



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

MÉMOIRE DE MASTER

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

Réf. : Entrez la référence du document

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

Amélioration des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier soudé

Jury :

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

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

Tout d'abord ; nous remercions “ALLAH” Le Tout Puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous remercions particulièrement notre encadreur Dr

DIGHECHE KELTHOUM

pour son encadrement continu, pour les remarques constructives qu'elle nous a fournies ainsi que pour ses précieux conseils durant toute la période de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements aux membres de jury Dr

CHERIFI NEDJMA et Dr **SLIMANI ASSIA**

pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'évaluer le contenu de

ce mémoire de master.

Mes remerciements s'étendent également à tous mes enseignants durant les années d'études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon père qui m'a toujours guidé et soutenu.

A ma mère qui a été toujours à mes côtés.

A mes belles sœurs : Hapipa, Saida, Akila.

A mes chères frères : Yossef, Hossine, Aide.

A ma princesse : **Sojoud**.

A ma belle : **Fatima**.

A toute la famille : korichi.

A tous mes amis.

A toute la promotion de 2^{ème} master de génie des procédés.

Korichi chaima

Sommaire

Sommaire	
Sommaire.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les aciers	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Historique sur les aciers.....	2
I.3. Définition de l'acier.....	2
I.4. Fabrication de l'acier.....	2
I.5. Structures des aciers.....	3
I.6. Les différentes classes d'aciers.....	4
I.6.1. Les aciers ordinaires ou les aciers au carbone.....	5
I.6.1.1. Les aciers à haute teneur en carbone (0.6 % à 1.4 % de C).....	7
I.6.1.2. Les aciers à moyenne teneur en carbone (0.25 % à 0.6 % de C).....	7
I.6.1.3. Les aciers à faible teneur en carbone (% C < 0.25 %).....	7
I.6.2. Les aciers inoxydables.....	9
I.7. Architecture atomique et défauts du réseau cristallins.....	9
I.8. Les domaines d'application technique.....	10
I.9. Les éléments d'addition et les rôles.....	11
I.10. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers.....	12
I.10.1. La dureté.....	12
I.10.2. L'essai de traction.....	12
Chapitre II : Soudage des aciers et le traitement thermique	
II.1. Introduction.....	13
II.2. Définition du soudage.....	13
II.3. Caractéristiques de la soudure.....	14
II.3.1. Définition.....	14
II.3.1.1. La zone fondue.....	14
II.3.1.2. La zone affectée thermiquement.....	15
II.3.1.3. la zone liaison.....	15

Sommaire

II.3.1.4. Le métal de base.....	15
II.4. La soudabilité.....	15
II.4.1. La soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés.....	16
II.5. Procédés de soudage.....	17
II.5.1. Soudage a l'arc électrique.....	18
II.5.1.1. Soudage à l'arc manuel à l'électrode enrobée (SMAW).....	19
II.5.1.1.1. Principe du procédé.....	19
II.5.1.1.2. Applications de la soudure SMAW.....	21
II.5.1.1.3. Avantages et inconvénients du procédé SMAW.....	21
II.6. Traitements thermiques des aciers.....	21
II.6.1. Définitions et procédés des traitements thermiques.....	22
II.7. L'austénisation.....	22
II.8. La trempe des aciers.....	23
II.8.1. Les défauts engendrés par la trempe.....	23
II.8.2. Modalités de la trempe.....	23
II.9. Le revenu des aciers.....	24
II.9.1. Types de revenu.....	25
II.9.1.1. Revenu à basses températures.....	25
II.9.1.2. Revenu à températures intermédiaires.....	25
II.9.1.3. Revenu à haute température.....	25
II.10. Le recuit des aciers.....	26
II.11. Effet des traitements thermique sur la dureté initiale.....	26
Chapitre III : Partie expérimentale	
III.1. Introduction.....	27
III.2. Matériau étudié.....	27
III.3. Méthodes expérimentales.....	28
III.3.1. Découpage.....	28
III.3.2. Traitements thermiques.....	29
III.3.3. Polissage.....	30
III.3.4. Attaque chimique.....	32
III.4. Les technique d'analyse.....	32
III.4.1. Le microscope optique.....	32

Sommaire

III.4.2. La micro-dureté Vickers (HV).....	33
Chapitre IV : Résultats et interprétations	
IV.1. Introduction.....	35
IV.2. Caractérisation Structurale.....	35
IV.2.1. La micrographie de l'acier X70 (métal de base).....	35
IV.2.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT).....	36
IV.2.3. La micrographie de la zone fondue (ZF).....	37
IV.3. Caractérisation de micro-dureté.....	40
Conclusion générale.....	43
Références bibliographiques.....	44

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Microstructure d'un acier hypoeutectoïde.	03
Figure I.2	Structure perlitique.	04
Figure I.3	Microstructure d'un acier hypereutectoïde.	04
Figure I.4	Diagramme d'équilibre Fer-carbone.	06
Figure I.5	Disposition des atomes et mailles élémentaires des structures cristallines les plus courantes des métaux : a) réseau c.f.c. b) réseau c.c ; c) système h.c.	10
Figure II.1	Principe d'une soudure.	13
Figure II.2	Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion.	14
Figure II.3	Influence de la température sur les grains.	16
Figure II.4	Différents procédés de soudage.	17
Figure II.5	Principe de soudage à l'arc électrique.	18
Figure II.6	Soudage à l'arc avec électrodes enrobées SMAW (schéma de principe).	20
Figure II.7	Cycle d'un traitement thermique.	22
Figure II.8	Cycle thermique d'un recuit.	25
Figure III.1	Le premier échantillon avant découpage.	28
Figure III.2	Découpage de pipe soudé par un scie électrique.	28
Figure III.3	Outil de meule.	29
Figure III.4	Les échantillons de l'étude.	29
Figure III.5	Four de traitement thermique.	30
Figure III.6	Polisseuse PHOENIX ALPHA d'ANALIS.	31
Figure III.7	Exemple sur les Papiers abrasifs utilisés.	31

Figure III.8	Microscope optique de type (Olympus BX J1M).	33
Figure III.9	Microuromètre Wolprt Wilson instruments.	34
Figure IV.1	Microstructure de métal de base avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.	35
Figure IV.2	Microstructure de zone affectée thermiquement avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.	36
Figure IV.3	Microstructure de zone fondue (Passs1) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.	37
Figure IV.4	Microstructure de zone fondue (Passs2) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.	38
Figure IV.5	Microstructure de zone fondue (Passs3) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.	39

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Tableau des compositions typiques des aciers au carbone.	08
Tableau II.1	Différents types de soudage à l'arc.	19
Tableau III.1	Composition chimique de l'acier utilisé (% Massique).	27
Tableau III.2	Composition chimique de l'électrode utilisé (% Massique).	27
Tableau IV.1	Les valeurs de la microdureté (passe1).	41
Tableau IV.2	Les valeurs de la microdureté (passe2).	41
Tableau IV.3	Les valeurs de la résistance mécanique (passe1).	42
Tableau IV.4	Les valeurs de la résistance mécanique (passe2).	42

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nombreuses industries réalisent des assemblages d'éléments métalliques par soudage (chaudronnerie, menuiserie métallique, construction navale, offshore , ferroviaire et automobile,...). Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés.

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 par pression , soit par l'un ou l'autre , avec ou sans métal d'apport dans la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle de matériaux de base.

Parmi les procédés de soudage par chauffage, on trouve le soudage à l'arc électrique, cette technique est la plus utilisée pour assembler deux pièces en acier.

Ce travail a pour but de réaliser un traitement thermique sur un acier soudé de type X70 afin d'améliorer ses propriétés microstructurales et mécaniques.

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

- ❖ Chapitre I : Généralité sur les aciers.
- ❖ Chapitre II : Soudage des aciers et le traitement thermique.
- ❖ Chapitre III : Partie expérimentale.
- ❖ Chapitre IV : Résultats et interprétation.

Et enfin nous avons résumé ce travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Généralités sur les aciers

I.1. Introduction

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 [1].

I.2. Historique sur les aciers

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

I.3. Définition de l'acier

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

I.4. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

* Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

* Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [4].

I.5. Structures des aciers

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

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

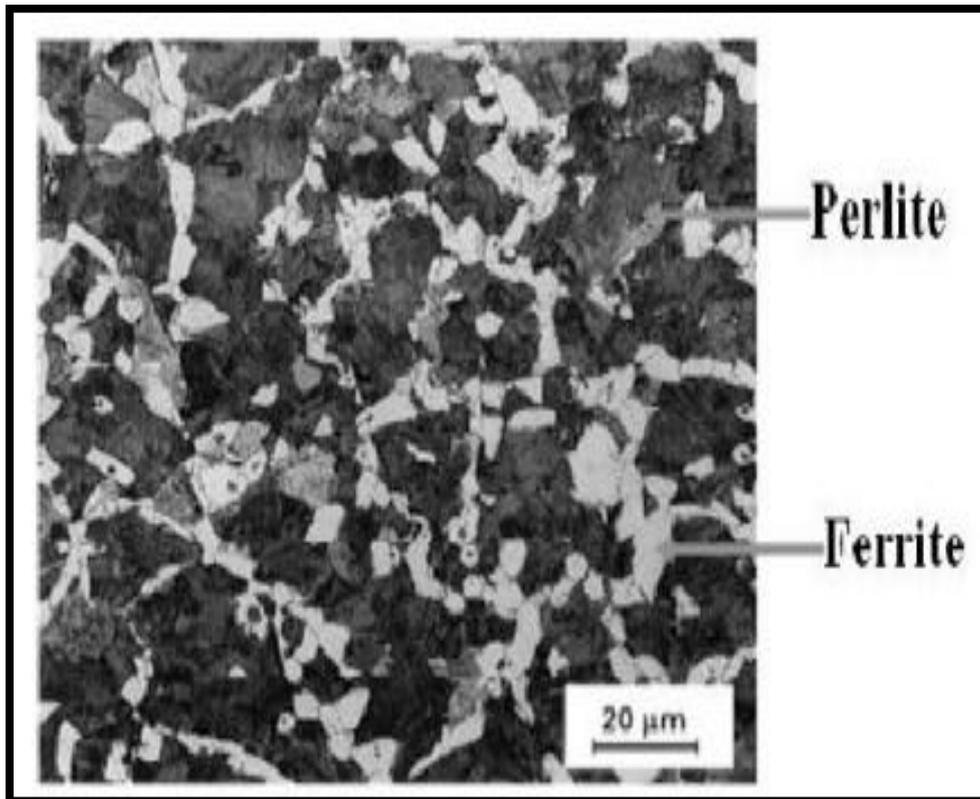


Figure I.1 : Microstructure d'un acier hypoeutectoïde [5].

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

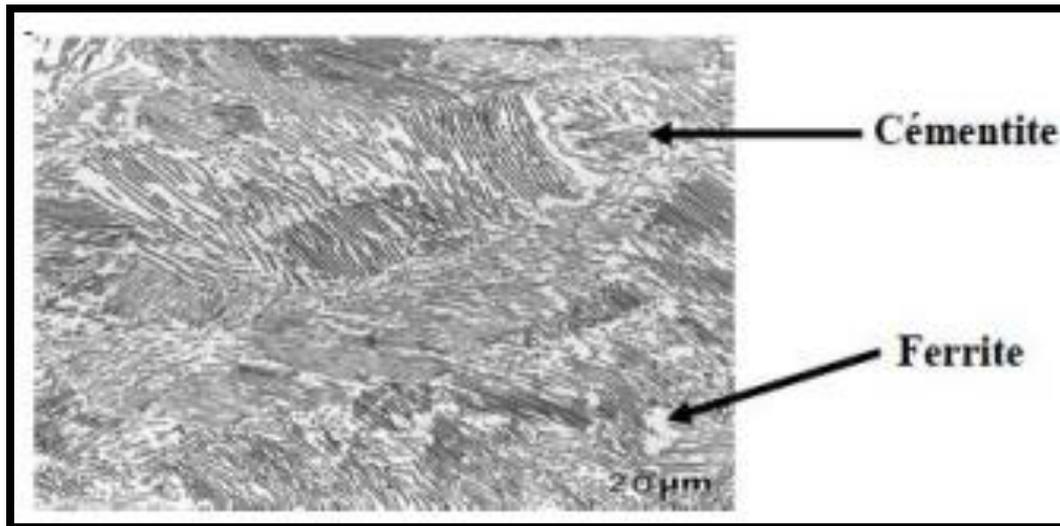


Figure I.2 : Structure perlitique [5].

