



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

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie des procédés de l'environnement**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**ZEMIH Sana**

Le : mercredi 23 septembre 2020

## **Étude d'une zone affectée thermiquement (ZAT) d'un acier X60**

---

### **Jury :**

Dr. HAMDY INES	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr. DIAFI Malika	MCA	Université de Biskra	Examineur
Dr. SLIMANI Assai	MAA	Université de Biskra	Président

# *Remerciements*

*Je remercie tout d'abord « ALLAH » qui m'a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.*

*J'ai un grand honneur de partager avec tous ceux que j'aime ces instants de bonheur et de joie, dans une telle occasion de thèse de master, qui est le fruit d'un travail qui n'aurait pu être accompli sans l'aide du dieu le tout puissant et l'aide de ma famille qui a grandement contribué à mon instruction, surtout mes parents qui m'ont beaucoup encouragé pendant toutes ces années d'étude.*

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

*Je tiens 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 madame DIAFI Malika et madame SLIMANI Assai.*

*Merci à tous.*

# *DEDICACE*

*Je rends grâce a dieu de m'avoir donné le courage et la volonté d'avoir pu terminer mes études.*

*Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère "Houria" qui m'a en couragé et veille à mon succès dans mes études.*

*Sans oublier le soutien indéfectible de mon père "Amar" durant toutes mes années d'étude.*

*A mon frère .... Aymen et Mehdi.*

*A mes sœurs....Amina, Halima, Fatima.*

*A Tous La Famille ZEMIH.*

*A tous Mes amis Sans exception.*

*Que Dieu puisse vous protéger.*

---

**Sommaire**

Remerciement.....	I
Dédicace .....	II
Sommaire .....	III
Liste des figures .....	VIII
Liste des tableaux .....	X
Introduction générale.....	XI

**Chapitre I : Généralités sur les aciers**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de l'acier.....	3
I. 3 Classification des aciers.....	3
I.3.1 Aciers non alliés (« Aciers au carbone ») .....	3
I.3.1.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, et C).....	3
I.3.1.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C.....	4
I.3.2 Aciers alliés.....	4
I.3.2.1 Aciers faiblement alliés.....	4
I.3.2.2 Aciers fortement alliés X.....	5
I.4 Les composants des aciers.....	5
I.4.1 Les impuretés.....	5
I.4.2 Les éléments d'additions.....	6
I.4.3 Les éléments d'accompagnements.....	6
I.5 Propriétés générales de l'alliage fer-carbone.....	6
I.5.1 Fer.....	6
I.5.2 Carbone.....	7

I.6 Diagramme fer-carbone.....	7
I.6.1 Acier eutectoïde (0,77 %C).....	9
I.6.2 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C).....	9
I.6.3 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C).....	9
I.7 Traitement thermique des aciers.....	10
I.7.1 Définition.....	10
I.7.2 But de traitement.....	11
I.7.3 Les principaux types de traitement thermique.....	11
I.7.3.1 Trempe.....	11
I.7.3.2 Revenu.....	12
I.7.3.2. 1 Les types de revenu.....	12
I.7.3.3 Recuit.....	13

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

II.1 Introduction.....	14
II.2 Procèdes de soudage.....	14
II.2.1 Principe du soudage à l'Arc et notion d'électricité.....	14
II.2.1.1 Le procédé de soudage SMAW.....	15
II.2.1.2 Le procédé de soudage GMAW.....	16
II.2.1.2 .1 Les procédés de soudage MIG/MAG.....	17
II.2.1.2 .2 Principes du procédé de soudage MIG/MAG.....	18
II.2.1.3 Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG.....	19
II.2.1.3 .1 Principe et mise en œuvre du procédé.....	19
II.3 Le Soudage par point (RSW).....	20
II.3.1 Définition.....	20

---

II.3 .2 Applications.....	21
II.4 Soudage oxygaz .....	22
II.4 .1 Définition.....	22
II.4 .2 Application.....	22
II.5 Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) .....	22
II.6 Le soudage (et le coupage) laser.....	23
II.7 Le soudage par friction-malaxage.....	23
II.8 Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	23
II.8.1 La zone fondue (nommée ZF).....	24
II.8.2 La zone affectée thermiquement (nommée ZAT).....	24
II.8.3 La zone de liaison.....	24
II.8.4 Le métal de base.....	24
II.9 Les défauts de soudures.....	24
II.9.1 Les inclusions gazeuses.....	25
II.9.2 Inclusion solides.....	25
II.9.3 Les fissure .....	25
II.10 Contrôle non destructif (CND).....	27
II.10.1 contrôle visuel.....	27
II.10.2 Contrôle par radiographie.....	27
II.10.3 Contrôles par magnétoscopie.....	27
II.10.4 Epreuve hydrostatique.....	28
II.10.5 Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatique).....	28
II.10.6 Contrôle final.....	28

**Chapitre III : Matériau et méthodes expérimentales**

III.1 Introduction.....	29
III.2 l'acier d'étude.....	29
III.3 Méthodes expérimentales utilisées.....	29
III.3.1 Traitement thermique.....	29
III.3.2 Micrographie.....	31
III.3.2.1 Polissage.....	31
III.3.2.2 Attaque chimique.....	31
III.3.2.3 Microscopie optique (MO) .....	32
III.3.3 Mesure de micro dureté.....	32
III.3.4 Diffraction par rayon X.....	34
III.3.4.1 Principe de la DRX.....	34
III.3.4.2 Exploitation des diffractogrammes.....	35

**Chapitre IV : Résultats et interprétation**

IV.1 Etude micrographique .....	36
IV.1.1 Microstructure du métal de base .....	36
IV.1.2 microstructure d'une ZAT (échantillon soudé).....	36
IV.1.3 microstructure des échantillons après traitement thermique.....	38
IV.2 Caractérisation des phases par la diffraction des rayon-x .....	39
IV.2.1 Etat brut .....	39
IV.2.2 ZAT (échantillon soudé).....	40
IV.2.3 ZAT (après un traitement thermique).....	40
IV.3 Mesure de la micro dureté .....	42
Conclusion générale.....	43

Références bibliographiques.....	<b>XIII</b>
Résumé.....	<b>IXV</b>
ملخص.....	<b>XVI</b>

## Listes des figures

<b>Figure I.1:</b>	Principes de désignation symbolique des aciers selon la norme EN10027-1-2	<b>5</b>
<b>Figure I.2:</b>	Structure cristalline cubique centrée	<b>6</b>
<b>Figure I.3:</b>	Structure cristalline cubique à face centrée	<b>7</b>
<b>Figure I.4:</b>	Diagramme d'équilibre fer-carbone	<b>8</b>
<b>Figure I.5:</b>	Cycle thermique de traitement	<b>10</b>
<b>Figure II.1:</b>	Circuit électrique pour le soudage à l'arc	<b>15</b>
<b>Figure II.2:</b>	Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée	<b>16</b>
<b>Figure II.3:</b>	principale de fonctionnement du procédé GMAW	<b>17</b>
<b>Figure II.4:</b>	Principes du procédé de soudage MIG/MAG	<b>18</b>
<b>Figure II.5:</b>	schéma du procédé TIG	<b>20</b>
<b>Figure II.6:</b>	Mécanisme du soudage par point	<b>21</b>
<b>Figure II.7:</b>	Principe du soudage par molette	<b>21</b>
<b>Figure II.8:</b>	Principe du soudage oxygaz	<b>22</b>
<b>Figure II.9:</b>	Cordon de soudure	<b>23</b>
<b>Figure II.10:</b>	Inclusions gazeuse	<b>25</b>
<b>Figure II.11:</b>	Inclusions de : a) laitier, b) tungstène, c) cuivre	<b>25</b>
<b>Figure II.12:</b>	Les types de fissure	<b>26</b>
<b>Figure II.13:</b>	CND Radiographies	<b>27</b>
<b>Figure II.14:</b>	Magnétoscopie	<b>27</b>
<b>Figure II.15:</b>	Ultrason	<b>28</b>
<b>Figure III.1:</b>	Diagramme d'équilibre fer-carbone	<b>30</b>
<b>Figure III.2:</b>	four électrique	<b>30</b>
<b>Figure III.3:</b>	Une Polisseuse	<b>31</b>

<b>Figure III.4:</b>	Microscope optique de type Hund	<b>32</b>
<b>Figure III.5:</b>	Micro dureté utilisé est de marque Zwick roell indentec	<b>33</b>
<b>Figure III.6:</b>	pénétrateur pyramidal	<b>33</b>
<b>Figure III.7:</b>	Diffractomètre des rayons X de type D8 Advanced of Bruker AXS	<b>35</b>
<b>Figure IV.1:</b>	Microstructure de métal de base observé par microscope optique	<b>36</b>
<b>Figure IV.2 :</b>	Microstructure d'une ZAT (échantillon soudé) par microscope optique	<b>37</b>
<b>Figure IV.3 :</b>	Acier X60soudé	<b>38</b>
<b>Figure IV.4:</b>	Microstructure des échantillons après traitement thermique observé par microscope optique (900, 1000 et 1200°C)	<b>38</b>
<b>Figure IV.5 :</b>	Spectre de diffractogrammes des rayons X d'un métal de base	<b>39</b>
<b>Figure IV.6:</b>	Spectre de diffractogrammes des rayons X d'une ZAT (échantillon soudé)	<b>40</b>
<b>Figure IV.7:</b>	Spectre de diffractogrammes des rayons X des échantillons après traitement thermique ; a) 900, b) 1000 et c) 1200°C	<b>41</b>
<b>Figure IV.8:</b>	micro dureté d'une ZAT d'un acier X60	<b>42</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableaux</b>	<b>Titre</b>	<b>page</b>
<b>III.1</b>	Composition chimique de l'acier X60 étudié	<b>33</b>
<b>IV.1</b>	Les caractéristiques des pics du l'acier a l'état brut.	<b>39</b>
<b>IV.2</b>	Les valeurs de la microdureté	<b>42</b>

Liste des abréviations

**ZAT** : Zone affectée thermiquement.

**ZAC** : Zone affectée par la chaleur.

**MB** : Métal de base.

**ZF** : Zone fondue.

**Ac1** : Température à laquelle la ferrite achève de se transformer en austénite au cours du chauffage.

**Ac3** : Température.

**A1** : Angle d'ouverture totale du chanfrein.

**Rm** : Limite d'élasticité.

**Rp 0, 2** : Limite d'élasticité conventionnelle.

**HV10** : Dureté de Vickers.

**$\alpha$** : Ferrite.

**$\gamma$**  : Austénite.

**A%** : Allongement.

**Hs** : La distance entre la soudure et la rupture.

**SE** : Soudage extérieur.

**SI** : Soudage intérieur.

**Rp**: Résistance de corrosion.

INTRODUCTION

GENERALE

### Introduction générale

Les matériaux durs occupent une place prépondérante dans le processus de traitement des matériaux dans les industries minières, métallurgiques et autres. Ils sont souvent sollicités pour la confection des pièces maîtresses des concasseurs et broyeurs industriels de tout genre. Parmi ces aciers, on retrouve les 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, Parce qu'il est considéré un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très important en vue d'améliorer son efficacité.

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.

La soudure nécessite un apport d'énergie. Cette énergie peut être d'ordre chimique par combustion de gaz, ou physique telles que l'arc électrique ou la radiation (faisceau d'électrons ou faisceau Laser). Cette énergie peut également être d'origine mécanique (soudage par friction). Les techniques qui en découlent sont très diversifiées et sont adaptés à la situation du terrain. Les cordons de soudure sont systématiquement contrôlés par des tests dits non destructifs pour rechercher des défauts éventuels tels que les fissures, les cavités ou les inclusions non métalliques. Les tests dits destructifs sont pratiqués pour évaluer la conformité des propriétés de la soudure avec les normes en vigueur. Souvent, les imperfections du cordon se manifestent en service (rupture fragile, corrosion...). L'origine de ces ruptures sont dû à la présence de phases indésirables soit dans le métal fondu, soit dans le métal avoisinant, soit les deux zones. Ces défauts sont systématiquement répertoriés et classés pour servir, selon les normes, à la définition des critères d'acceptabilité des défauts présents dans une soudure.

