitement thermique surtout dans l'échantillon soudé automatiquement avec l'apparition de nouvelle morphologie de ferrite qui est la ferrite aciculaire (ZAT passe 1 et passe de l'échantillon soudé manuellement)

Dans la région de la zone fondue (ZF), la structure des grains dans la ZF sont moins homogènes que celle du métal de base ou dans la ZAT, en raison du taux de refroidissement après le soudage.

Des différents spèctres sont obtenus par la diffraction des rayons X qui donnent plusieurs informations sur les orientations, l'affinement et la grossissement des grains des différentes zones (MB, ZAT, ZF) dans le joins soudés des substrats étudiés.

En fin les mesures de la microdureté de différentes zones donnent beaucoup d'information sur les caractéristiques mécaniques des passes étudiées, où l'augmentation de la microdureté dans certain zone, c'est-à-dire une zone dure (Zone à grain fins ou bien contient des phase dure comme la ferrite aciculaire ou lferrite de widmanstätten), sa implique la fragilité de ce materiau.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

# Références bibliographiques

[1] G.BERANGER, «Génialité Dès L'acier», Epp 22. Sollac. (1996).

[2] A. ROOS, «Précis De Métallurgie Appliquée». Edition Technique Et Documentation-Lavoisier (1982).

[3] R.STEINER, «Properties And Sélection: Irons Steels And High Performance Alloys Volume De 10<sup>Em</sup> Edition Metals Handbook International American Society Of Matériels ,(1990). [4]

Disponible En Ligne Sur Le Site :[Http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm](http://Www.Totalmateria.Com/Articles/Art62.Htm)

[5] A. BOUMARAF, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilise Dans La Fabrication Des Bouteilles A Gaz », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université Mohamed Khider Biskra, (2015).

[6] R.VILLEGAS, «Genèse De La Ferrite Aciculaire Dans Les Aciers A Moyen Carbone Microalliés Au Vanadium. Morphologie Fractale En Relation Avec Les Propriétés Mécaniques. », Thèse De Doctorat De Ltnpl (Institut National Polytechnique De Lorraine), (2007). [7] C.E

.DERFOUFE, « Cour De Technologie» , 1<sup>er</sup> Année D'uea, (2005-2006).

[8] M. Hakem , «Elaboration Et Etude De L'évolution Microstructurale D'un Acier A Haute Limite Elastique Au Molybdène Après Traitements Thermomécaniques Et Thermiques», Mémoire De Magister En Science Des Matériaux», Université Saad Ahleb B Blida ,(2002).

[9] P. CHARLIER, «Aciers A Dispersoïdes », Techniques De L'ingénieur, (1991).

[10] H. MAROUF, « Caractérisation Structurale Et Mécanique Du Joint Soudé De La Liaison Bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier Anti-Usure Naxtra 70 Utilisé Par V Unité Grue De Bejaïa Dans L'assemblage De La Pelle Chargeuse Et Godet D'excavation», Mémoire De Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, (2012).

[11] M .ABDERRAHIM , «Etude Du Comportement En Fatigue Des Aciers Pour Pipelines », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université De Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, (2013).



- [12] F. BOUNABE «Evolutions Microstructurales Lors Des Traitements Thermiques Imposés A Un Acier Faiblement Allié (53mnsi4) », Memoire D'ingénieur En Métallurgie , Université De Mouhamed Kheider, Biskra, (2013).
- [13] G.MURRY, «Généralités Sur Aciers», Techniques De L'ingénieur, Centre Français D'exploitation, (2002).
- [14] G.MURRY, « Transformations Dans Les Aciers », Techniques De L'ingénieur, MI 115, Centre Français D'exploitation (2002).
- [15] A. SAMIR, « Evaluation Des Paramètres Mécaniques Après Le Procédé De Soudage » Mémoire De Master, Université De Mouhamed Kheider, Biskra, (2012).
- [16] D.BENSAIDA, « Feliachi » Technologie Office De Publication Universitaires 2<sup>eme</sup> Edition ; (2009).
- [17] Collection Terme Et Definition Utilise En Soudage Et Technique Connexes Publications De La Soudure Autogene, ( 1996).
- [18] Esab Ab Welding Equipment Ab,Laxà,Sweden,(2007).
- [19] B. POLIZZI, « Fumees De Soudage : Efficacité Des Différents Systèmes De Protection Du Soudeur Et De Son Environnement En Soudage Smaw», Centre Technique Des Industries Mécaniques, France, (2004).
- [20] (Encyclopédie), «Guide Du Soudage, Soudage A L'arc Sous Gaz Le Protection Tig, Mig, Mag», Tome V, Publication De La Soudage Autogène, (1996) .
- [21] K. KHELIL, « Soudage Des Pipelines », Mémoire D'ingénieur En Métallurgie, Université De Mouhamed Kheider ;Biskra, (2010).
- [22] Disponible Sur Le Site :[Http://Www.Lincolnelectric.Au//](http://Www.Lincolnelectric.Au//)
- [23] N .TRINH, «Modélisation Du Comportement Thermomécanique Et Métallurgique Des Aciers», Thèse De Doctorat En Mécanique Et Matériaux , Ecole Polytechnique, (2008). [24]
- Documents Technique, Société De Soudage (Cosider), Biskra (2012).
- [25] Disponible En Ligne Sur Le Site : [Http: Www.Yamani-Institute.Com/](http://Www.Yamani-Institute.Com/)