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

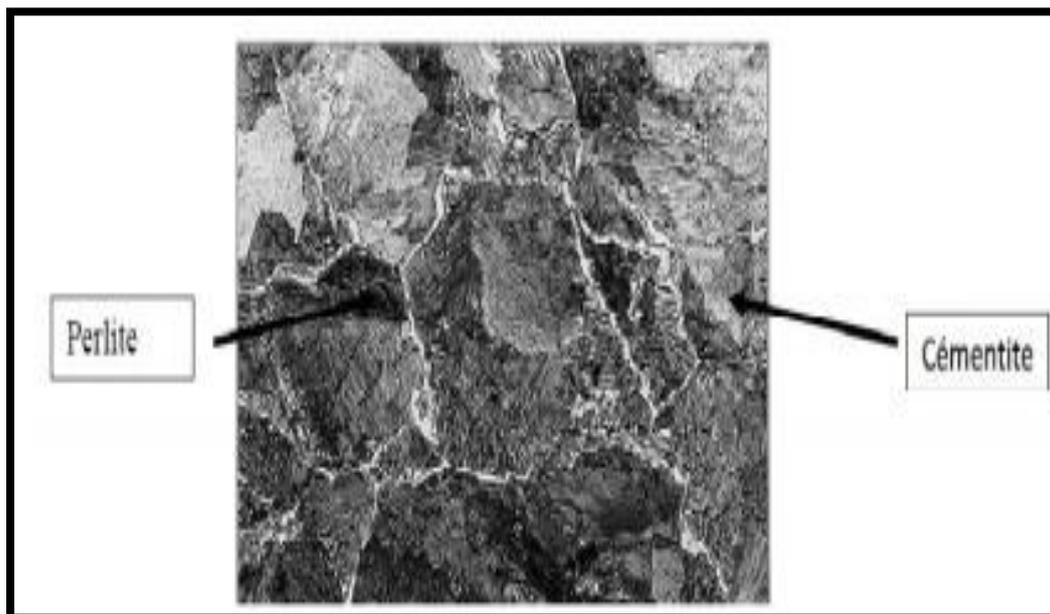


Figure I.3 : Microstructure d'un acier hypereutectoïde [5].

I.6. Les différentes classes d'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 [1].

I.6.1. Les aciers ordinaires ou les aciers au carbone

On appelle acier un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% massique. Cette teneur limite vient de la limite de solubilité du carbone, à haute température, dans la phase cubique à faces centrées (C.F.C) du fer, appelée austénite. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et les propriétés des aciers [6].

Les aciers ordinaires sont les moins onéreux. La fusion les purifie moins des impuretés, ils contiennent donc plus de soufre et de phosphore. Par ailleurs, ils sont coulés en gros lingots, en rendant ainsi possible une ségrégation importante, et il n'est pas rare qu'on y trouve beaucoup d'inclusions non métalliques.

Les aciers ordinaires s'emploient pour des pièces peu importantes, on les utilise pour la fabrication des fers marchands laminés à chaud (poutres, barres, poutrelles, cornières, ainsi que tôles, tubes et pièces de forge prévus pour travailler sous des charges relativement peu élevées).

Ils sont largement employés dans la construction des édifices et des ouvrages d'art soudés, rivés et boulonnés (poutres, fermes, charpentes des grues, corps des récipients et des appareils, charpentes des chaudières à vapeur, dragues, etc.) ainsi que dans la fabrication des éléments de machines peu importants (axes, arbres, pignons, doigts de chenilles, bagues, boulons, écrous, etc.) non soumis au traitement thermique ou l'ayant déjà subi. De nombreuses pièces (axes de piston, poussoirs, pignons, vis sans fin, etc.) en ces aciers à composition chimique définie, sollicitées à l'usure et n'imposant pas de résistance élevée à cœur, sont soumises à la cémentation ou à la cyanuration [7].

Le carbone, étant l'élément le moins cher et le plus efficace pour durcir le fer, il est ajouté au fer dans des proportions variant de 0,04 m% à 4 m% pour faire des aciers à faible, moyenne ou forte teneur en carbone (figure .I.4).

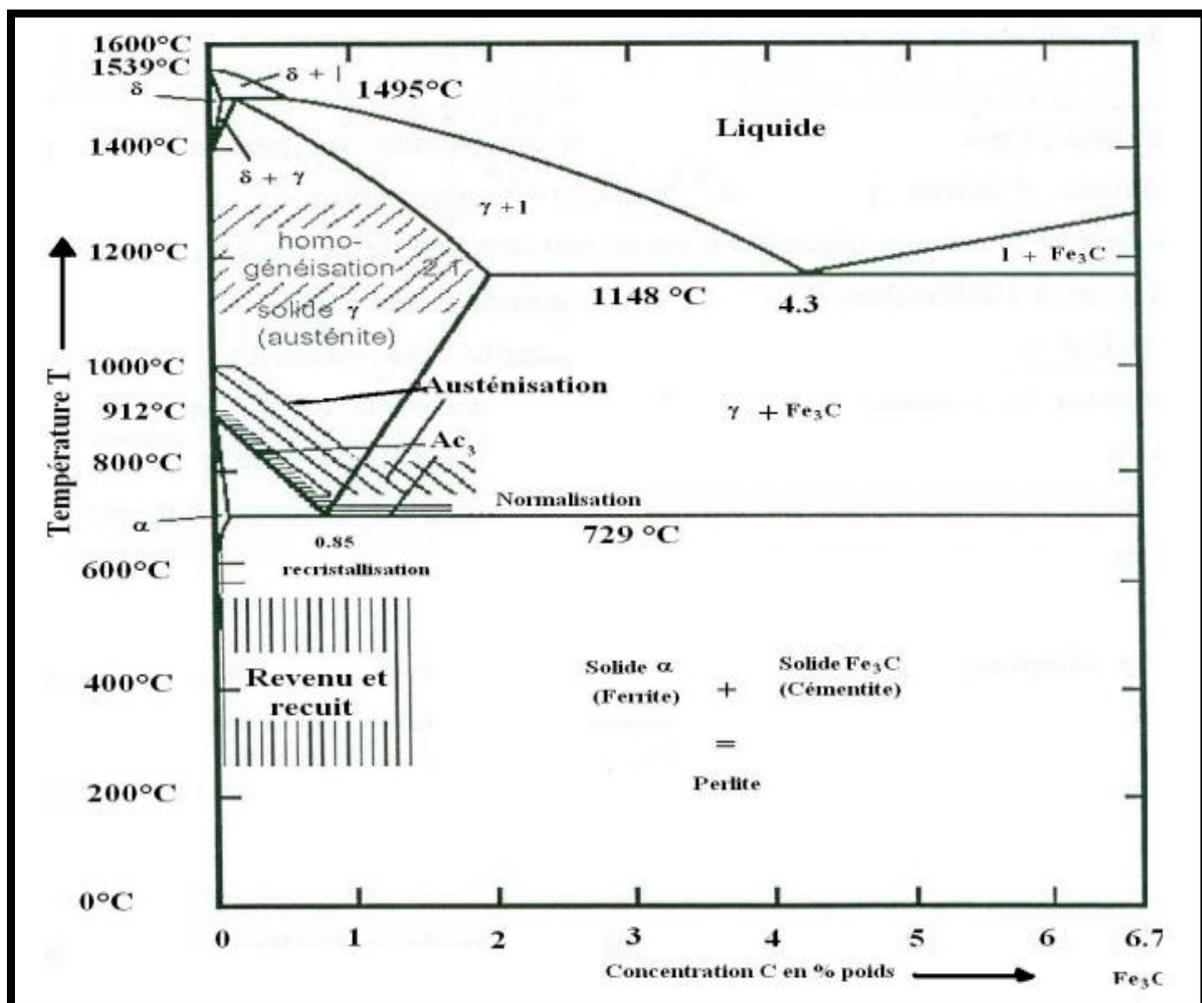


Figure .I.4 : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone [8].

I.6.1.1. Les aciers à haute teneur en carbone (0.6 % à 1.4 % de C)

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité. Étant résistant à l'usure, ils sont, utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices. On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté [9].

I.6.1.2. Les aciers à moyenne teneur en carbone (0.25 % à 0.6 % de C)

La concentration en carbone de ces aciers varie de 0.25% à 0.60%. Leurs propriétés mécaniques s'améliorent par austénitisation, trempe, puis revenu. On les utilise le plus souvent à l'état revenu, auquel cas ils ont une microstructure de martensite revenue.

Les aciers à moyenne teneur en carbone ont une faible trempabilité et leur traitement thermique n'est efficace que si leur section est très mince et si la vitesse de refroidissement est très élevée.

L'ajout de chrome (Cr), de nickel (Ni) ou de molybdène (Mn) facilite l'application de traitements thermiques à ces alliages et offre un large éventail de combinaisons résistance ductilité [10].

I.6.1.3. Les aciers à faible teneur en carbone (% C < 0.25 %)

Ces aciers sont produits en grande quantité et à moindre coût et se caractérisent par une grande ductilité et une grande ténacité mais une faible résistance.

Ils sont généralement renforcés par écrouissage (amélioration de la résistance et de la dureté par déformation plastique). Leur résistance à la traction se situe entre 415 et 550 MPa et leur allongement à la rupture peut atteindre 25%. Par ailleurs, ils peuvent être facilement usinés et soudés. On les trouve dans diverses applications (éléments de construction tels que les poutres, les profilés, les cornières, carrosserie de voitures, boîtes de conserve,.....) [9].

Ce type d'aciers contient 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 [1].

- Les propriétés mécaniques dépendent à la fois de la teneur en carbone et du traitement thermique, les aciers et les fontes ont ainsi un très vaste domaine d'application (voir tableau I.1).

Tableau I.1 : Tableau des compositions typiques des aciers au carbone [8].

Métal	Composition typique (m%)	Utilisation
Acier doux à faible teneur en carbone	Fe + 0.04 - 0.3 C (+ - 0.8 Mn)	Faibles contraintes (aciers de construction, bonne soudabilité)
Acier à moyenne teneur en carbone	Fe + 0,3 - 0,7 C (+ - 0,8 Mn)	Contraintes moyennes (pièces mécaniques, boulons, écrous, arbres, engrenages)
Acier à forte teneur en carbone	Fe + 0.7 – 1.7 C (+ - 0.8 Mn)	Fortes contraintes (ressorts, outils de coupe, de filage)
Acier faiblement allié	Fe+ 0.2 C 0.8 Mn 1 Cr 2 Ni	Fortes contraintes : réservoirs de pression, aéronautique...
Acier fortement allié (inoxydable)	Fe + 0.1 C 0.5 Mn 18 Cr 8 Ni	Usage à haute température et anticorrosion, usines chimiques.

Nous nous limiterons dans notre étude des aciers, aux aciers au carbone, or nous connaissons un peu les transformations qui se produisent dans les aciers et les microstructures qu'elles génèrent.

Donc, nous essaierons de regrouper ces connaissances et les utiliser pour conférer aux aciers des propriétés mécaniques déterminées [8].

I.6.2. Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les domaines où une protection contre la corrosion est importante. Ces aciers sont utilisés dans plusieurs : en orthopédie, en instrumentation, dans les installations agroalimentaires et dans la construction métallique. Ils résistent bien aux attaques des milieux agressifs en se protégeant d'un film passif qui leur donne la qualité d'inoxidable [11].