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations Combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi.

Parmi la vaste gamme d'aciers de pipeline, l'acier X60, objet de notre étude, a été largement utilisé dans le transport du pétrole brut et du gaz naturel sur de longues distances et sous haute pression. Par conséquent, il doit présenter une bonne ténacité même à basse température. Il est à noter que les opérations de réparation par soudage induisent plusieurs cycles thermiques, générant ainsi une variation dans l'étendue de la zone affectée thermiquement (ZAT) et affectent sa microstructure, ainsi que sa tenue mécanique.

Dans ce travail, nous nous efforçons d'améliorer et/ou de réparer la zone affectée thermiquement ZAT en utilisant le traitement thermique.

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

- ❖ Microscopie optique.
- ❖ Mesure de micro dureté.
- ❖ Diffraction de rayons X.

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

Le premier chapitre est réservé aux généralités sur les aciers.

Le deuxième chapitre traite les différents 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 dû qui permettent de varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers à la présence d'une vaste gamme de transformation en recourant à l'addition d'éléments d'alliage et aux différents mécanismes, thermiques et chimiques [1].

## I.2 Définition de l'acier

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone) [2]. C'est un matériau usuel, présentant la plus grande résistance pour la faible section [3].

## I.3 Classification des aciers

Du fait de nombre élevé éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser trois familles d'acier :

- Les aciers non alliés (« Aciers au carbone »).
- Les aciers alliés.

### I.3.1 Aciers non alliés (« Aciers au carbone »)

#### I.3.1.1 Aciers non alliés d'usage général (S, E, et C)

Les nouvelles normes européennes définissent les aciers suivant deux désignations :

- 1<sup>o</sup> partie : une désignation symbolique par une lettre ou plusieurs lettres.
- 2<sup>o</sup> partie : un nombre (en général, il s'agit de la limite d'élasticité).

\* **B** il s'agit d'acier à béton. Le nombre à trois chiffres qui suit cette lettre indique la valeur minimale de la limite d'élasticité (en N/mm<sup>2</sup>).

\* **E** il s'agit d'un acier de construction mécanique + limite d'élasticité.

\* **H** acier à haute résistance + limite d'élasticité.

\* **L** tube de conduites + limite d'élasticité.

\* **S** de construction + limite d'élasticité.

Lorsqu'il s'agit d'acier moulé, on précède la désignation de la lettre G.

Exemple d'aciers non alliés d'usage général :

- \* **S185**, Re = 185 Mpa.
- \* **E295**, Re = 295 Mpa.
- \* **GE295** acier moulé, Re = 295 Mpa.

### **.I.3.1.2 Aciers spéciaux, non alliés, de type C**

Fait référence à la composition chimique de l'acier ; il s'agit d'un acier non allié ; le nombre de deux ou trois chiffres qui suit indique la teneur moyenne en carbone multipliée par 100.

Ce nombre peut être suivi de symboles additionnels.

S'il s'agit d'un acier moulé, on précède la désignation de la lettre G [4].

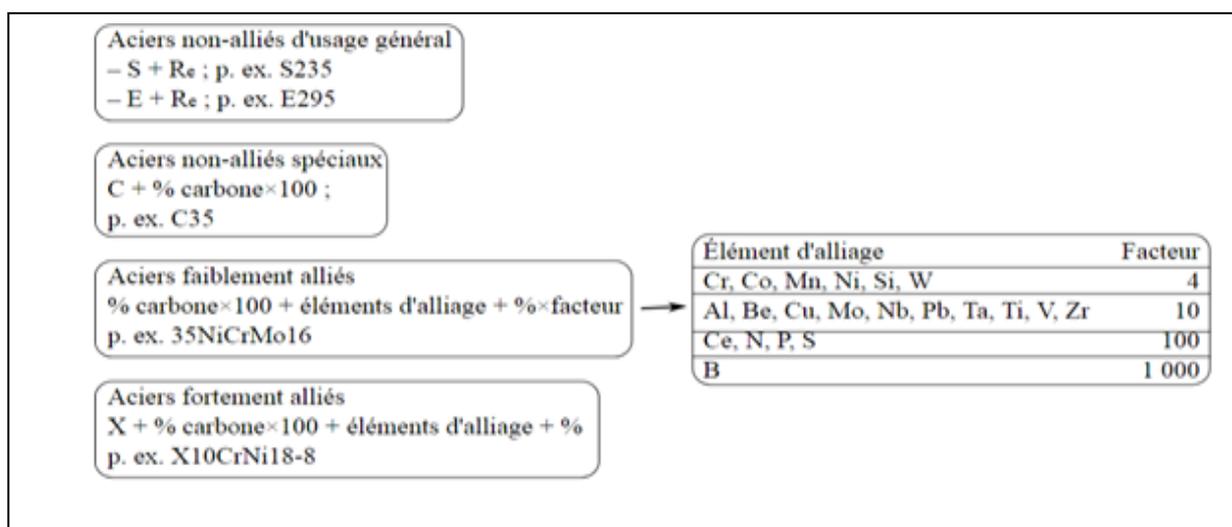
- ◆ Exemple d'aciers non alliés spéciaux :
- \* **C45** : acier non allié comportant un taux de 0,45 % de carbone.
- \* **GC22** : acier moulé non allié comportant un taux de 0,22% de carbone.

## **I.3.2 Aciers alliés**

### **I.3.2.1 Aciers faiblement alliés**

Aucun élément d'addition ne dépasse 5%. La désignation reprend la teneur en carbone, multipliée par 100, suivie des éléments d'addition et leur pourcentage respectif multiplié par un facteur spécifique (4, 10, 100 ou 1000 - voir tableau ci-contre) [4].

- ◆ Exemple d'acier faiblement allié l'acier 35NiCrMo16 contient 0,35% de carbone, 4% de nickel, du Chrome et du Molybdène en faible teneur.



**Figure I.1 : Principes de désignation symbolique des aciers selon la norme EN10027-1-2 [5].**

### I.3.2.2 Aciers fortement alliés x

Il s'agit d'un acier avec un ou plusieurs éléments d'addition dont la teneur atteint au moins 5%. La lettre X est suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100, puis de la désignation des éléments d'addition et leur pourcentage respectif sans facteur multiplicateur [4].

- ◆ Exemple d'acier fortement allié l'acier X2CrNi 18-9 contient 0,02% de carbone, 18% de Chrome et 9% de Nickel

## I.4 Les composants des aciers

Les constituants les plus importants sont le Fer et le Carbone, et les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories :

**I.4.1 Les impuretés :** Originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présent dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb).

**I.4.2 Les éléments d'additions :** Les éléments chimiques peuvent être ajoutés pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

**I.4.3 Les éléments d'accompagnements** : Que l'aciériste utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium [6].

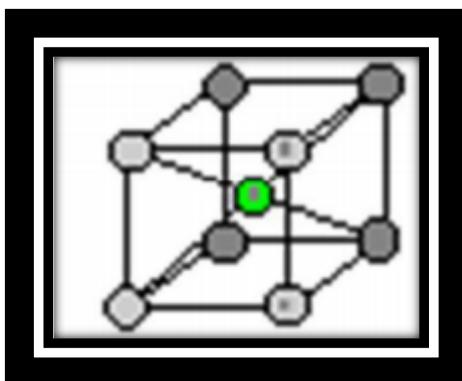
## I.5 Propriétés générales de l'alliage fer-carbone

Les aciers et les fontes sont les alliages du fer et du carbone avec éventuellement des éléments d'addition (aciers alliés). Ils sont peu coûteux (le fer, métal de base le moins cher, existe en grande quantité sur la planète) et sont facilement recyclable [7].

### I.5.1 Fer

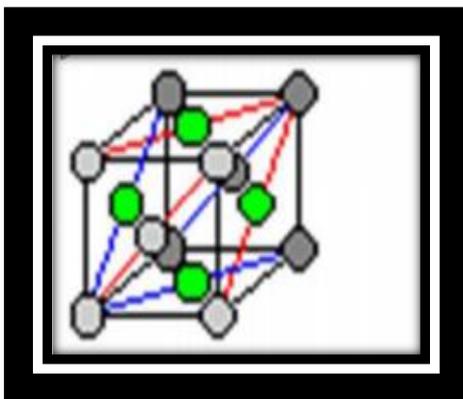
Le fer perd ses propriétés magnétiques au-dessus de 768 °C, point de Curie, et existe sous plusieurs formes en fonction de la température (densité 7,88) (figure I.4) :

- **Fer  $\alpha$  (alpha)** : Il existe jusqu'à 912 °C. De structure cristalline à maille cubique centrée (figure I-2) il ne dissout pratiquement pas le carbone (0,022 %C à 727 °C, 0,008 %C à température ambiante). La solution fer  $\alpha$  s'appelle la ferrite.



**Figure I.2** : Structure cristalline cubique centrée [8].

- **Fer  $\gamma$  (gamma)** : Il est stable entre 912 °C et 1394 °C de maille cubique à faces centrées (figure I-3), il peut absorber, ou « dissoudre », beaucoup plus d'atomes de carbone que le fer  $\alpha$  car les interstices sont plus nombreux entre les atomes. La proportion maximale est de 2,11 % à 1148 °C. La solution fer  $\gamma$  s'appelle l'austénite.



**Figure I.3 :** Structure cristalline cubique à face centrée [8].

- **Fer  $\delta$  (delta)** : Il est stable entre 1394 °C et 1538 °C ; de maille cubique centrée (figure I-2), il a peu d'importance sur le plan industriel.

### I.5.2 Carbone

Il fond à 3500 °C et cristallise sous trois formes possibles : le graphite, le diamant et le noir de fumée. C'est un élément essentiel pour durcir l'acier. Au-delà de 0,6% de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par de hauts niveaux de dureté. L'augmentation progressive de la teneur en carbone conduit à une réduction des domaines de température correspondant à la transformation à chaud et au traitement thermique.

### I.6 Diagramme fer-carbone

Le carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés mécaniques des aciers : au-dessous de 0.008 %, l'alliage est malléable et c'est pratiquement de fer pur au-delà de 2.11 %, les inclusions de carbone sont sous forme de graphite fragilisent la microstructure et on parle de fontes. L'augmentions de la teneur en carbone à tendance à améliorer la résistance mécanique de l'alliage.