- [26] S. KHAOULA «L'étude De L'effet Thermique Sur Une Soudure D'une Pipeline », Mémoire De Master En Génie Chimique; Université De Mouhamed Kheider ; Biskra, (2012).
- [27] X. LIN, «Heat Affected Zone Structure and Properties Of A Welded Copper Bearing Hsla Steel », These De Doctorat En Philosophie, Department Of Materials Engineering, The University Of Wollongong (1991).
- [28] B. EGHBALI ET A. ABDOLLAH-ZADEH «The Influence Of Thermomechanical Parameters In Ferrite Grain Refinement In A Low Carbon Nb-Microalloyed Steel» Scripta Materialia Journal De Vol 53,pp 41–45, (2005).
- [29] S.WEI ET S.LU «Effects Of Multiple Normalizing Processes On The Microstructure And Mechanical Properties Of Low Carbon Steel Weld Metal With And Without Nb», Journal Of Materials And Design, Vol 35,pp 43–54,(2012).
- [30] H. K. D. H. BHADSHIA, «Possible Effects Of Stress On Steel Weld Microstructures», Mathematical Modelling Of Weld Phenomena, Eds H. Cerjak, Institute Of Materials, London, ,Vol 118, pp. 71, (1995).
- [31] W. ZHANG, J.W. ELMER ET T. DEBROY «Modeling And Real Time Mapping Of Phases During Gta Welding Of 1005 Steel», Materials Science And Engineering A,Vol 333 ,pp 320-335, (2002).
- [32] C. BOUREMEL «Etude Du Joint Soudé D'un Alliage D'aluminium», Thèse De Doctorat Génie Mécanique , Université De Mouhamed Kheider ; Biskra, (2015).
- [33] G. BENCHABANE,«Les Mécanismes De Recristallisation Et De Croissance Des Grains Dans Les Métaux Et Alliages Métalliques Légers», Thèse De Doctorat Sciences Exactes, Université De Mouhamed Kheider , Biskra, (2009).
- [34] L.FELLAH «L'effet De Tréfilage Et De Recuit Sur Les Fils Electriques De Cuivre», Thèse De Doctorat En Génie Mécanique , Université De Mouhamed Kheider ; Biskra, (2015).
- [35] P.SATIYA, M.K.MISHARA ET B.SHANMUGAJAN,« effect of shielding gases on microstructure and mechanical properties of super austenitic stainless steel by hybrid welding», Of Materials And Design,Vol 33,pp 213–212 , (2012).

## Résumé

Le but de ce travail est l'étude de l'aspect métallurgique de soudage manuel et automatique d'acier , pour suivre les évolutions structurales et mécaniques de cette nuance, plusieurs méthodes expérimentales ont été utilisées comme la microscope optique ,les mesures de la microdureté et la diffraction des rayons X.

L'identification de différentes zones de part et d'autre du joint soudée telle que la Zone Fondue et la Zone Affectée Thermiquement créés suite au procédé de soudage. Il à été clairement remarqué et des différentes microstructures dans ces zones à révélé que la taille des grains, leurs orientations privilégiées.

Une étude sur les effets du traitement thermique de recuit à 950°C que subit ces joint soudé a aussi fait l'objet de notre étude.

**Mots clés :** soudage manuel, soudage automatique, l'acier, Zone Fondue , Zone Affectée Thermiquement.

## ملخص

الهدف من هذه العمل هو دراسة المظهر المعدني للتلحيم الأوتوماتيكي واليدوي للفولاذ استخدمنا عدة طرق تجريبية مثل المجهر الضوئي والتحليل بواسطة انعراج الأشعة السينية وكذلك قياسات الصلادة , لمتابعة التطورات البنيوية والميكانيكية للعينات - من نتائج هذه الدراسة، تم التعرف على المناطق المكونة لمكان التلحيم كالمنطقة المذابة و المنطقة المتأثرة حراريا الناتجة عن التلحيم، تم كذلك ملاحظة عدة بنيات في هذه المناطق مثل اختلاف حجم الحبيبات واتجاهاتها المختلفة - نذكر كذلك أننا درسنا تأثير المعالجة الحرارية في درجة ° 930 مئوية على منطقة التلحيم درجة الحرارة النموذجية

**الكلمات الدالة :** التلحيم اليدوي, التلحيم الأوتوماتيكي , الفولاذ , المنطقة المذابة , المنطقة المتأثرة حراريا .

## Abstract

The aim of this study The purpose of this memory is the study of the metallurgical aspect of manual and welding automatic of micro-alloyed steel. This steel is usually used to the manufactured mechanical tools. To follow the structural and mechanical changes of the samples we used some experiments like: The optical microscopy, X-ray diffraction and mesure of Hardness

The identification of the various zones in the wels joint like the fusion zone (FZ)and the heat affected zone(HAZ),this later is obtained by the effect of thermal cycle of welding.we observed different microstructures withe different grain size and orientations.

We studied also the effect of heat treatment at 950°C on the weld joint.

**Key words:** welding manual, welding automatic, steel, zone (FZ), affected zone (HAZ).