*Les différents types d'aciers inoxydables [11] :

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

I.7. Architecture atomique et défauts du réseau cristallins

Les trois structures cristallines les plus fréquentes dans les métaux sont les structures cubiques à faces centrées (*c.f.c.*) (fig. I.5a), cubique centrée (*c.c.*) (fig. I.5b) et hexagonale compacte (*h.c.*) (fig. I.5c). Les structures *c.f.c.* et *h.c.* sont les plus compactes.

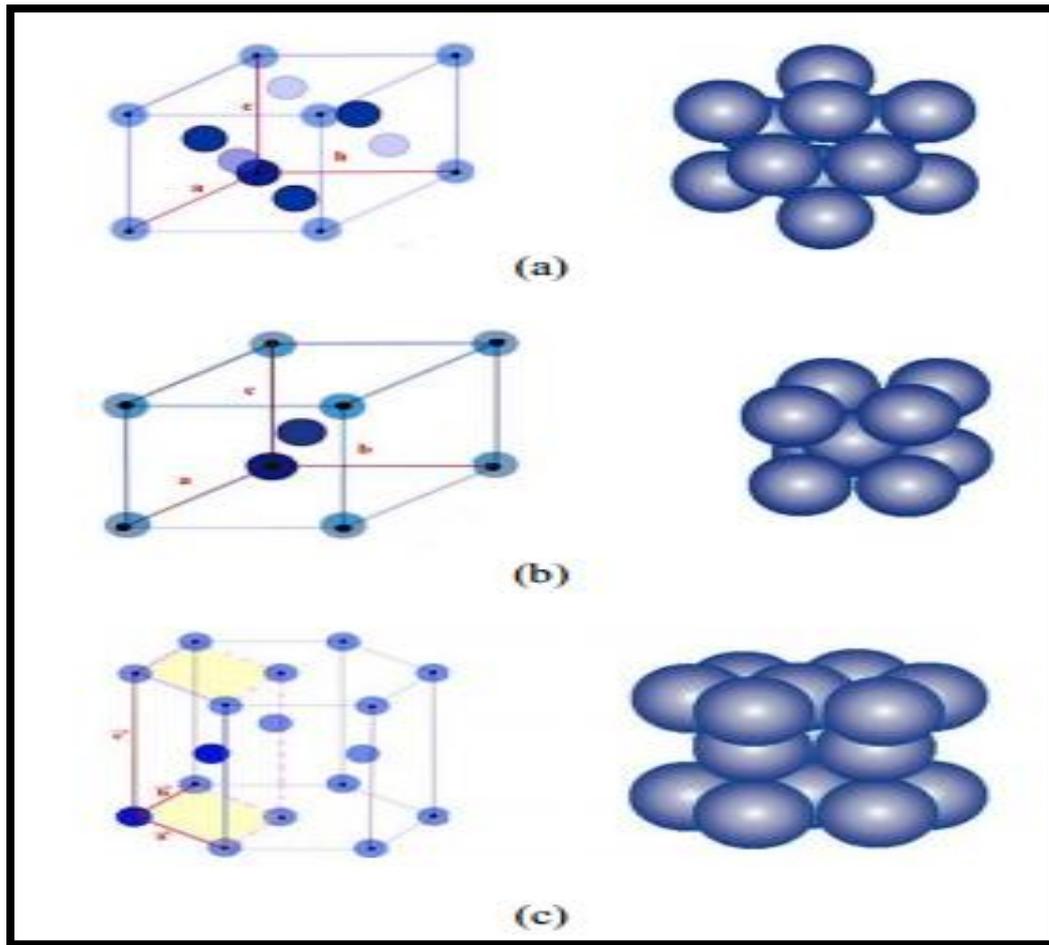


Figure I.5. Disposition des atomes et mailles élémentaires des structures cristallines les plus courantes des métaux : a) réseau c.f.c. b) réseau c.c, c) système h.c [12].

I.8. Les domaines d'application technique

Les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique : équipements publics (ponts et chaussées, signalisation), industrie chimique, pétrochimique, pharmaceutique et nucléaire (équipement sous pression, équipement soumis à l'action de la flamme, capacités de stockage, récipients divers), agro-alimentaire (conditionnement et stockage), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), industrie mécanique et thermique, (moteurs, turbines, compresseurs) automobile (carrosserie, équipements) ferroviaire, aéronautique et aérospatial, construction navale, médical (instruments, appareils et prothèses), composants mécanique (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, Forets, porte-plaquette), mobilier, design et équipements électroménagers, etc. [13].

I.9. Les éléments d'addition et les rôles

- **Le manganèse** : Augmente la ductilité et confère une meilleure réponse aux traitements thermiques.
- **Le soufre** : Améliore la machinabilité.
- **Le silicium** : Agit comme déoxydant et augmente la résistance de l'acier. Il affecte aussi la vitesse de diffusion du zinc dans l'acier lors de la galvanisation à chaud.
- **Le molybdène** : Améliore la dureté et la trempabilité. Quand il est ajouté dans des proportions de 2 à 4 % (comme dans l'acier inoxydable), il améliorera la résistance de l'acier aux attaques des chlorides.
- **Le chrome** : S'il est utilisé en petites quantités, il améliore la réponse aux traitements thermiques et l'abrasion. Quand son pourcentage est grand (entre 12 et 25%), il améliore la résistance à l'oxydation et à la corrosion.
- **Le nickel** : Améliore la trempabilité et la résistance à la corrosion. De plus, il augmente la stabilité de l'acier à haute température.
- **Le plomb** : Augmente la machinabilité de l'acier.
- **Le phosphore** : Diminue la ductilité et la résilience et améliore la machinabilité et la résistance à la corrosion.
- **Le soufre** : Réduit fortement la ductilité transversale et les propriétés de résilience. Il affecte la qualité de la surface et la soudabilité. Lorsqu'il est combiné au manganèse pour obtenir des sulfures de manganèse, il améliore la machinabilité.
- **L'aluminium** : Déoxydant et affineur de grain, il affecte aussi la vitesse de diffusion du zinc dans l'acier.
- **Le vanadium** : Retarde la croissance de grain et forme des carbonitrides qui augmentent la résistance des aciers HSLA lors du laminage à chaud.
- **Le titane** : Stabilise la structure et améliore l'efficacité des éléments durcisseurs dans l'acier [14].

I.10. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers**I.10.1. La dureté**

Elle s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. En effet, à l'aide d'une bille, d'un cône ou d'une pyramide appliquée sur l'acier avec une force déterminée on peut calculer la dureté de l'acier, mais aussi mettre en évidence plusieurs propriétés de l'acier, comme sa

résistance à la déformation, ou encore la capacité de durcissement par déformation (écrouissage). Les duretés des métaux ne peuvent être comparées que s'ils sont déterminés avec la même charge et la même méthode [6].

I.10.2. L'essai de traction

Il consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge d'acier progressivement de plus en plus grande jusqu'au moment de la rupture. Le moment à partir duquel le métal subit une déformation est appelé la limite élastique. La rupture, qu'on appelle la charge de rupture, est la charge maximale que peut supporter un acier sans subir de modification. Une fois ces limites atteintes, on mesure la section initiale de l'éprouvette en méga Pascals (MPa). On mesure aussi l'allongement de l'éprouvette au moment de la rupture, et la striction qui est le rapport entre la section de l'éprouvette au niveau de la rupture et de sa section initiale. Un acier doux, qui est celui le plus répandu a une charge de rupture proche de 350MPa, mais il est courant d'utiliser des aciers dont la charge de rupture dépasse les 1000MPa. A l'heure actuelle, nous sommes capables de créer des aciers spéciaux résistant à des charges de plus de 3000Mpa [6].

CHAPITRE II :
Soudage des aciers et le
traitement thermique

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 [9].

II.2. Définition du soudage

Le soudage est un procédé consistant à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité de matière entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre Les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler. Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions de l'élément à assembler [11].

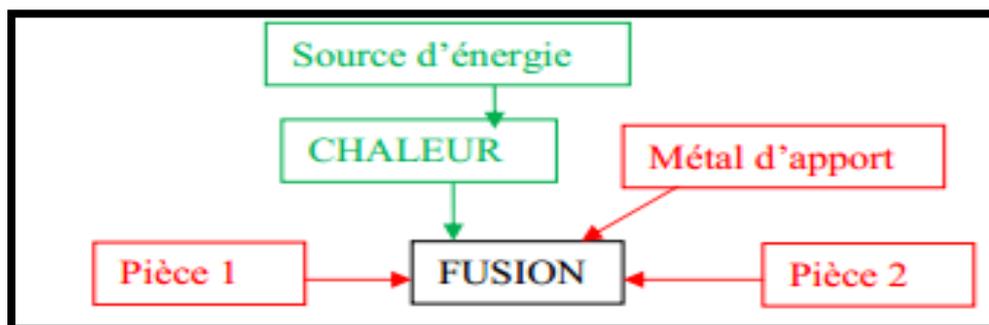


Figure II.1 : Principe d'une soudure [15].

En soudage, on peut confronter deux situations :

- La première où les éléments à assembler ont la même composition chimique et le métal d'apport est tel que le cordon aura une composition très voisine de celle du métal de base, on dit alors que le soudage est «*homogène*», c'est le cas le plus fréquent.
- La deuxième où les éléments à assembler n'ont pas la même composition chimique ou, s'ils ont la même composition chimique, celle du métal d'apport est différente, on dit dans ce cas que le soudage est «*hétérogène*» [8].

II.3. Caractéristiques de la soudure

II.3.1. Définition

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique [8].

On est appelé à obtenir, après solidification soit un joint homogène de même composition que le métal de base soit un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion utilisé, la structure typique d'une soudure d'un alliage est composée de quatre zones principales (Fig. II.2) [16].

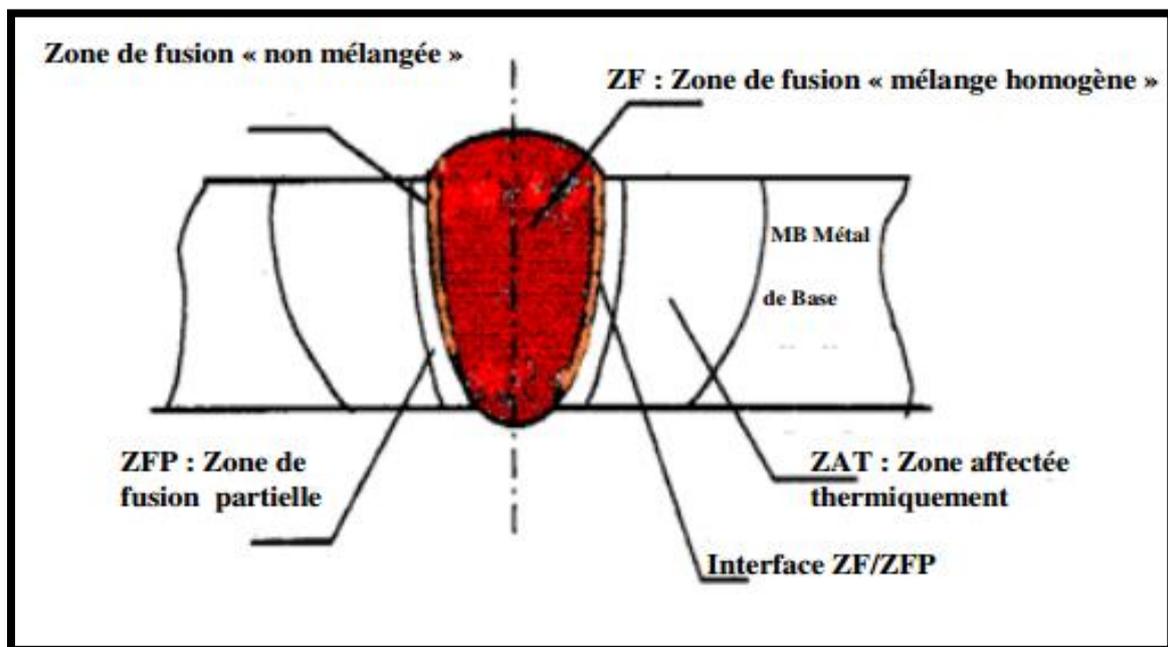


Figure II. 2 : Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion [8-16].