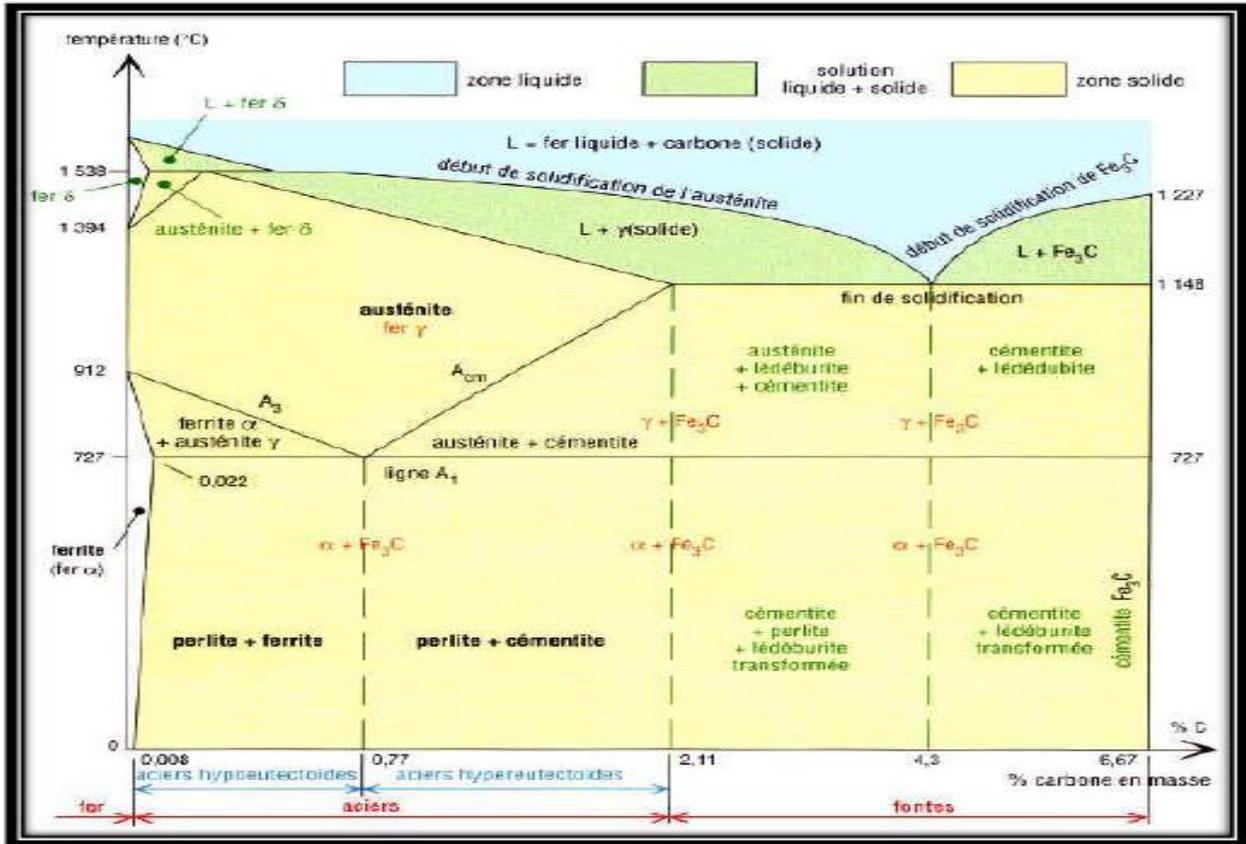


Figure I.4 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [9].

Alliés avec le fer, les atomes de carbone remplissent plus ou moins les interstices, ou les vides, laissés entre les atomes de fer de chaque maille. Les caractéristiques de la structure de base sont modifiées, le fer devient acier ou fonte avec de meilleures propriétés. Sous certaines conditions d'équilibre, le carbone peut s'amalgame, sans dissolution, au fer pour former du carbure Fe<sub>3</sub>C ou cémentite qui contient 6,67 %C, pourcentage maximal d'absorption. Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite (6,67 %C, matériau fragile, cassant, très dur) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux les aciers (entre 0,008 et 2,1 %C) et les fontes (de 2,1 % à 6,67 %C).

**Ligne A1 (727 °C) :** elle marque la fin de la transformation de la perlite, mixture de fer contenant 0,77 %C, en austénite ; au-dessus de 727 °C la perlite n'existe plus.

**Ligne A3 :** elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite la ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne

**Ligne Acmé** : elle indique la fin de la dissolution, après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe [10].

**a.** La ferrite  $\alpha$  : Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\alpha$ , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre ( $HB \approx 80$ ), peu tenace ( $R \approx 300$  Mpa), mais très ductile ( $A \approx 35\%$ ).

**b.** La ferrite  $\delta$  : Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer  $\delta$ . Sa structure est cubique centrée CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

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

**d.** La cémentite (Carbone de fer  $Fe_3C$ ) : La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite. Elle est très dure et très fragile.

**e.** La perlite : Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.77 %C, La perlite est dure ( $HB \approx 200$ ), résistante ( $R_m \approx 850$  Mpa) et assez ductile ( $A \approx 10$ ) [11].

### I.6.1 Acier eutectoïde (0,77 %C)

Toute l'austénite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant 0,77 %C.

### I.6.2 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)

Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial.

### I.6.3 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C)

Ils ont deux constituants de base, la perlite et la cémentite. Tout le carbone initial ne pouvant être dissous et consommé par la perlite, les atomes restants s'amalgament avec le fer pour

former de la cémentite, dans des proportions qui sont fonction du pourcentage de carbone initial [10].

## I.7 Traitement thermique des aciers

### I.7.1 Définition

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux. Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement) [12-13].

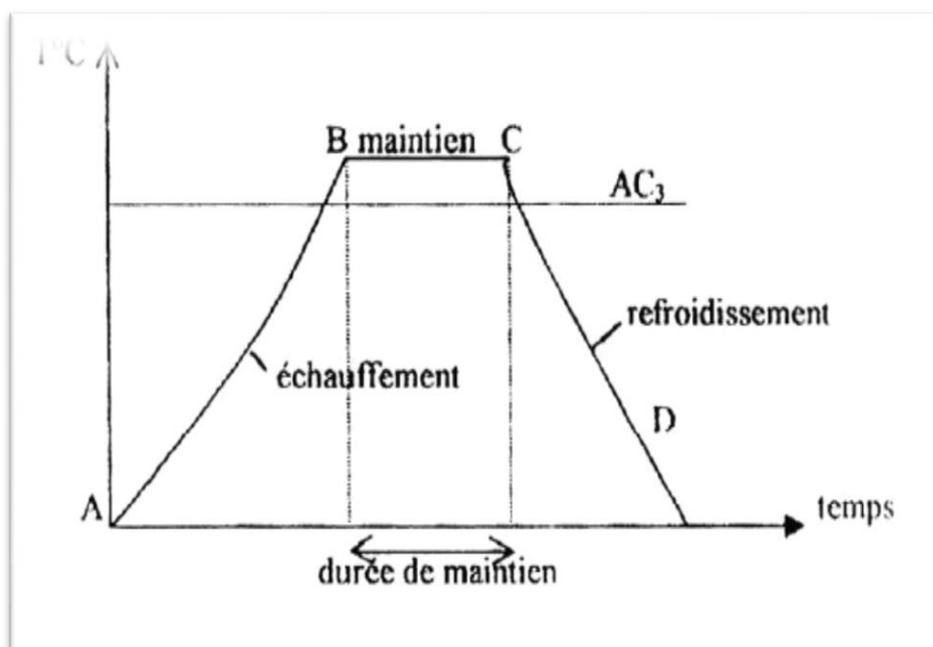


Figure I.5 : Cycle thermique de traitement [12].

### ❖ Cycle thermique de traitement

- \* **Chauffage (AB)** : L'échauffement est effectué à une température supérieure à la température de transformation.
- \* **Le maintien(BC)** : pour le maintien, la température est définie( $T = \text{constante}$ ).
- \* **Le refroidissement(CD)** : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).

### I.7.2 But de traitement

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but : d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir de l'augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ , et l'allongement  $A\%$  en donnant une meilleure tenue de l'élément, et de l'augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs ; de régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage ; de supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage) [12].

### I.7.3 Les principaux types de traitement thermique

#### I.7.3.1 Trempe

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer  $\alpha \rightarrow$  fer  $\gamma$  (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale [14].

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénites et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La trempe est un traitement thermique consistant à augmenter la dureté d'une pièce. Il faut chauffer l'acier à une température correspondante à son point de transformation puis à la refroidir plus ou

moins brusquement afin de lui permettre de conserver à froid la structure particulière obtenue à haute température [15].

### I.7.3.2 Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité.

L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe.

La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation [15].

#### I.7.3.2. 1 Les types de revenu

##### a. Revenu à basse température

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage vers 250°C et permet de diminuer les contraintes internes. Il transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers au carbone et faiblement alliés. La durée de ce revenu varie de 1 à 3 heures.

##### b. Revenu à température intermédiaire

Le revenu à température intermédiaire se réalise entre 350 et 500°C et s'emploie pour les ressorts variés et les estampes. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type troostite de revenu ou troostite - martensite dont les duretés varient de 40 à 50 HRC. Le refroidissement après revenu à 400 ou 450°C se fait à l'eau, ce qui contribue à

la formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.

### c. Revenu à haute température

Le revenu à haute température se fait entre 500 et 680°C, il donne à l'acier la structure sorite de revenu. Ce type de revenu crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) améliore, par rapport à l'état normalisé, ou recuit, les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience. L'amélioration est appliquée surtout aux aciers de construction à moyen carbone (0,3 à 0,5%) [12].

#### I.7.3.3 Recuit

Le recuit est un traitement qui a tendance à rapprocher l'acier de son état d'équilibre sur le plan physico chimique. Il a pour but de réduire les contraintes internes dans le métal. Ces contraintes peuvent provenir d'un laminage, d'un étirage, d'un soudage ou d'un autre traitement thermique (trempe, revenu). Le recuit permet de rendre l'acier plus mou, donc plus facile à usiner. Le cycle opératoire du recuit comprend les étapes suivantes :

1. Chauffage jusqu'à une température dite de recuit (qui dépend du type de recuit).
2. Maintient isotherme à la température de recuit ou à des oscillations autour de cette température.
3. Un refroidissement très lent (à l'air calme).

Le recuit augmente le taux de cristallinité, le module d'élasticité, la dureté, la masse volumique et la résistance à l'abrasion mais il diminue la résistance au choc et l'allongement à la rupture [16].

# **CHAPITRE II**

## **Procédés 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 [14].

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 [15].

## II.2 Procédés de soudage

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...)[16].

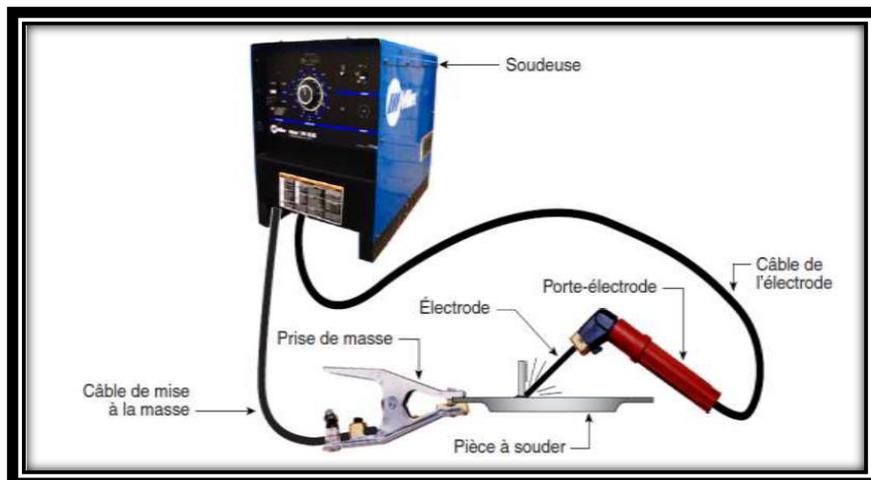
### II.2.1 Principe du soudage à l'Arc et notion d'électricité

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 :

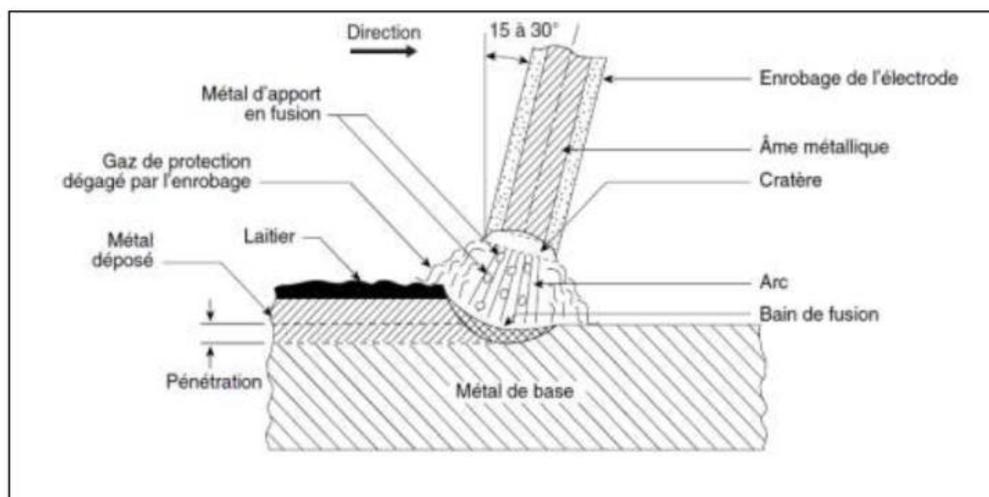
- récipients et tuyaux sous pression ;
- réservoirs de stockage ;
- ponts et bâtiments ;
- navires et wagons.



**Figure II.1 :** Circuit électrique pour le soudage à l'arc [16].

### 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).



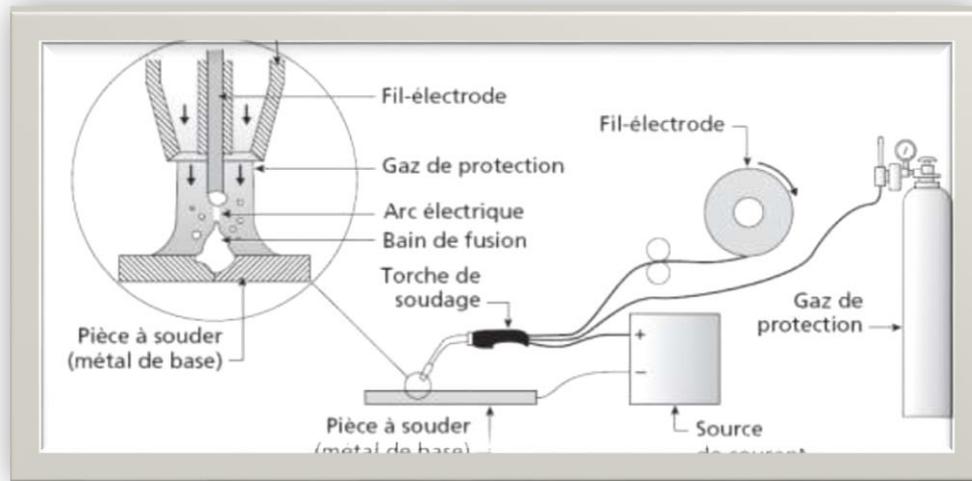
**Figure II.2** : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée [17].

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 ( 3982 à 5537 °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 [17].

### 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 II.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 [18].

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 (Métal Inerte Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium).
2. Le procédé MAG (Métal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif [18].

### II.2.1.2 .1 Les procédés 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 inerte (le procédé se dénomme alors M.I.G = métal inerte 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 torche ;
- La torche ou pistolet [19].

### ❖ 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 [19].

#### II.2.1.2 .2 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.

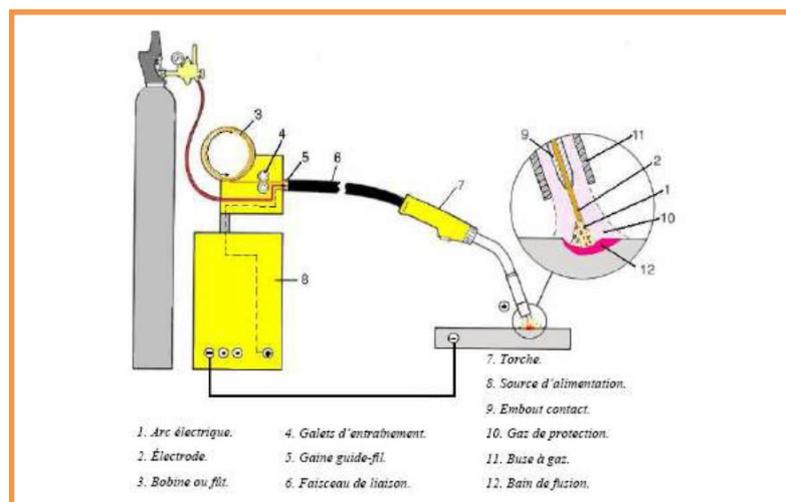


Figure II.4:Principes du procédé de soudage MIG/MAG [18].

### ❖ 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 protections anticorrosion (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].

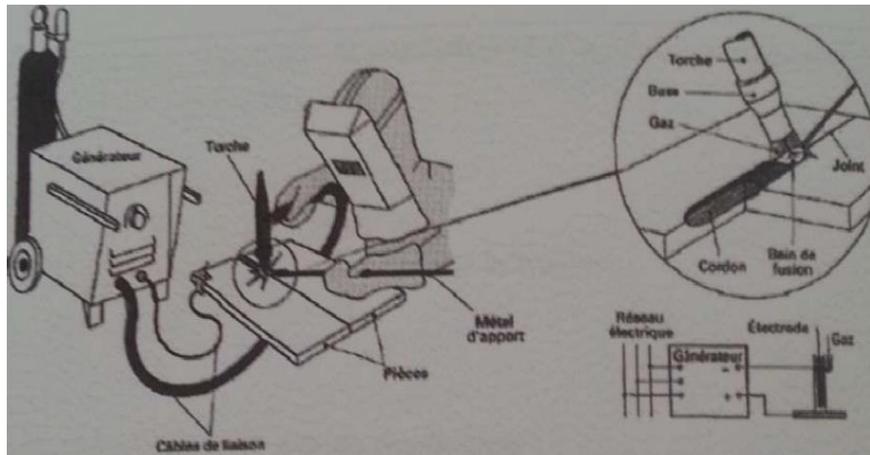
#### II.2.1.3 Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG

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.

##### II.2.1.3.1 Principe et mise en œuvre du procédé

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène 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.5). 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.



**Figure II.5 :** Schéma du procédé TIG [19].

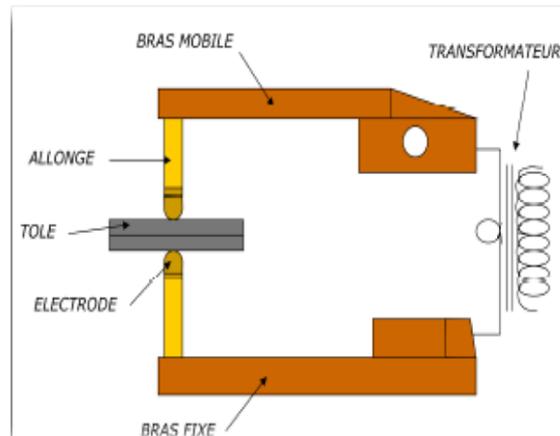
#### ❖ Les gaz de protection en TIG

Les gaz 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 peut tirer 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 [19].

## II.3 Le Soudage par point (RSW)

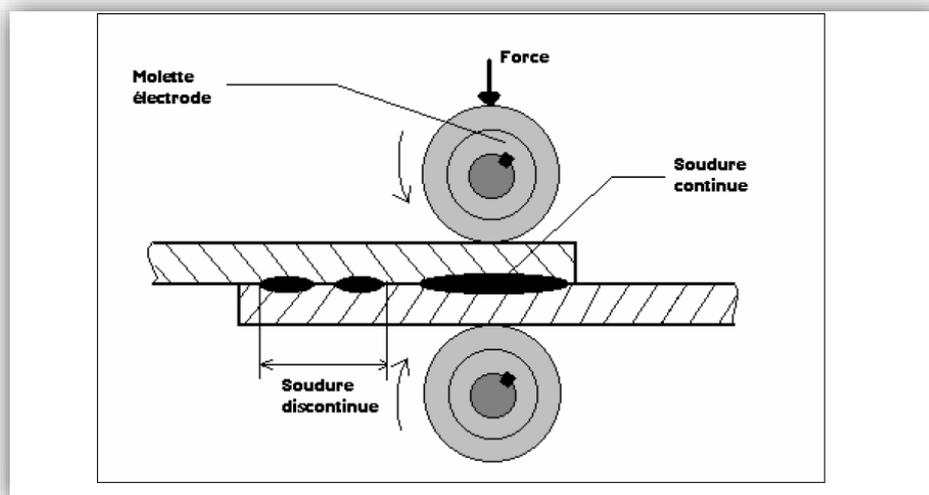
### II.3.1 Définition :

Dans ce procédé, la soudure résulte à la fois de la chaleur générée par le passage d'un courant électrique (effet Joule) et de la pression exercée aux points de contact des électrodes. Ces électrodes sont en général constituées de cuivre ou d'un alliage de cuivre et de béryllium. Aucun métal d'apport ou flux n'est utilisé.



**Figure II.6 :** Mécanisme du soudage par point [21].

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide.



**Figure II.7 :** Principe du soudage par molette [22].

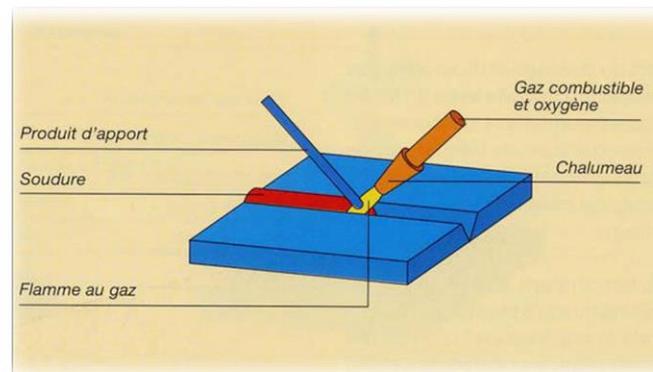
### II.3 .2 Applications :

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc... [23].

## II.4 Soudage oxygaz

### II.4 .1 Définition :

Dans ce procédé, le soudage utilise la chaleur de combustion d'un gaz combustible (principalement acétylène ou propane) mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant (O<sub>2</sub>). Le poste de soudage à la flamme comporte des bouteilles de gaz, des détendeurs, des tuyaux flexibles, chalumeau et l'électrode d'appoint introduite à la main.



**Figure II.8** : Principe du soudage oxygaz [22].

### II.4 .2 Application :

Travaux de réparation ou pour souder de la tôle légère.

## II.5 Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE)

Apparait en 1958, il relève avec le soudage laser, de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie. Grâce à l'utilisation de très hautes températures, il permet une pénétration étroite et profonde. Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vidé pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.

## II.6 Le soudage (et le coupage) laser

A des caractéristiques idéales à plus d'un titre Le faisceau laser permet une conduite plus concentrée de la chaleur, des déformations très faibles et de très grandes vitesses de soudage.

Malheureusement, un laser puissant est encombrant et couteux, et il faut trouver le moyen d'amener le faisceau lumineux jusqu'au point de soudure. Pour y parvenir, un système de miroirs réfléchit le faisceau dans les lasers CO<sub>2</sub>, et le rayon peut être transmis par fibre optique dans les lasers YAG, ce qui fait de ces derniers l'instrument idéal pour les robots soudeurs.