II.3.1.1. La zone fondue

(Nommée Z.F) zone dans laquelle l'état liquide a été atteint. La structure métallurgique qui sera obtenue après solidification, dépendra du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, et ce de la partie la plus chaude vers la moins chaude. Il devient donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté [16].

II.3.1.2. La zone affectée thermiquement

(Nommée Z.A.T) est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et des modifications de la structure du métal de base [16].

II.3.1.3. La zone liaison

(Nommée Z.L) Zone située entre la zone fondue (Z.F) et la zone affectée thermiquement (Z.A.T), correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé [11].

II.3.1.4. Le métal de base

(Nommée M.B) Cette partie de la structure du métal soudée est suffisamment loin de la source de chaleur et ne subit pas ainsi de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage. Il est à signaler que le métal de base, tout comme le joint de soudure global, peut être un site de concentration des contraintes résiduelles (transversales et longitudinales), dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure [17].

Au-delà de la ZAT, l'élévation de la température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale [11].

II.4. La soudabilité

La soudabilité est la propriété d'un matériau qui permet, lorsqu'on emploie un procédé de soudage donné pour un but donné, d'obtenir un joint continu en appliquant un mode opératoire convenable. La soudure ainsi obtenue doit satisfaire aux exigences imposées, quand aux propriétés locales de la soudure, et à leur influence sur la construction, dont la soudure fait partie [18].

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques

locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement.

On voit apparaître la notion fondamentale de « **continuité de la nature des matériaux assemblés** » et plus particulièrement de « **continuité métallique**».

Cette exigence implique la mise en jeu, entre les éléments à assembler, de forces de liaison interatomiques de type métallique (pour les métaux). L'intervention de ces dernières exige l'absence de tout corps étranger susceptible de constituer une barrière à leur action [19].

II.4.1. La Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZAT après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La Figure II.3 illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier, on peut remarquer la zone où on trouve de l'austénite, c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes.

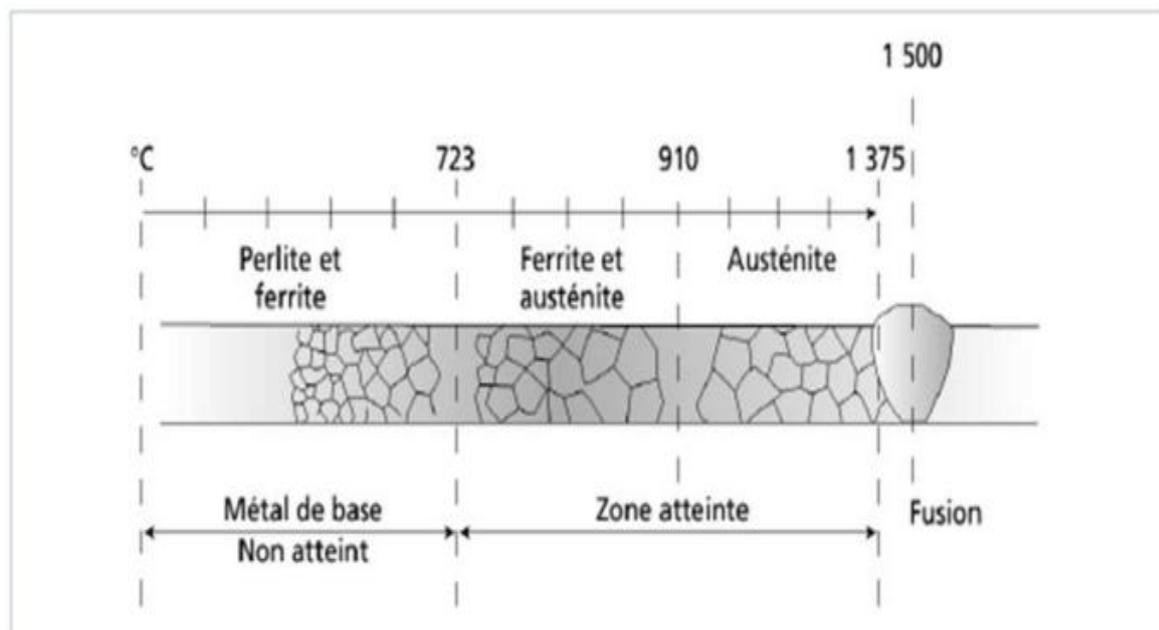


Figure II.3 : Influence de la température sur les grains [20].

II.5. Procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Bien qu'ils soient nombreux, la classification des différents procédés de soudage peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la jonction entre les parties assemblées. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler sans action mécanique volontaire utilisant une source de chaleur telle que la flamme, l'arc électrique, plasma etc., pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion mais par une action mécanique (frottement, pression) [11].

Les différents procédés de soudage est présentée dans la Figure II.4.

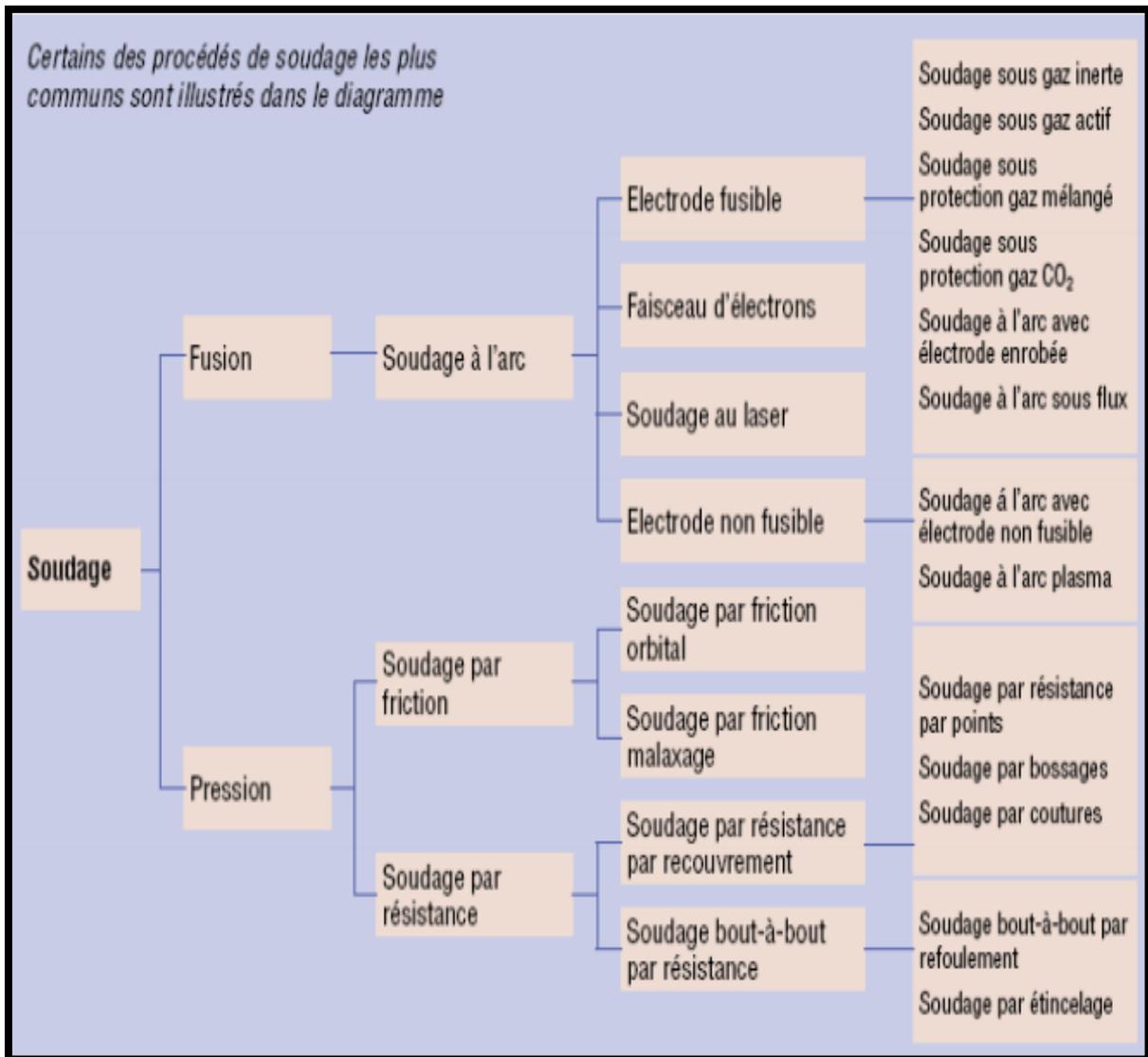


Figure II.4 : Différents procédés de soudage [15].

II.5.1 Soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder [21].

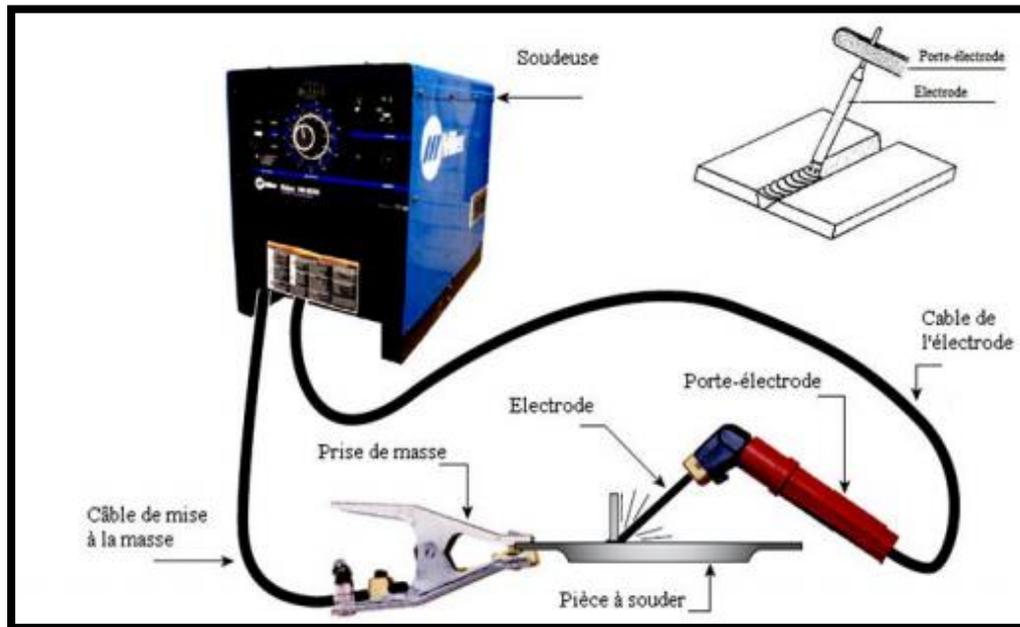


Figure II.5 : Principe de soudage à l'arc électrique [22].

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base, pour amorcer un arc il faut que le courant parcourt un circuit fermé d'une part la pièce et de l'autre l'électrode.

L'arc électrique est la source de chaleur à base de nombreux procédés de soudage, les raisons primordiales de se choisir sont :

- Les effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est à l'arc court entre une électrode formant ainsi l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion.

- Les phénomènes de transport de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, formant un dépôt se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Il est à noter que pour le cas des électrodes réfractaires il n'y a pas de transfert entre l'électrode et la pièce [22].

Le tableau II.1 présente les procédés de soudage à l'arc

Tableau II.1 : Différents types de soudage à l'arc [9].

Autres notations	Signification	Type de soudage	Type de protection	Electrode fusible
GTAW - Gas Tungstène Arc Welding	Tungstène Inerte gaz	T.I.G	Gaz inerte	Non
GMAW-Gas Métal Arc Welding	Métal Inerte gaz	M.I.G	Gaz inerte	Oui
GMAW	Métal Active gaz	M.A.G	Gaz actif	Oui
SAW-Submerge Arc Wading		Arc sous flux	Flux solide	Oui

II.5.1.1. soudage à l'arc manuel à l'électrode enrobée (SMAW)

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques parmi eux soudage à l'arc manuel à l'électrode enrobée (SMAW).