## II.7 Le soudage par friction-malaxage

A été brevète par TWI en 1992 .Le procédé est parfaitement adapte a l'aluminium et donne un joint de bonne qualité sans fusion. Il n'exige pas de matériau d'apport, consomme peu d'énergie et a un faible impact environnemental. Sa simplicité et son efficacité en font l'une des plus brillantes innovations du XXe siècle dans le domaine du soudage [23].

## II.8 Les différentes zones d'un assemblage soudé

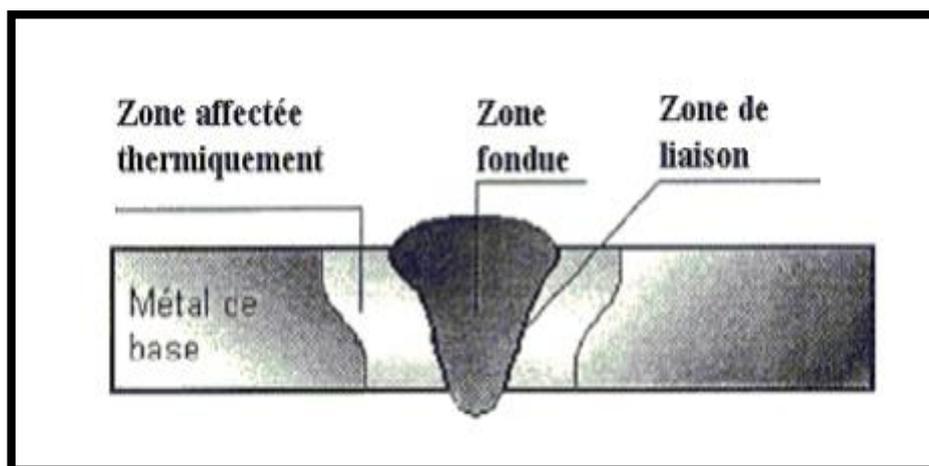


Figure II.9 : Cordon de soudure [24].

### II.8.1 La zone fondue (nommée ZF)

La zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus chaude vers la moins. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

### II.8.2 La zone affectée thermiquement : (nommée ZAT)

La zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

### II.8.3 La zone de liaison

Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et le zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

### II.8.4 Le métal de base

Le métal de base, est la partie l'assemblage et son emplacement au-delà de la zone affectée thermiquement. Cette zone est aussi dite non affectée de chaleur [25].

## II.9 Les défauts de soudures

La majeure partie des discontinuités se produisent dans les joints ou dans la ZAT, les soudures comportent des porosités, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures. Parmi ces trois défauts, les fissures sont de loin les plus déterminantes. S'il y a des limites acceptables pour les inclusions et les porosités, les fissures restent inadmissibles.

### II.9.1 Les inclusions gazeuses

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes (Figure II.10).

- a) Porosités vermiculaires.
- b) Porosités uniformes

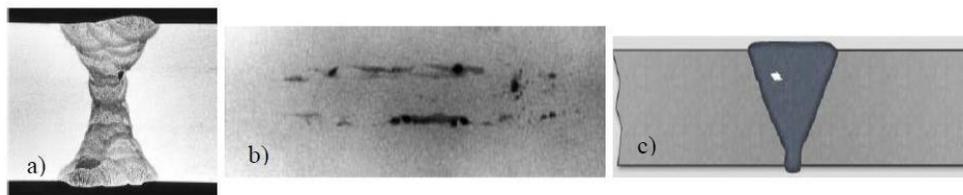


**Figure II.10 :** Inclusions gazeuse.

### II.9.2 Inclusion solides

Des inclusions solides peuvent être de trois types différents (Figure II. 11) :

- a) Laitier.
- b) Tungstène.
- c) Cuivre.



**Figure II.11 :** Inclusions de : a) laitier, b) tungstène, c) cuivre.

### II.9.3 Les fissure

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. La figure résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas:

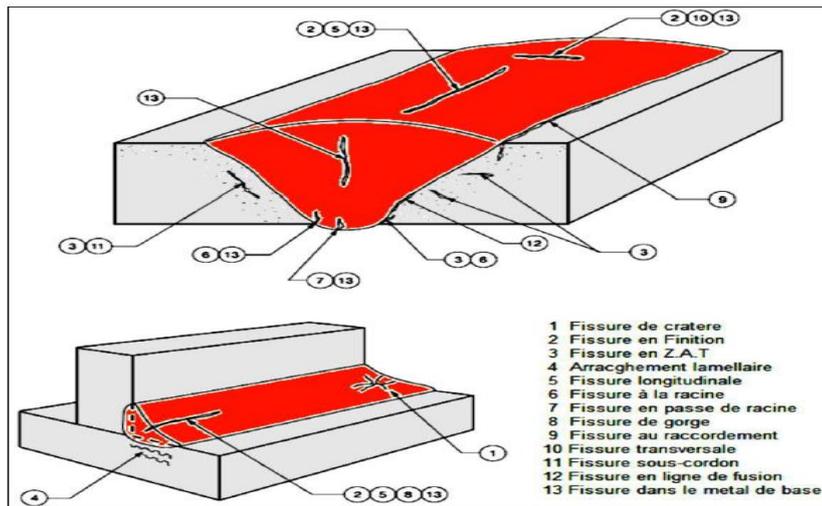


Figure II.12 : Les types de fissure.

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

- Sillons aux caniveaux et morsures en surface,
- Retassures de cratère,
- Manque de fusion,
- Manque de pénétration,
- Excès de pénétration (Excès de matière),
- Recouvrements non fusionnés (Débordements),
- Dénivellement,
- Effondrement à la racine,
- Projections sur le métal de base.

## II.10 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.10.1 contrôle visuel

L'examen visuel est le plus simple et le premier des contrôles devant être mise en œuvre. Il permet de déceler les défauts de formes aux autres défauts débouchant en surface des joints soudés. L'inspection est faite sous un niveau d'éclairage d'au moins de 350 lux.

### II.10.2 Contrôle par radiographie

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergeant de la pièce engendrent sur le film une « image latente » qui sera ensuite révélée par voie chimique.

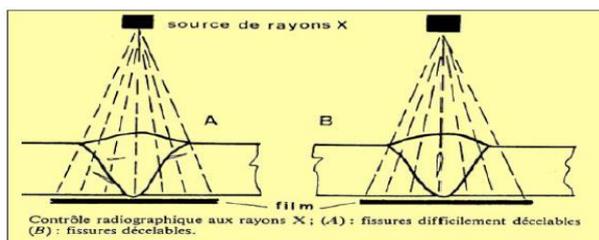


Figure II.13 : CND Radiographies [27].

### II.10.3 Contrôles par magnétoscopie

Aussi appelé « examen par aimantation », ce procédé ne s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques : les aciers (sauf austénitiques), les fontes, le nickel, le cobalt. La magnétoscopie permet de déceler les défauts débouchant à la surface du cordon de soudure, voire même légèrement sous-jacent.

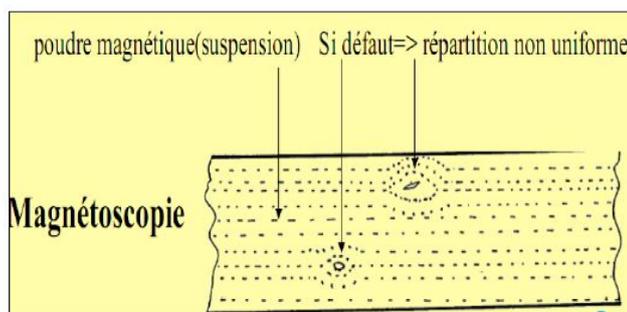


Figure II.14 : Magnétoscopie [27].

### II.10.4 Epreuve hydrostatique

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test non destructif final [27].

### II.10.5 Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatatique)

Le contrôle aux ultrasons est réalisé sur le cordon de soudure, le métal de base et les extrémités du tube afin de détecter tout défaut.

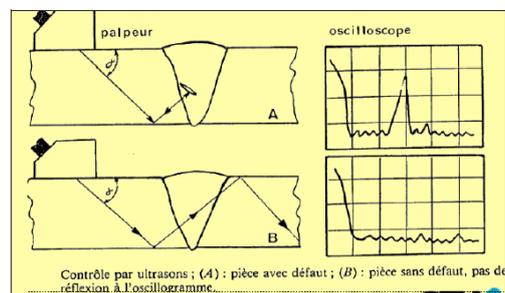


Figure II.15 : Ultrason [27].

### II.10.6 Contrôle final

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube [27].

**CHAPITRE III**  
**MATERIAU ET**  
**METHODES**  
**EXPERIMENTALES**

---

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons le matériau étudié et les différentes techniques expérimentales utilisées pour notre étude.

### III.2 l'acier d'étude

L'acier étudié est un acier micro allié de norme API 5L X 60 utilisé généralement pour la construction des pipelines d'hydrocarbures (gazoduc et oléoduc).

Cet acier (API 5L X60) est désigné par sa limite élastique.

- API 5L signifie : pipeline.
- X60 signifie : le grade de l'acier. Les autres grades sont, par exemple, A, B, X42, X52
- Le chiffre 60 signifie : 60000 psi, c'est la limite élastique de l'acier en psi « pound per Square inch » [31].

A partir de la certification d'analyse, l'acier contient les éléments suivants :

Elément	C%	Si%	Mn%	P%	Cr%	Mo%	Ni%	S%	V%
<b>X60</b>	0.07	0.90	1.71	0.008	0.04	<0.01	0.03	0.013	<0.01
Elément	Al%	Ti%	Zr%	Cu%	N%				
<b>X60</b>	<0.01	0.02	<0.01	0.10	0.004				

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier X60 étudié [32].

### III.3 Méthodes expérimentales utilisées

#### III.3.1 Traitement thermique

Pour mettre en évidence les différentes transformations de phases à l'état solide, dans nos aciers, on a opté pour les traitements thermiques suivants :

- Chauffage pendant 30 secondes à ( $T = 900, 1000, 1200^{\circ}\text{C}$ ). Les températures sont choisies à partir du diagramme d'équilibre.

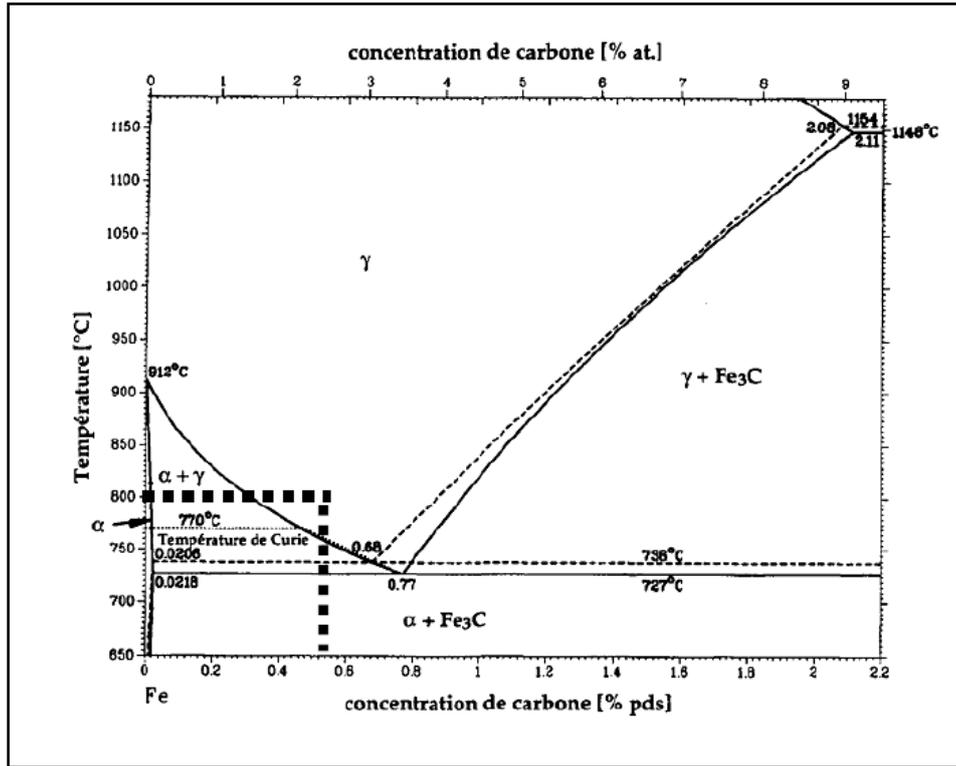


Figure III.1 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [33].