II.5.1.1.1. Principe du procédé

Le soudage à l'électrode enrobée (**shilded 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. Sa simplicité fait remonter son utilisation dans le secteur industriel aux années 1900.

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte électrode qui elle-même est reliée au câble de sortie de poste de soudage. Le connecteur de pièce est relié au générateur et est placé sur la pièce à souder (Figure II.6). L'arc électrique est amorcé par contact électrode-pièce et entraîne instantanément la fusion de l'électrode et la formation du cordon. Ce dernier se présente après solidification recouvert de laitier provenant de l'enrobage fondu que l'on élimine ultérieurement. Les caractéristiques des soudures réalisées ainsi dépendent de deux facteurs principaux : la technologie d'élaboration de l'électrode et l'habilité de l'opérateur.

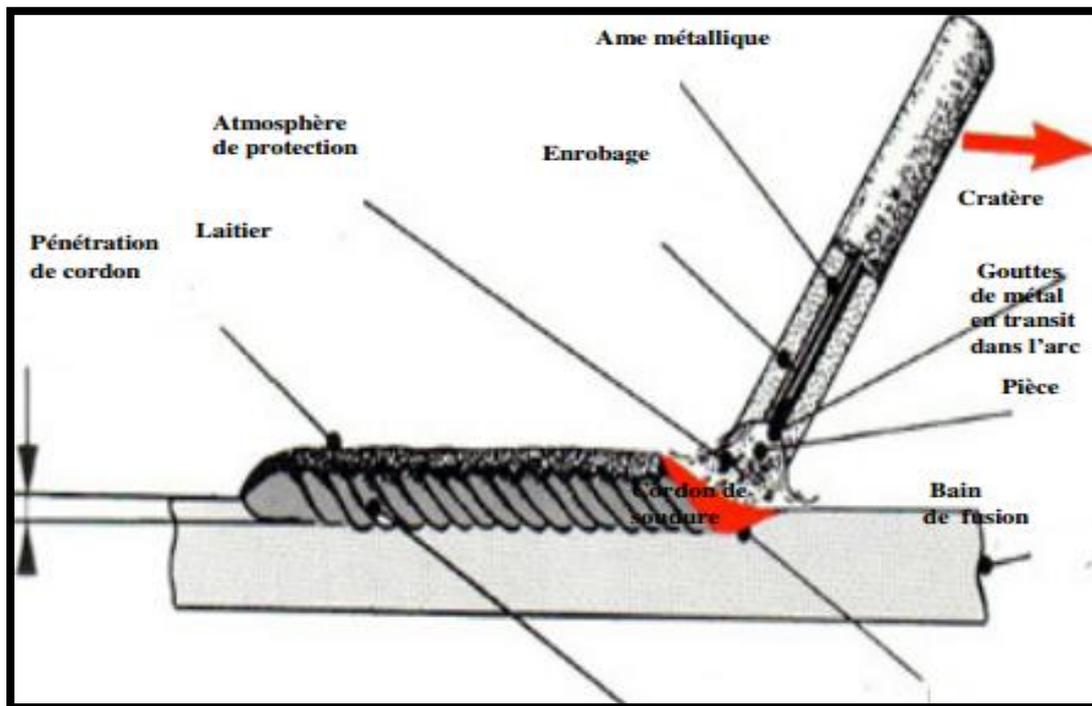


Figure II.6 : Soudage à l'arc avec électrodes enrobées SMAW (schéma de principe) [16].

Le soudage manuel à l'arc électrique et électrode enrobée concerne surtout les postes de tuyauteurs pour des tubulures de diamètre et d'épaisseur importante. Conférant une bonne résistance mécanique aux soudures. Il convient aux aciers doux (enrobage de l'électrode type O), aux aciers faiblement alliés, aux aciers inoxydables et réfractaires, à la fonte grise, aux métaux non ferreux : nickel (après décapage à l'acide et neutralisation), cuivre et cupro-aluminium. Il est préféré au procédé TIG pour les soudures sur tuyauterie transportant du gaz, car il supprime le risque gaz lié à la présence du gaz protecteur [16].

II.5.1.1.2. Applications de la soudure SMAW

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 sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier [1-21].

II.5.1.1.3. Avantages et inconvénients du procédé SMAW

- 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 [16].
- Faible coût d'équipements et soudage de joints de différents types en toutes positions, aussi gammes d'épaisseurs très étendue, faible productivité $V_a = 17 \text{ cm/min}$, enlèvement du laitier de protection [9].

II.6. Traitements thermiques des aciers

Les traitements thermiques sont toutes les opérations thermiques qui visent à modifier la microstructure de l'acier, lui donnant ainsi de nouvelles caractéristiques. Ils permettent notamment de modifier la limite d'élasticité, la dureté, la résistance mécanique, l'allongement à rupture, le coefficient de striction et la résilience. Il existe plusieurs types de traitement, la trempe, le revenu...etc. [23].

II.6.1. Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (Figure II.7).

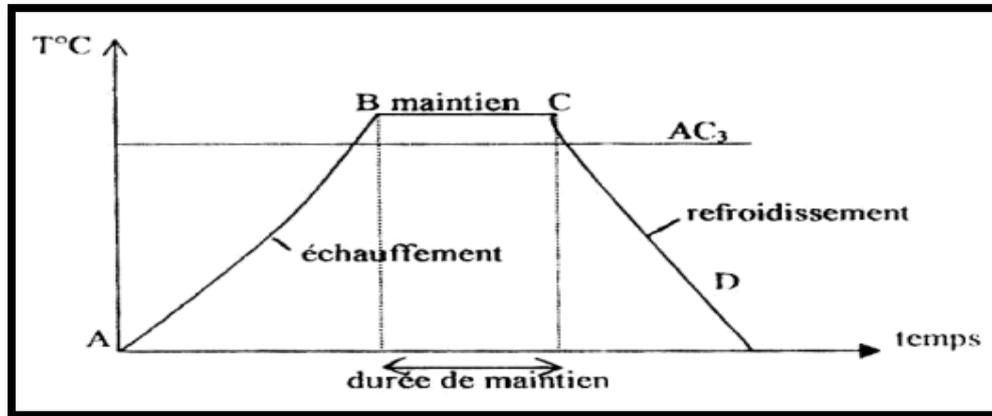


Figure II.7 : Cycle d'un traitement thermique [24].

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - Lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

II.7. L'austénisation

Le principe est de chauffer l'acier pendant 30 min à 30-50 °C au-dessus de la température de transformation austénitique Ac_3 afin de l'homogénéiser, transformant les éléments ferritiques (α , cubique centrée), la cémentite et les carbures présents en austénite (γ , cubique face centrée). À la fin du traitement d'austénisation, le matériau est homogène, son état est connu. Lors d'une chute brutale de température, la trempe, l'austénite se transforme en martensite si la diffusion des atomes de carbone est trop lente et ne permet pas la formation d'une autre microstructure, c'est généralement ce qui se passe pour un acier trempable [23].

II.8. La trempe des aciers

Le traitement de trempe comprend :

- Un chauffage lent à une température dépendant du type d'acier à traiter.
- Un temps de maintien à la température pour que les transformations soient complètes.
- Un refroidissement effectué à partir de la température dite température de trempe jusqu'à une température plus basse pouvant différer de la température ambiante.

Le traitement de trempe fait en général augmenter R_m , R_e , et H et diminuer $A\%$, $Z\%$ et K (résilience).

Il est suivi d'un second Traitement appelé revenu qui a pour but de réduire les effets de la trempe.

Il améliore la résilience, diminue la dureté et supprime les tensions internes issues de la trempe [25].

II.8.1. Les défauts engendrés par la trempe

- Décarburation superficielle due à l'atmosphère (généralement oxydation des fours).
- Corrosion en cas de maintien prolongé à haute température.
- Contraintes interne σ_i qui résultent des vitesses de refroidissement différentes (ou de chauffage) entre les diverses parties de la pièce et de la transformation martensitique dans le cas de la trempe des aciers [25].

II.8.2. Modalités de la trempe

Le procédé le plus usité est celui de la trempe dans un milieu refroidissant unique ou trempe continue. Mais on utilise également d'autres modes de trempes dans les cas où la forme des pièces est complexe où il faut diminuer les déformations. Les différents modes de trempes sont :

- Trempe à deux bains.
- Trempe suivie d'autorevenu.
- Trempe isotherme (étagée) martensitique.
- La trempe isotherme (étagée) bainitique.
- Trempe superficielle :
 - Trempe superficielle par induction.
 - Trempe au chalumeau.
 - Trempe par immersion dans un bain de trempage [24].

II.9. Le revenu des aciers

L'opération de revenu est destinée à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable et d'atténuer ainsi la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Le revenu permet aussi de diminuer notablement, voire supprimer, les contraintes résiduelles provoquées par la trempe. Cette suppression de contraintes est d'autant plus marquée que la température du revenu est plus élevée. Pour résumer, le revenu conduit à un métal disposant des caractéristiques convenables montrant un compromis satisfaisant entre les propriétés de résistance (R_m , R_e , dureté, etc.) et les propriétés de déformabilité ($A\%$, K_{cv} , etc.).

Pratiquement, le revenu est un traitement thermique effectué essentiellement après trempe. Il consiste en :

- Un chauffage à une température T_R en dessous de la température AC_1 .
- Un maintien isotherme à la température T_R de durée t_R .
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement.

Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

La température de revenu conditionne la diffusion de carbone dissous dans la martensite.

La figure II.8 représente schématiquement un cycle de traitement thermique combiné Trempe + Revenu.

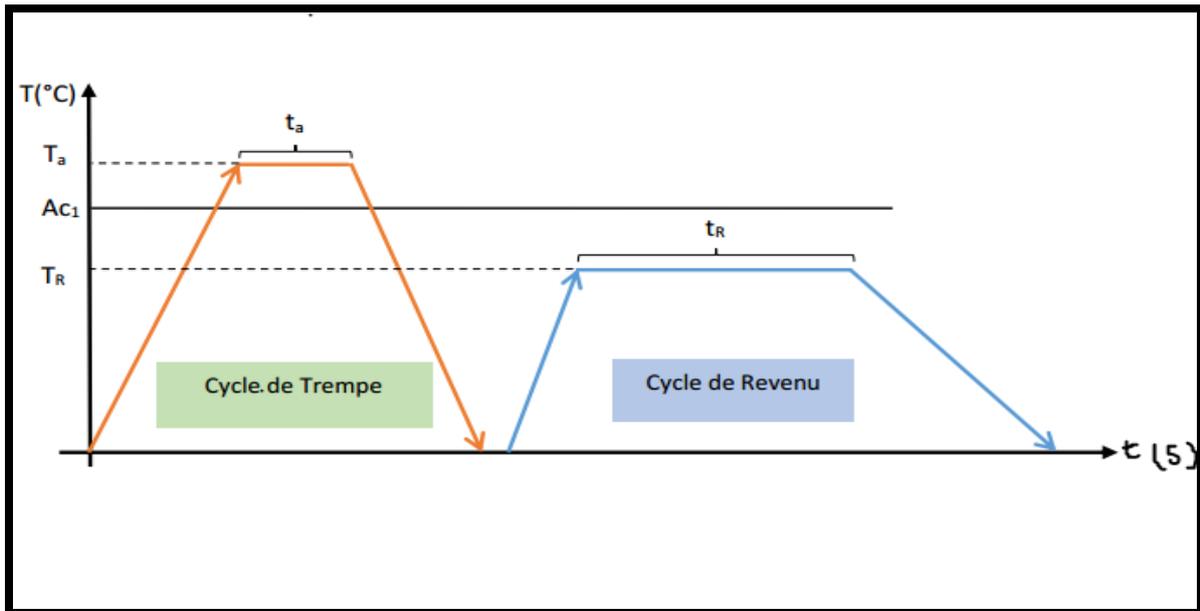


Figure II.8 : Cycle combiné de traitement thermique de Trempe + Revenu [26].