Pour ces traitements thermiques : on utilise un four électrique à température maximale  $T_{max} = 1400\text{ °C}$  (Figure. III.2).



Figure III.2 : four électrique.

### III.3.2 Micrographie

Le but essentiel de la micrographie est la connaître de la structure et la principale modification après le traitement thermique. Après le découpage d'échantillons on doit suivre les étapes suivantes :

#### III.3.2.1 Polissage

L'étude de la microstructure nécessite des surfaces bien polies, de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner l'examen micrographique. Pour cela ; les échantillons sont polis mécaniquement sur papiers abrasifs (du numéro 120, 320, 600, 800, 1000,1200) ; puis à la pâte diamantée de granulométrie  $0.5\mu\text{m}$ . Après chaque polissage ; les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés, les surfaces sont ensuite attaquées chimiquement.



**Figure III.3** : Une Polisseuse.

#### III.3.2.2 Attaque chimique

Pour relevé la structure de nos échantillons, nous avons attaqué chimiquement la surface Polie par le Nital 4%) de composition :

- 4 ml d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ .

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

-La durée d'attaque est 15 secondes.

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

### III.3.2.3 Microscopie optique (MO) :

Le microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons durant les différents traitements thermiques. Pour notre étude, on a utilisé une microscopie optique de type Hund.



Figure III.4 : Microscope optique de type Hund.

### III.3.3 Mesure de micro dureté

L'essai de dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement Structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau. Il existe trois principaux type d'essais de dureté, qui diffèrent essentiellement par la forme de la pénétration : l'essai Brinell, l'essai Vickers et l'essai Rockwell. Pour notre étude, nous avons utilisé pour les mesures de la dureté une machine microduromètre Vickers de marque Zwick roell indentec (figure III.5).



**Figure III.5:** Micro dureté utilisé est de marque Zwick roell indentec.

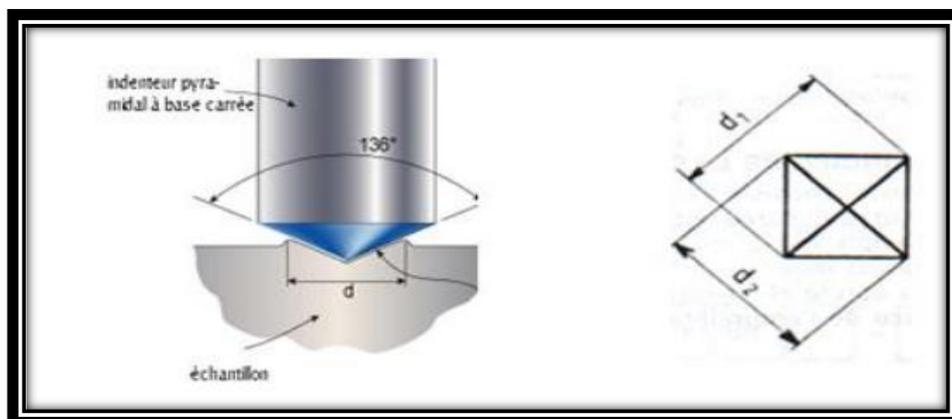
Les essais de dureté consistent à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de Pyramide (Vickers) et à mesurer la diagonale  $d$  de l'empreinte laissée considérée comme une pyramide droite et on relie cette information à la charge appliquée par la formule :

$$HV = 0.189 F / d^2$$

Où :

$F$  : la charge appliquée.

$d$  : la diagonale de l'empreinte ( $\mu\text{m}$ ).



**Figure III.6 :** Pénétrateur pyramidal.

### III.3.4 Diffraction par rayon X

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique.

Elle permet d'identifier la nature des phases cristallines présentes dans l'échantillon à analyser.

#### III.3.4.1 Principe de la DRX

Les corps cristallins sont considérés comme des assemblages de plans atomiques. Ces plans atomiques sont appelés « plans réticulaires » et les distances caractéristiques qui les séparent « distances inter réticulaires ». Généralement, ces distances sont notées ( $d$ ). Leur existence est à la base de la technique de diffraction des rayons X. Cette technique fournit des informations sur la structure cristalline des matériaux et permet ainsi de les caractériser. Par exemple, elle peut fournir des informations concernant leur texture et leur degré de cristallinité [34] [35].

Lorsqu'un matériau cristallin est irradié par un faisceau parallèle de rayons X monochromatiques, les plans atomiques qui le composent agissent comme un réseau à trois dimensions. Le faisceau de rayons X est alors diffracté suivant des angles spécifiques liés aux distances inter réticulaires. La théorie de la diffraction des rayons X a été élaborée par W .L. Bragg. Son principe et l'utilisation qu'on en fait aujourd'hui de façon standard, sont résumés dans la relation de Bragg.

#### La Loi de Bragg

$$2 d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

III-1

Où :

$n$  : 1,2,...ordre de la diffracté.

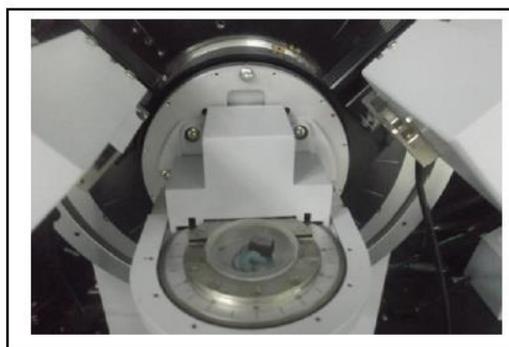
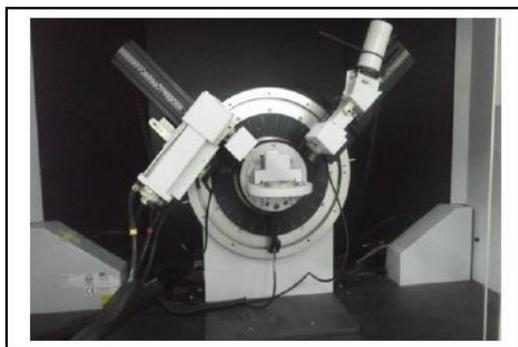
$\lambda$  : la longueur d'onde du faisceau diffracté.

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

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

### III.3.4.2 Exploitation des diffractogrammes

Le diffractogramme est un enregistrement de l'intensité diffractée en fonction de l'angle  $2\theta$  formé avec le faisceau direct. L'étude de diffractogrammes permet de remonter à un grand nombre d'informations sur les caractéristiques structurales de l'échantillon telles que les structures cristallines des différentes phases, la présence des précipités etc... Pour notre étude, on a utilisé un diffractomètre automatisé de type D8 Advance of Bruker AXS, lié à un micro-ordinateur pour enregistrer les diffractogrammes (**Figure III.7**).



**Figure III.7** : Diffractomètre des rayons X de type D8 Advanced of Bruker AXS.

**CHAPITRE IV**

**RESULTATS ET**

**INTERPRETATION**

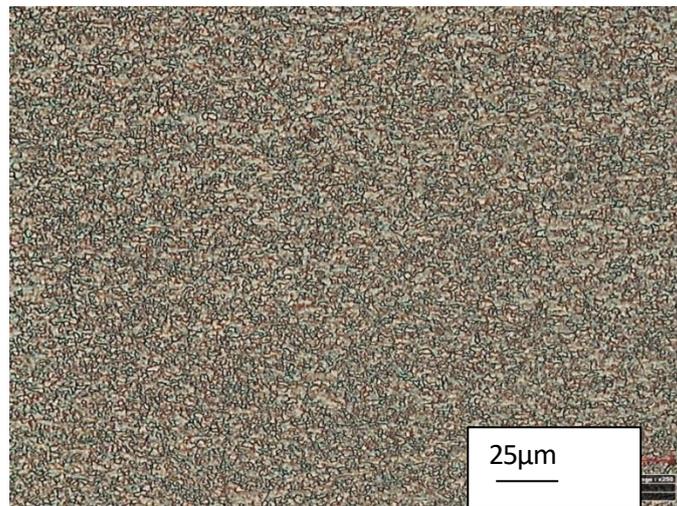
---

## IV.1. Etude micrographique :

### IV.1.1. Microstructure du métal de base

La (figure IV.1) présente la microstructure de métal de base à l'état brut, elle constituée globalement d'une structure ferrite-Perlitique ; ferrite (la zone claire) et la perlite (la zone en noire).

D'après l'observation microstructurale obtenues ci-dessous, on déduit que l'échantillon du métal de base est constitué par des fins grains de ferrite et faible fraction de phase Perlitique. Alors que, la phase dominante dans cet échantillon c'est la phase ferrite.



**Figure IV.1:** Microstructure de métal de base observé par microscope optique.

### IV.1.2 microstructure d'une ZAT (échantillon soudé)

La figure IV.2 illustre différentes microstructures d'une ZAT d'un acier X60 d'après un soudage à l'arc, elle constituée globalement d'une structure ferrite-perlitique, les microstructures (figure IV.2 a, b, c, d, et f) montrent que la ZAT se compose en plusieurs sub-zones. On peut remarquer que la taille des grains augmente au milieu de la pièce soudée (figure IV.3) d'où la taille elle diminue à l'extrémité.