II.9.1. Types de revenu

Il existe trois modalités de revenus :

II.9.1.1. Revenu à basses températures

Température voisine à 250 C°, ce type de revenu est utilisé pour diminuer les contraintes internes, augmenter la résistance et améliorer la ductilité, cependant la dureté n'est pas altérée. Il est appliqué aux outils de coupe, aux instruments de mesure en acier au carbone et faiblement alliés [9].

II.9.1.2. Revenu à températures intermédiaires

Effectué aux températures comprises entre 350 et 500 C° avec un refroidissement à l'eau, il permet d'augmenter la limite élastique et la résistance à la fatigue. Il est appliqué aux aciers à ressorts [9].

II.9.1.3. Revenu à haute température

Effectué aux températures comprises entre 500 et 680 C°, appliqué aux aciers de construction, il crée le meilleur compromis entre la résistance et la ductilité (plasticité) [9].

La trempe suivie de revenu à haute température (ce traitement double est appelé amélioration) [24].

II.10. Le recuit des aciers

Le recuit est un traitement thermique adapté à l'élimination ou à la réduction des effets néfastes de la ségrégation, l'écrouissage et les contraintes de soudage etc.

D'une manière générale, le recuit a comme conséquence le retour à un équilibre physico-chimique et/ou mécanique plus ou moins complet, lié éventuellement à une tendance vers l'équilibre structural :

- Equilibre physique : équilibre des phases.
- Equilibre chimique : composition chimique.
- Equilibre mécanique : contraintes internes.
- Equilibre structural : taille des grains, défaut de structure.

II.11. Effet des traitements thermique sur la dureté initiale

Les traitements thermique permettent de modifier la microstructure de l'acier notamment la taille des grains et des précipités. La dureté est la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon. Elle est associée à la limite ultime. Pour rendre un acier plus ou moins dur, il faut pouvoir contrôler sa capacité à se déformer de façon permanente. Ces déformations correspondent aux mouvements irréversibles des dislocations. Ces déplacements se font par glissement dans les plans cristallographiques.

Les traitements thermiques permettent de changer la microstructure et la densité de dislocation, l'austénisation et la trempe permettent d'avoir de la martensite fraîche avec une très grande densité de dislocation. Pendant les recuits, des précipités se forment et grossissent par diffusion des éléments, la densité de dislocation diminue. Avec une densité de dislocation plus faible, les dislocations sont moins bloquées et donc peuvent plus se déplacer. Les précipités qui se forment et qui représentent des obstacles grossissent et leurs nombres diminue avec les recuits. La taille de ces précipités a une influence sur la cinétique de transformation austénitique. Plus ils sont gros et plus ils mettent du temps à se dissoudre pour une température donnée [23].

CHAPITRE III :

Partie expérimentale

III.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter le matériau étudié et les différentes techniques de préparation des échantillons (découpage, traitement thermique, polissage...), la démarche suivante a été adoptée :

- Identification des matériaux utilisés.
- Prélèvement des échantillons.
- Traitement thermique.
- Polissage.
- Attaque chimique.
- Caractérisations métallographiques (une observation métallographique sur un microscope optique).
- Caractérisations mécaniques (mesures de la micro dureté Vickers).

III.2. Matériau étudié

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

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

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo
0.064	0.2047	1.573	0.0154	0.0015	0.0553	0.1922	0.0291	0.0319	0.007	0.1353

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

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

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

III.3. Méthodes expérimentales

III.3.1. Découpage

- Dans cette étape on prélève un échantillon soudé de (15*20) de longueur voir (figure III.1).



Figure III.1 : Le premier échantillon avant découpage.

- Après on découpe le premier échantillon en plusieurs morceaux de (4 cm) de longueur à l'aide d'une scie électrique au niveau de Halle de la Technologie à l'Université de Biskra, en versant de l'eau pour éviter l'échauffement et la modification des propriétés microstructurales de cette morceau. La préparation des échantillons a été effectuée de sorte à éviter tout échauffement ou déformation du matériau.



Figure III.2 : découpage de pipe soudé par un scie électrique.

- Ensuite, on utilise un outil de meule pour enlever les bords de cette morceaux.



Figure III.3 : Outil de meule.



Figure III.4 : Les échantillons de l'étude.

III.3.2. Traitements thermiques

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

Pour cette étude, nous prenons deux échantillons soudés :

- On laisse un échantillon comme référence (sans traitement thermique).
- Nous avons réalisé un traitement thermique sur un autre échantillon, la température choisi est 200°C pendant un durée de 2 heures.

Le traitement thermique est réalisé à l'aide d'un four au niveau de Halle de la Technologie du Département Génie Mécanique (figure III.4).



Figure III.5 : Four de traitement thermique.

III.3.3. Polissage

Le polissage est effectué au laboratoire de Génie Mécanique au niveau de la Faculté des Sciences et de Technologie à l'Université de Biskra, à l'aide d'une polisseuse de type PHOENIX ALPHA de marque ANALIS, comme il est illustré ci-dessous voir (figure III.6).



Figure III.6 : Polisseuse PHOENIX ALPHA d'ANALIS.

Les faces de ces échantillons soudés sont polis mécaniquement aux papiers abrasifs de granulométries (grade 120, 180, 320, 400, 800, 1000, 1200) pour éviter le frottement d'échantillon sur les papiers abrasifs qu'il provoque l'échauffement on jet l'eau, puis la finition par un papier tissu et la pâte diamantée.

Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés.



Figure III.7 : Exemple sur les Papiers abrasifs utilisés.

III.3.4. Attaque chimique

Après polissage, les échantillons soudés sont attaqués chimiquement pour révéler les macros, et les microstructures des différentes zones.

Nous avons attaqué chimiquement les échantillons par le Nital de 4% (solution alcoolique-nitrique) de composition :

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

La durée d'attaque varie entre de 15 et 20 secondes.

A la fin, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés pour l'observation.

III.4. Les technique d'analyse

Les techniques d'analyse utilisées dans notre travail sont :

- Le microscope optique (MO).
- La micro-dureté Vickers (Hv).

III.4.1. Le microscope optique

Le microscope optique est une technique de base pour étudier les transformations structurales. Elle permet de visualiser et d'analyser les détails de la structure sous ses différentes échelles (forme et taille des grains de structure, forme et taille et distribution de la porosité, joints de grain, points multiples, ordre structural...).

Pour cela, nous avons utilisé un microscope optique de type (**Olympus BX J1M**), avec différents grossissements (figure III.8).



Figure III.8 : Microscope optique de type (Olympus BX J1M).

III.4.2. La micro-dureté Vickers (HV)

L'essai de dureté est largement utilisé sur les métaux. Il caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. Ainsi, pour des conditions expérimentales données, la dureté du métal sera d'autant plus grande que la pénétration du corps sera faible. Il existe plusieurs type d'essais de dureté, qui diffèrent essentiellement par la forme du pénétrateur. Dans l'essai Vickers le pénétrateur est une pyramide en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de 136° . L'empreinte formée est donc pyramidale. Si (d) diamètre de l'empreinte et (F) la force appliquée, alors la dureté est [1]:

$$H_v = 1.8544 F / d^2 \quad (\text{III.1})$$

Pour notre étude, nous avons utilisé pour les mesures de la dureté une machine micro-duromètre de type Wolpert Wilson Instruments.



Figure III.9 : Microduromètre Wolprt Wilson instruments.

CHAPITRE IV :

Résultats et interprétations

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présentés les résultats de l'étude du 'effet de traitement thermique sur la microstructure et le comportement mécanique des joints soudés.

IV.2. Caractérisation Structurale

IV.2.1. La micrographie de l'acier X70 (métal de base)

L'observation microscopique de l'acier X70 (non traité) à l'état de réception, cette observation a montré l'existence d'une structure en Ferritoperlitique. Après un traitement thermique à 200°C pendant 2 heures nous avons observés qu'il ya un affinement des grains.

Les microstructures très fines présentent d'excellentes propriétés mécaniques (bonne ténacité des joints soudés).

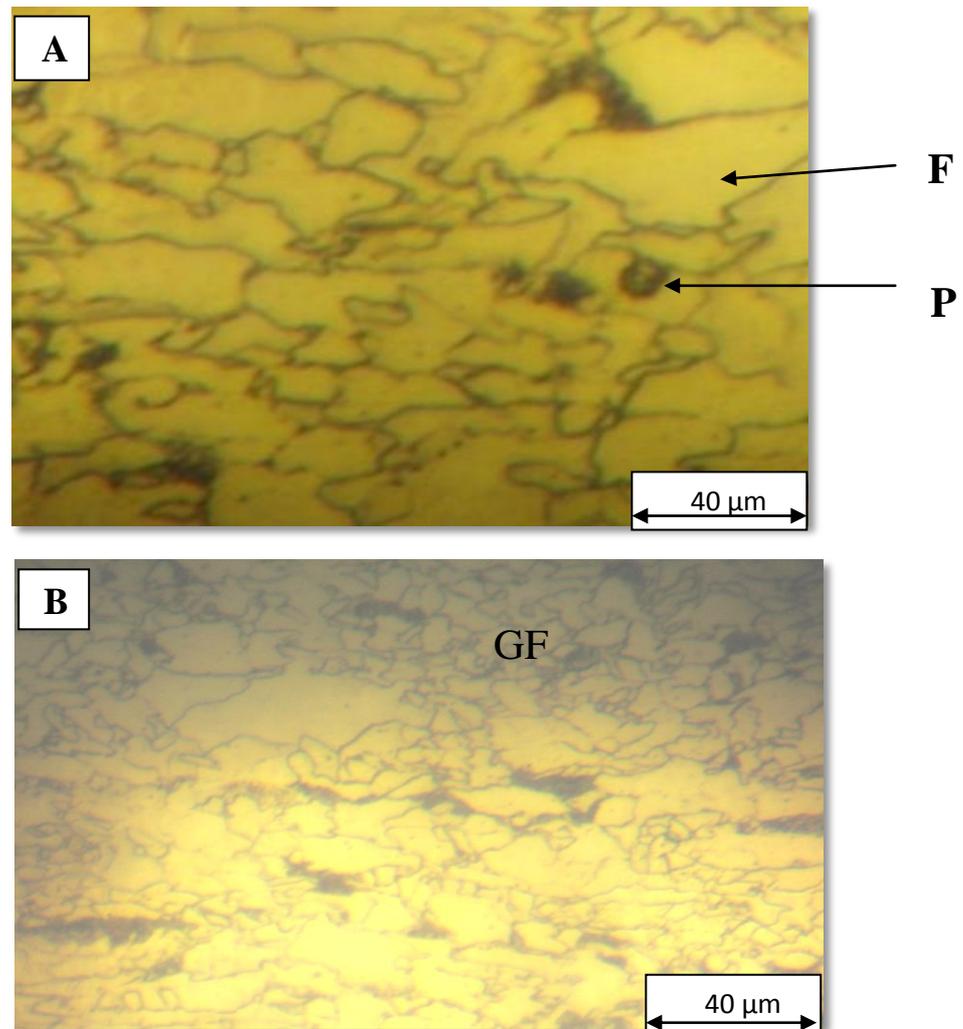


Figure IV.1 : Microstructure de métal de base avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

IV.2.2. La micrographie de la zone affectée thermiquement (ZAT)

La figure IV.2 présente les microstructures de la zone affectée thermiquement avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

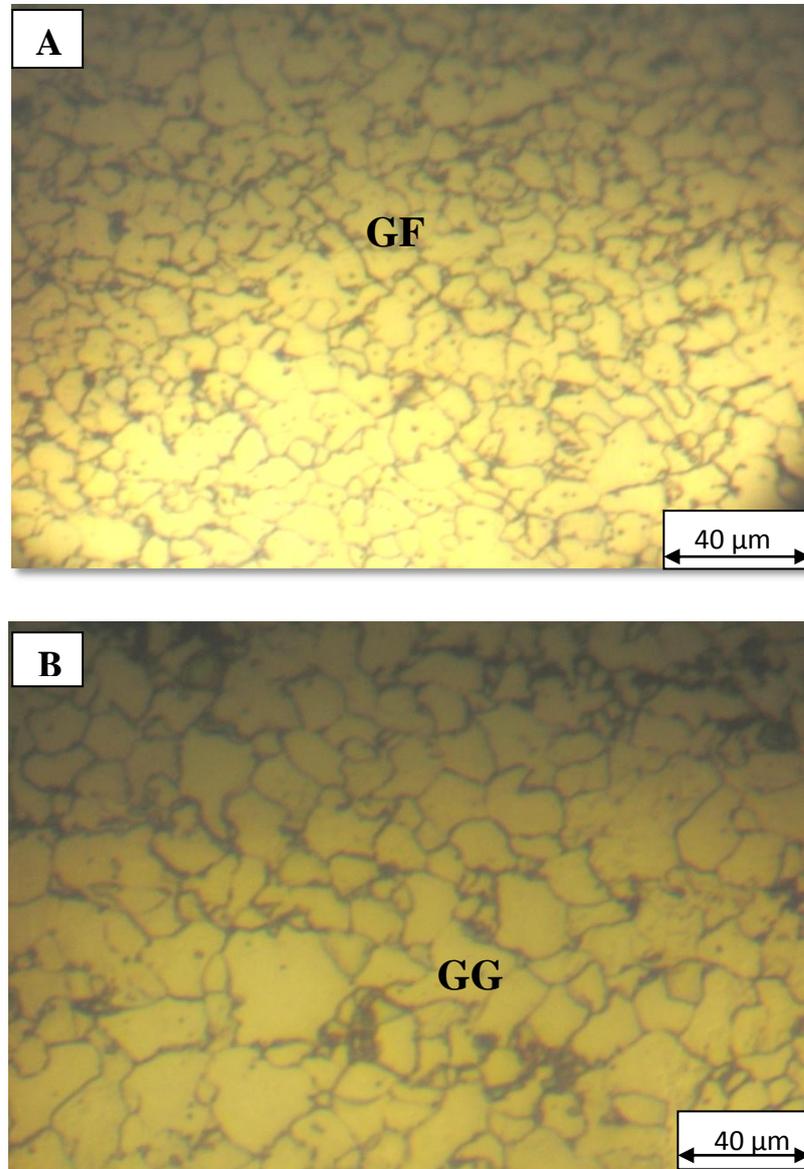


Figure IV.2 : Microstructure de zone affectée thermiquement avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

La figure IV.2.A représente une structure ferritique avec une faible proportion de perlite, on remarque aussi l'existence grains fins ferritique.

La figure IV.2.B. Illustre la micrographie la zone affectée thermiquement de l'échantillon soudé et traité à à 200°C pendant 2 heures, cette figure présente une microstructure de ferrite equiaxe.

IV.2.3. La micrographie de la zone fondue (ZF)

La figure IV.3 présente les microstructures de la zone fondue (Passe1) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

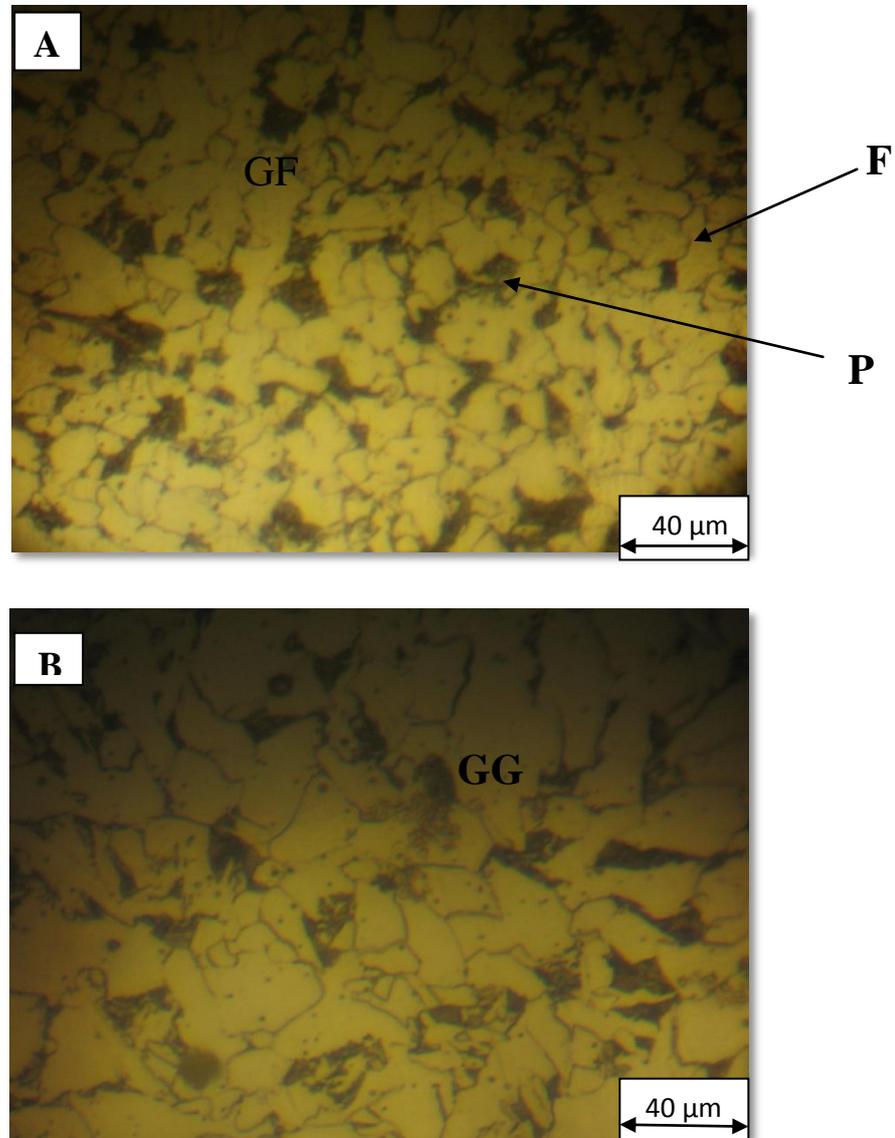


Figure IV.3 : Microstructure de zone fondue (Passe1) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

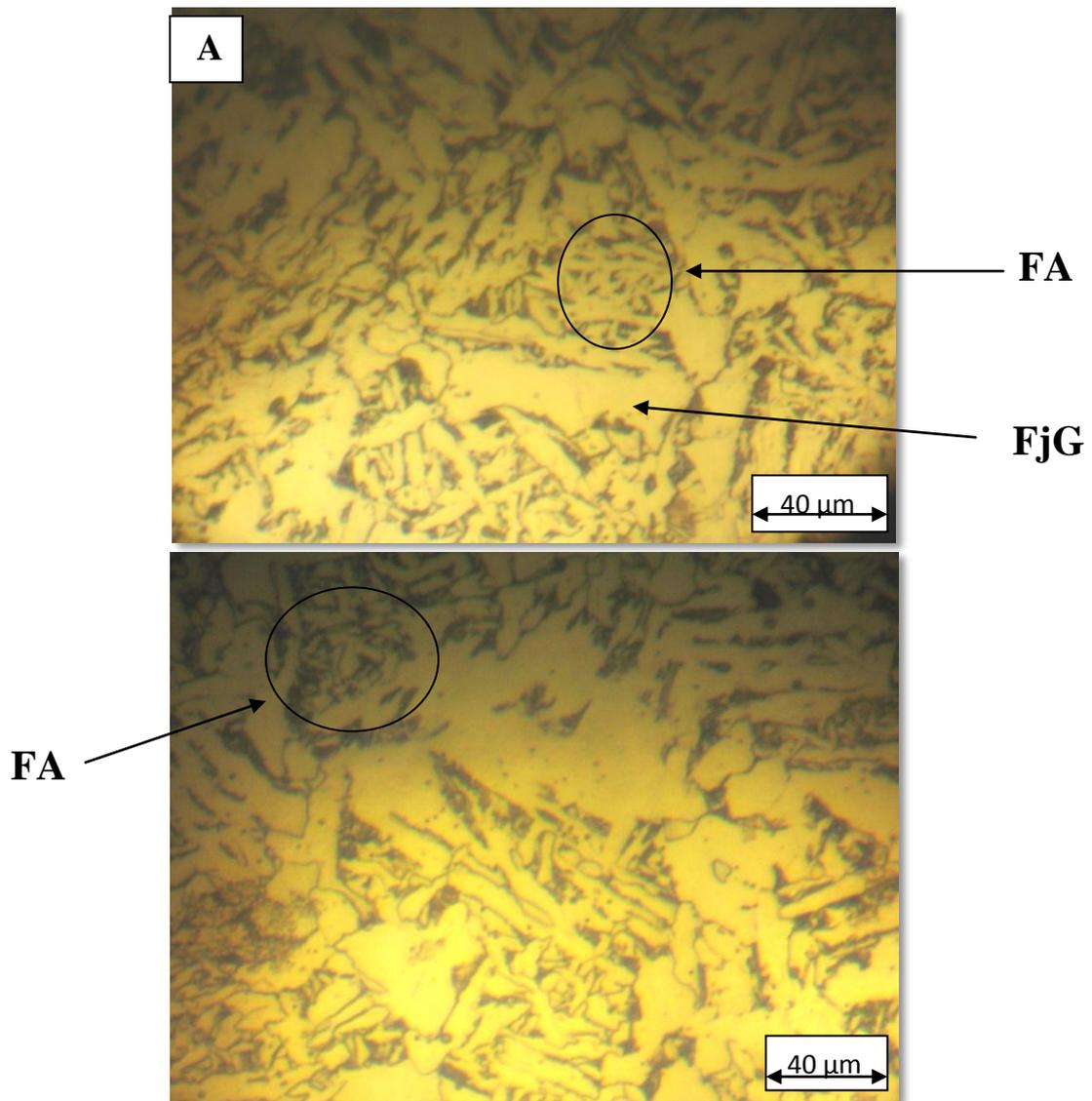


Figure IV.4 : Microstructure de zone fondue (Passe2) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