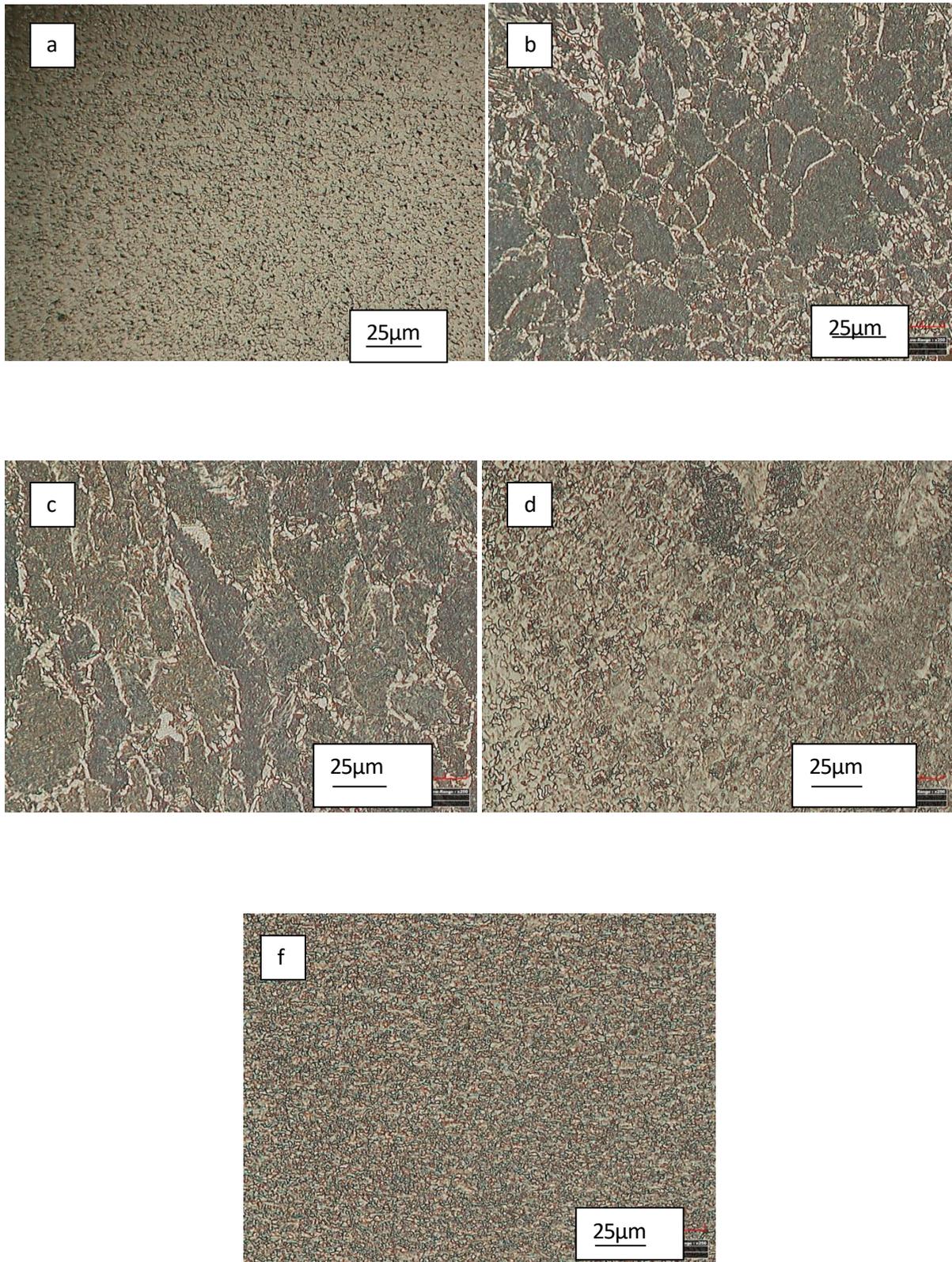


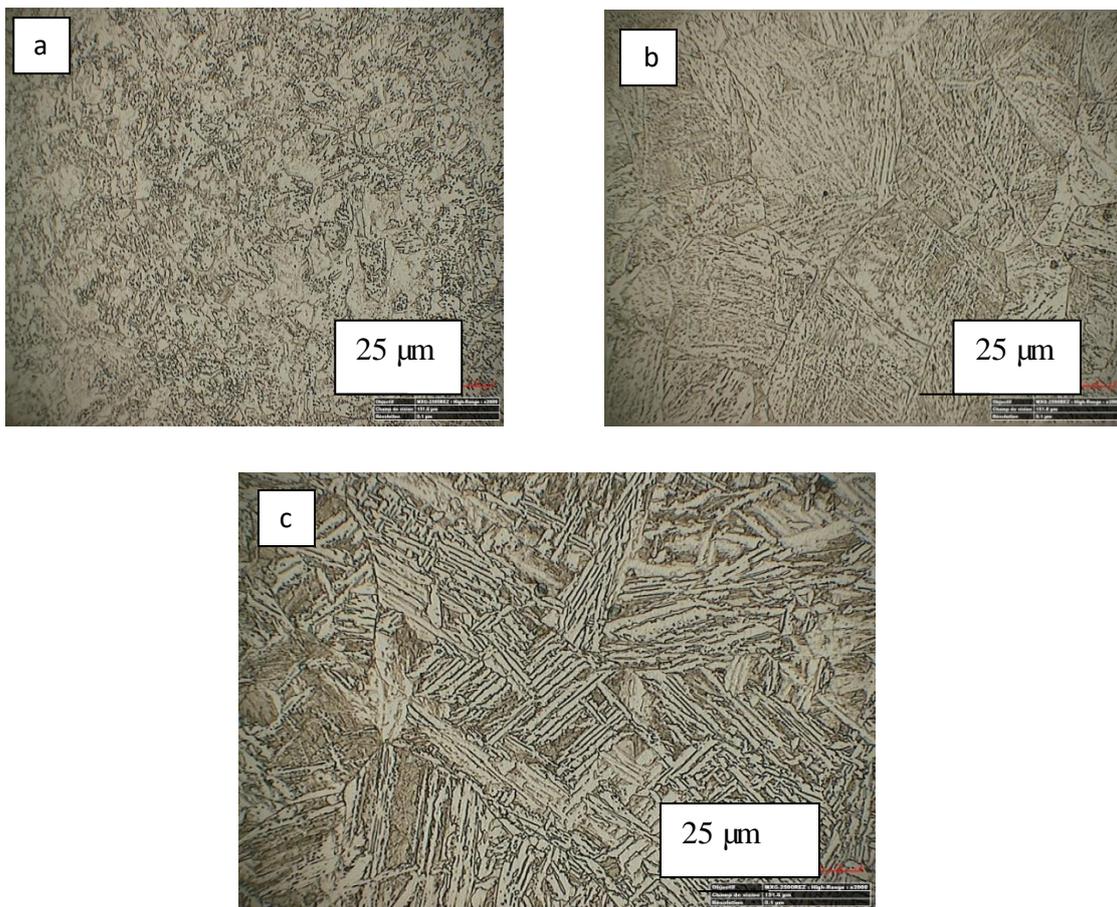
Figure IV.2 : Microstructure d'une ZAT (échantillon soudé) par microscope optique.



**Figure IV.3** : Acier X60soudé.

#### IV.1.3 microstructure des échantillons après traitement thermique

La figure IV.4 montre qu'il y a différentes morphologies, pour chaque température on trouve la formation de ferrite et de perlite dans les trois températures de traitement en plus une formation de Widmanstatten ferrite dans la figure .IV.4 b et c, et on peut remarquer aussi l'augmentation de la taille des grains.



**Figure IV.4** : Microstructure des échantillons après traitement thermique observé par microscope optique (900, 1000 et 1200°C).

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

Dans cette partie d'étude, nous avons essayé d'effectuer des analyses par diffraction des rayons X sur la surface complète dans les échantillons pour connaître la structure cristalline des grains.

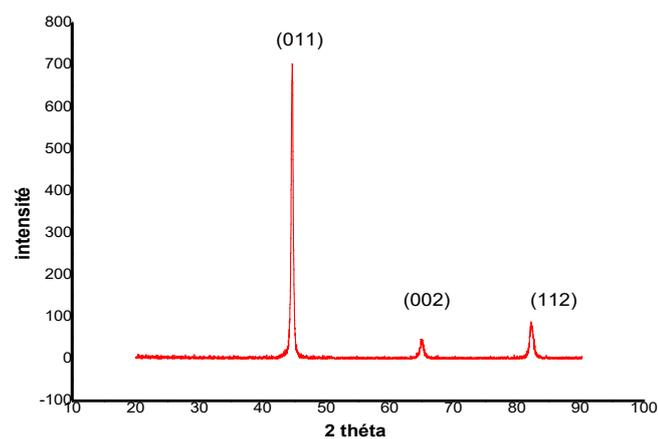
### IV.2.1. Etat brut

Le spectre de diffraction des rayons X (fig. IV.5) montrent que la microstructure de l'acier X60 est de Ferrite-Perlitique.

Ce résultat confirme le résultat obtenu par la microscopie optique, selon le programme [ICDD] nous avons le tableau suivant détaillé les caractérisations de chaque pic :

No.	Pos. [ $^{\circ}2\text{Th.}$ ]	(hkl)	d ( $\text{A}^{\circ}$ )	L'intensité (%)
1	44,663	(011)	2,02728	100,0
2	65,008	(002)	1,43350	13.6
3	82,314	112	1,17045	24.3

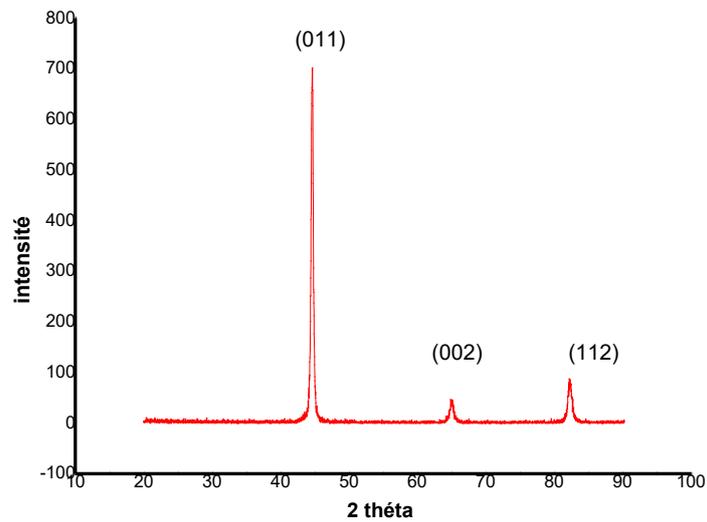
**Tableau IV.1:** Les caractéristiques des pics du l'acier a l'état brut [36].



**Figure IV.5 :** Spectre de diffractogrammes des rayons X d'un métal de base.

### IV.2.2. ZAT (échantillon soudé)

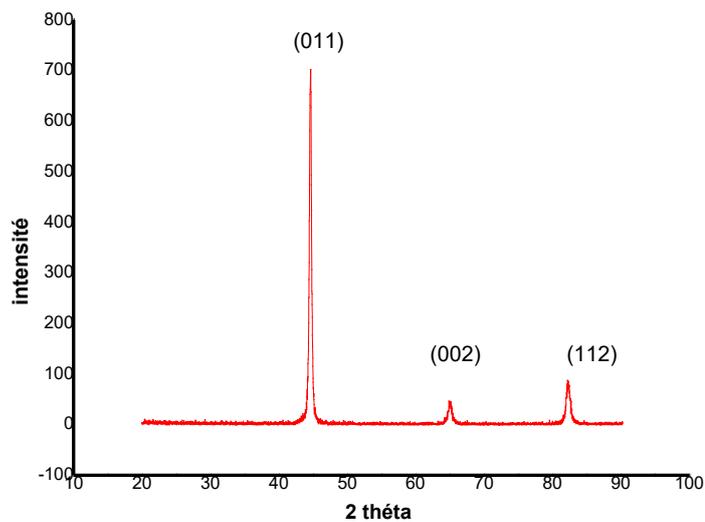
La figure IV. 6 montre que la ZAT comporte deux phase ; la ferrite et la perlite, ce résultat confirme le résultat obtenue par la microscopie optique, et on peut remarquer que la ZAT contient les même phases que le métal de base.

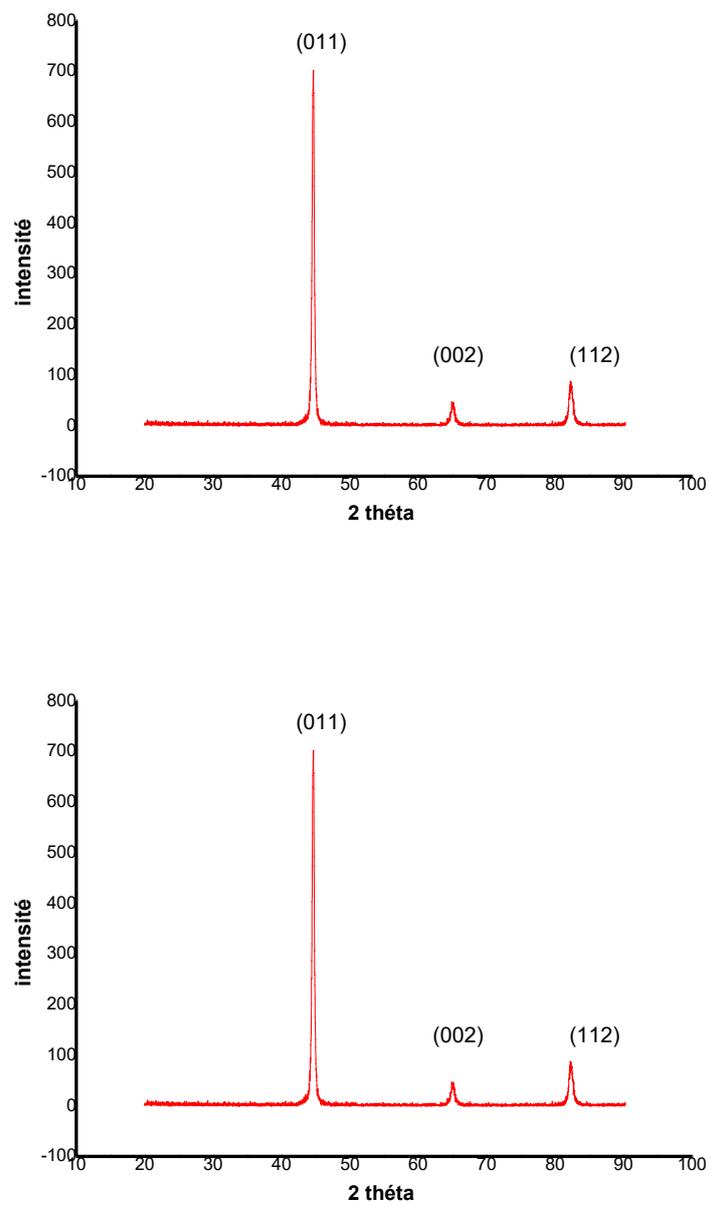


**Figure IV.6:** Spectre de diffractogrammes des rayons X d'une ZAT (échantillon soudé).

### IV.2.3. ZAT (après un traitement thermique)

Les phases formées (figure IV.7) sont les mêmes phases qu'un métal de base et la ZAT.





**Figure IV.7** : Spectre de diffractogrammes des rayons X des échantillons après traitement thermique ; a) 900, b) 1000 et c) 1200°C.

D'après les spectres de diffraction des rayons X on peut confirmer les résultats obtenus par le MO, il n'y pas formation des phases au cours de la soudure, les spectres montrent que la formation de la phase ferrite.

### IV.3. Mesure de la micro dureté :

Les résultats des mesures de la micro dureté des échantillons étudié (métal de base et après un traitement thermique) sont résumés dans le tableau suivant :

Echantillon	Métal de base	900°C	1000°C	1200°C
HV	209.18	215.6	281.66	250.86

Tableau IV.2: Les valeurs de la micro dureté.

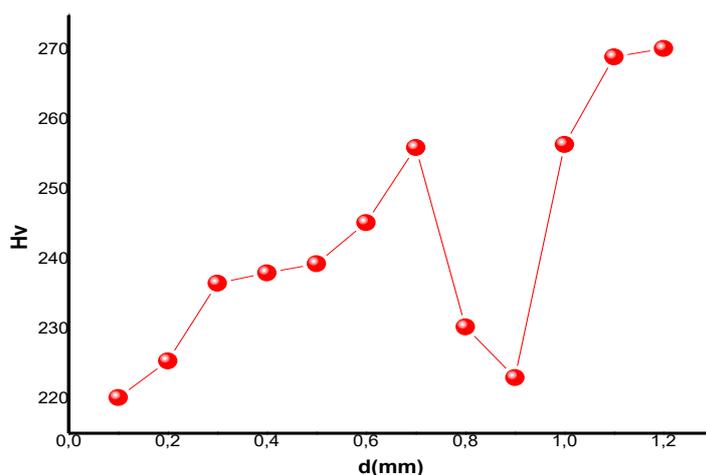


Figure IV.8 : micro dureté d'une ZAT d'un acier X60.

Par comparaison, la valeur de la micro dureté de l'échantillon à l'état brut est inférieure aux valeurs du ZAT (fig.IV.8) et des échantillons traités ; c'est l'effet de la température de soudage.

Les valeurs de la micro dureté des échantillons traités à différentes températures (900, 1000 et 1200°C pendant 30 s) montrent que la micro dureté de la ZAT d'un 'acier X60 se compose en différentes zones, chaque zone a son propre valeur de micro dureté, la température de la soudure change la morphologie des phases. Ces résultats confirment les résultats obtenus par microscopie optique. Et on peut remarquer aussi que la ZAT être très dure à une température de 1000°C.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier la zone affecté thermiquement ZAT d'un acier X60 d'après une soudure à l'arc en utilisant ; le microscope optique, la diffraction des rayons X et la microdureté comme technique de caractérisation, et on a essayé de simuler cette zone en utilisant un traitement thermique à 900, 1000 et 1200°C. Les résultats obtenus sont :

- L'étude métallographique montre que le métal de base (acier X60) et la ZAT comportent deux phases ; ferrite et perlite et un changement morphologique durant le traitement thermique ;
- la taille des grains augmente au milieu de la pièce soudée.
- Formation de Widmanstätten ferrite (ZAT).
- L'analyse par DRX confirme les résultats obtenus par le MO.
- Les mesures par micro uromètre montrent que la ZAT est dure par rapport au métal de base.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

- [1] G. BERANGER, «Génialité Dès L'acier», Epp. 22. Sollac. (1996).
- [2] Hazard et coll., Mémotech—Structures métalliques (Casteilla, 2000).
- [3] R. BUTIN, M. PINOT, «Fabrications mécaniques », Technologie, tome 2, (1981).
- [4] G. Murray, «propriétés métaux, alliages», Mémoire D'ingénieur En Métallurgie ; Paris, (2004).
- [5] Disponible Sur Le Site : [https://up.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/Designation\\_acier\\_EN10027\\_1\\_2.svg](https://up.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/Designation_acier_EN10027_1_2.svg), (4/4/2020).
- [6] A. ACHOURI, «Caractérisations mécaniques et structurelles d'un acier de construction des pipelines (API5LX60)», Mémoire De Master En Génie Chimique; Université De Mouhamed Kheider; Biskra, (2017).
- [7] MATERIAUX ET TRAITEMENTS (PARTIE 1) Document élaboré par: NICA DORINA, ROYAUME DU MAROC.
- [8] A. ROOS, «Précis De Métallurgie Appliquée». Edition Technique Et Documentation-Lavoisier (1982).
- [9] G.MURRY, «Généralités Sur Aciers», Techniques De L'ingénieur, Centre Français D'exploitation, (2002).
- [10] A. Amel, «Etude du procédé de soudage semi-automatique MIG MAG d'un joint soudé en acier ST37», Mémoire De Master En Génie Mécanique; Université De Larbi Ben M'hidi ; Oum-El-Bouaghi, (2018).
- [11] Etude du diagramme fer-carbone, <https://www.technologuepro.com> (chapitre3).
- [12] S. BENZAADA (Traitement thermiques des aciers et fontes).
- [13] Raymond Langevin; PERFORM (Guide d'Auto Apprentissage pour les opérations de traitement thermique).
- [14] Disponible Sur Le Site: [//ptetoile.free.fr/](http://ptetoile.free.fr/) (traitement thermique des aciers).
- [15] Mémoire magister, (Effet de traitement thermique sur la qualité d'une soudure en acier).
- [16] A.MOUMEN, «Contribution à l'étude de l'effet du traitement thermique sur les diverses propriétés d'un nanocomposite à matrice polypropylène», Mémoire magister ; Université Ferhat Abbas; Sétif.1, (2014).
- [17] D.BENSAIDA, « Feliachi » Technologie Office De Publication Universitaires 2eme Edition, (2009).
- [18] Collection Terme Et Définition Utilise En Soudage Et Technique Connexes Publications De La Soudure Autogene, (1996).
- [19] Esab Ab Welding Equipment Ab, Laxà, Sweden, (2007).
- [20] 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).

[21] (Encyclopédie), «Guide Du Soudage, Soudage A L'arc Sous Gaz Le Protection Tig, Mig, Mag», Tome V, Publication De La Soudage Autogène, (1996).

[22] K. KHELIL, « Soudage Des Pipelines », Mémoire D'ingénieur En Métallurgie, Université De Mouhamed Kheider ; Biskra, (2010).

[23] Disponible Sur Le Site : [Http//Www.Lincolnelectric.Au//](http://Www.Lincolnelectric.Au//), (5/5/2020).

[24] F.Rossillon, «Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point», Thèse de Doctorat, Université balaise pascal, (2007).

[25] H. Granjon, «Bases métallurgiques du soudage», Paris, (1977).

[26] Sympa ; Guide soudage/chapitre\_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants).

[27] S. KHALED, «Analyse et étude numérique des échanges thermiques en cours d'une opération de soudage TIG sous logiciel COMSOL Multiphasiques», Mémoire De Master En Génie Mécanique; BLIDA, (2014).

[28] J.F, «Mettury of welding par Lancaster».

[29] 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).

[30] B .YASSINE, «Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier API X70 en fonction de la succession des réparations Application dureté » ; Université Badji Mokhtar; Annaba, (2017).

[31] O.CLEIZERGUES, « Compréhension et modélisation du comportement a la rupture d'aciers pour tubes lors de l'essai BATTELLE», Thèse doctora, Université des Sciences et Technologies de Lille, (1998).

[32] Developpement of gas fields from tinrhert to alrar EPC4 "first gas", (Welding procedure specification formain line welding PQR13 (API 5L X60 PSL 2).

[33] B.FATIMA, « Evolutions microstructurales Lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4) », Mémoire De Magister En Science Des Matériaux ; Université Mohamed Kheider ; Biskra, (2013).

[34] K. J. Murata, M. B. Norman, American Journal of Science, Vol. 276, p 112-1130, 1976.

[35] Tong Liang, Wang Meihua, Han Sufen, Tang Mingshu, Advances in Cement Research, vol9, No 34, p 55-63, (1997).

[36] Structure: Joseph, T.L; Bitsianes, G; Gorton, A.T., Transactions of the Metallurgical Society of Aime, 233, 1519 - 1525, (1965).

## Résumé

L'assemblage des pipelines par soudure occupe une place très importante dans l'industrie pétrolière. Bien précisément les aciers X60, sont utilisables vu leur bonne soudabilité par le procédé de soudage à l'arc.

En conséquence, les gradients thermiques se manifestant lors du soudage conduit inévitablement à la création des contraintes résiduelles et hétérogénéité microstructurale.

Delà, vient notre étude compléter les travaux. On abordera l'effet des traitements thermiques et étudier l'influence des réparations successives par soudage sur la microstructure et le comportement mécanique de la zone affectée thermiquement (ZAT) d'un acier X60.

**Mots clé:** acier X60, Z.A.T, traitement thermique.

## ملخص

يحتل تجميع خطوط الأنابيب باللحام مكاناً مهماً للغاية في صناعة البترول.

على وجه التحديد، يمكن استخدام الفولاذ X60 بسبب قابليته اللحام الجيد من خلال عملية اللحام بالقوس الكهربائي.

نتيجة لذلك، تؤدي التدرجات الحرارية التي تظهر أثناء اللحام حتماً إلى خلق ضغوط متبقية وعدم تجانس هيكلية مجهرية.

من هناك تأتي دراستنا لإكمال العمل. سنناقش تأثير المعالجات الحرارية ودراسة تأثير الإصلاحات المتتالية عن طريق اللحام على البنية المجهرية والسلوك الميكانيكي للمنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ) لفولاذ X60.

**الكلمات المفتاحية:** الفولاذ X60، المعالجة الحرارية، المنطقة المتأثرة بالحرارة (HAZ).