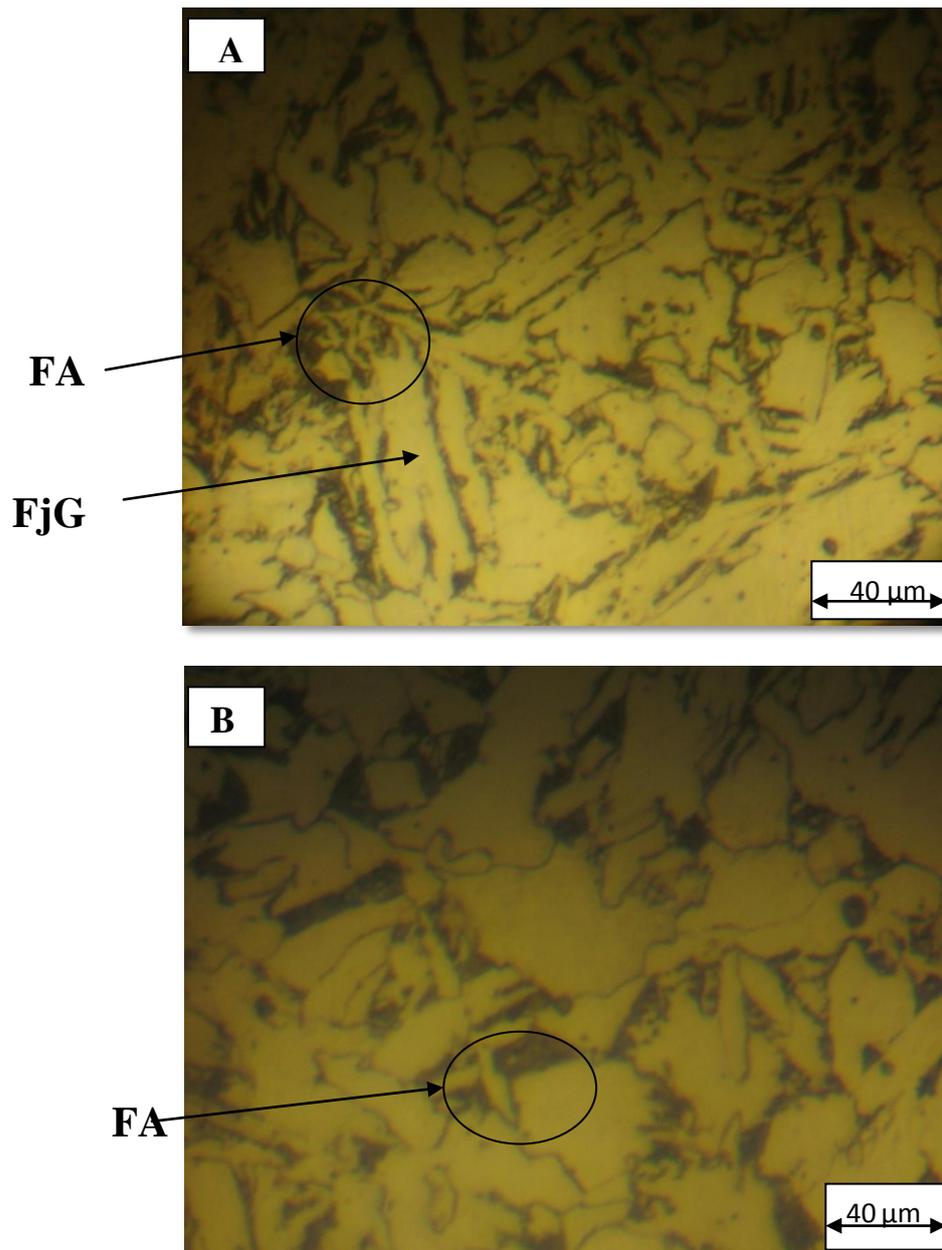


Figure IV.5 : Microstructure de zone fondue (Passe3) avant et après traitement thermique à 200°C pendant 2 heures.

On note qu'au centre du joint soudé se trouve la zone fondue. C'est elle qui est passée à l'état liquide durant l'exécution de la soudure. Dans la zone fondue, nous avons vu plusieurs microstructures.

La figure IV.3.A présente une microstructure très claire de des grains fins de ferrite (blanc) avec une autre phase qui est la perlite (noir). Après un traitement thermique à 200°C pendant 2 heures, nous avons trouvés une augmentation de la taille de grains.

La figure IV.4.A et B illustre une microstructure montre la présence de la ferrite aciculaire(FA). Avec une présence des grains ferritique plats qui s'appellent (ferrite proeutectoïde ou ferrite de joint de grain et la ferrite polygonale (FP).

La figure IV.5.A et B illustre une microstructure montre illustre une microstructure montre la présence de la ferrite proeutectoïde, avec l'apparition d'une nouvelle morphologie qui s'appelle la ferrite de widmanstatten (FW).avant et après traitement thermique, presque pas de changement dans la microstructure.

IV.3. Caractérisation de micro-dureté

Les essais de la micro-dureté ont été réalisés sur les éprouvettes dans le sens de la coupe transversale (métal de base, zone affectée thermiquement, zone de fusion).

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

Notre résultats sont en bonne agreement avec la littérature, car les grandes valeurs de la microdureté sont mesurées toujours au niveau de la zone fondue. La variation des propriétés de la zone soudé peut s'influer par plusieurs facteurs, comme les contraintes résiduelles après soudage. D'autre coté, la diminution de la tailles des ,la présence des inclusions métalliques et la présence de quelques morphologies ferritique comme la ferrite de widmanstätten (FW) et la ferrite aciculaire(FA) . La diminution de la microdureté peut être provoquée par réduction des défauts de réseau cristallin générés après soudage, l'augmentation de la taille des grains, et la formation de la ferrite dans la microstructure [27]. Les résultats de la résistance mécanique sont inversement proportionnelle avec la micro dureté, c'est-à-dire quand la micro dureté augmente la résistance mécanique diminue et l'inverse.

Tableau IV.1 : Les valeurs de la microdureté (passe1)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 200°C
U.Sample	0 mm	200,37	192,17
Metal de base	1 mm	177,077	170,9
	2 mm	173,03	171
	3mm	179,33	169,25
Zone affectée thermiquement	4mm	195,85	195,3
	5mm	////////	////////
	6 mm	196,65	171,25
Zone fondue	7 mm	176,3	162,65
	8 mm	190	184
	9mm	188,26	180,6

Tableau IV.2 : Les valeurs de la microdureté (passe2)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 200°C
U.Sample	0 mm	206,35	190
Metal de base	1 mm	186,9	176,16
	2 mm	215,23	200,25
	3mm	190,85	170,96
Zone affectée thermiquement	4mm	192,13	190,05
	5mm	200,56	185, 75
	6 mm	197, 75	194,03
Zone fondue	7 mm	190,03	170,35
	8 mm	204,26	180,00
	9mm	184,63	178,93

Tableau IV.3 : Les valeurs de la résistance mécanique (passe1)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 200°C
U.Sample	0 mm	0.0049907	0.0052037
Metal de base	1 mm	0.0056472	0.0058513
	2 mm	0.0057793	0.0058479
	3mm	0.0055763	0.0059084
Zone affectée thermiquement	4mm	0.0051059	0.0051203
	5mm	////////	////////
	6 mm	0.0050851	0.0058394
Zone fondue	7 mm	0.0056721	0.0061481
	8 mm	0.0052631	0.0054347
	9mm	0.0053118	0.0055370

Tableau IV.4 : Les valeurs de la résistance mécanique (passe2)

	Distance	Echantillon non traité	Echantillon traité 2H à 200°C
U.Sample	0 mm	0.0048461	0.0052631
Metal de base	1 mm	0.0053504	0.0056766
	2 mm	0.0046461	0.0049937
	3mm	0.0052397	0.0058493
Zone affectée thermiquement	4mm	0.0052048	0.0052617
	5mm	0.0049860	0.0053835
	6 mm	0.0050568	0.0051538
Zone fondue	7 mm	0.0052623	0.0058702
	8 mm	0.0048957	0.0055555
	9mm	0.0054162	0.0055887

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de ce travail consiste à l'étude de l'influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des pipelines. Les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de COSIDER CANALISATION où deux tubes d'acier de nuance X70 ont été assemblés par soudage à l'arc électrique, selon le procédé de soudage (SMAW) avec des électrodes enrobées.

Afin de connaître la qualité de la soudure et l'influence du traitement thermique nous avons utilisés deux techniques des caractérisations telles que : la microscopie optique (MO), la microdureté (HV).

Les résultats de ce travail peuvent se résumer de la manière suivante :

Les microstructures du métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et de la zone fondue (ZF) en multi-passes montrent des phases ferrito-perlitiques. La microstructure dans la zone fondue est principalement de la Ferrite aciculaire (FA) et Ferrite de joint de grain (GBF), La microstructure de la zone affectée thermiquement en multi-passes est de la Ferrite Equiaxe (FE) et la perlite (P). Les principales microstructures de la zone fondue en multi-passes sont la ferrite polygonale (FP), la ferrite de joint de grain (FJB) et des petites colonies de perlite (P).

Le profil de la micro- dureté des différentes zones du joint soudé en première passe montre que la plus haute valeur de la micro- dureté est obtenue dans la Zone fondue , par rapport aux métal de base et la zone affectée thermiquement. Après traitement thermique nous avons remarqués une diminution des valeurs de la microdureté au niveau de tous les zones.

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

REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [1] **Y.BARKAT**, « Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines », mémoire de master, Université Mohamed Khider - Biskra, (2016).
- [2] **Y.GUETTAF TEMAM**, « Etude microstructurale des zones affectées thermiquement d'un acier soudé », mémoire de master, Université Mohamed Khider –Biskra, (2016).
- [3] **H.MAROUF**, « Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier ordinaire E36/Acier anti –usure NAXTRA70 utilisé par l'unité Grue de Bejaia dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, (2012).
- [4] **Y.BOUMELITA**, « Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier APIX70 en fonction de la succession des réparations Application dureté », mémoire de master, Université Badji Mokhtar De Annaba, (2017).
- [5] **A.BOUBAKER**, « Effet de traitement de recuit sur les caractéristiques structurales et mécaniques d'un acier faiblement allié de type BS2 soudé : Cas de bouteille à gaz (BAG-Batna) », mémoire de master, Université Mohamed khider –Biskra, (2019).
- [6] **N.HICHER**, « Etude des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2) soudé », mémoire de master, Université Mohamed Khider –Biskra, (2019).
- [7] **LLAKHTINE**, « Métallographie et Traitements Thermiques Des Métaux », Quatrième édition, éditions Mir Moscou, (1986).
- [8] **C-E.DERFOUF**, « Effet de la soudure sur la structure de l'acier », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, (2011).
- [9] **I.SERARIA**, «Effet de traitement thermique sur la qualité d'une soudure en aciers», mémoire de master, Université Mohamed Khider-Biskra, (2016).
- [10] **N.GUELAI, F.BOUTARFIF**, « Comportements mécaniques des aciers faiblement alliés avant et après cémentation », mémoire de master, Université De Tébessa. (2016).

- [11] **S.HAMZA**, «Caractérisation des joints soudés des pipelines en acier INOX 304L», thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, (2019).
- [12] **O.TAAMALLAH**, « Effet des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar De Annaba, (2012).
- [13] **A.CHERIET**, « Effet de traitement de sphéroïdisation sur les aciers à dispersoïde destinés aux installations pétrolières », mémoire de master, Université Mohamed Khider – Biskra, (2016).
- [14] **W.LARBI**, Cours de matériaux de construction-CCV015, Conservatoire National Des Arts et Métiers (chapitre 05), (2005).
- [15] **MATHIEU.TOUBOUL**, « Etude du comportement mécanique à chaud de l'acier P91 vers la compréhension des mécanismes intra / inter granulaires sur la tenue en fluage : application aux structures soudées », thèse de doctorat, l'école nationale supérieure des mines de paris, (2012).
- [16] **F.KHAMOULI**, « Influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des Pipelines », mémoire de doctorat 3^{ème} cycle (LMD), Université Badji Mokhtar De Annaba, (2017).
- [17] **N.Chérifi**, « Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, (2015).
- [18] **C.PHILIP**, Cours de la soudabilité, Arts et Métiers ParisTech (Bordeaux-Talence) ENSAM, (2007).
- [19] **G.Murry**, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux, Techniques De L'ingénieur, Traité Matériaux Métalliques, m 715.
- [20] **A.OULAD BRAHIM, M.SOUIDA**, « Etude expérimentale et simulation numérique de l'effet de différents types de défauts sur le comportement mécanique l'acier API 5L X70 », mémoire de master, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, (2017).

- [21] **A.MOSTEFA**, « Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration a froid dans la ZAT », mémoire de master, Université Abou bekr Belkaid–Tlemcen, (2018).
- [22] **M.BENEDDEB**, « Etude les défauts de soudage des pipelines », mémoire de master, Université Mohamed Khider-Biskra, (2012).
- [23] **L.AUSSEIL**, « Méthodes de caractérisation des propriétés thermomécaniques d'un acier martensitique », la maîtrise avec mémoire, Université Du Québec (L'école De Technologie Supérieure), (2016).
- [24] **S.BENSAADA**, Traitements Thermiques, Classification Et Designation Des Aciers Et Fontes.
- [25] **M.MESSAOUI**, Cours matériaux métalliques, Institut Supérieur Des Etudes Technologiques De Gafsa, (2014).
- [26] **A.TLILI**, Cours matériaux métalliques, Ministère De L'enseignement Supérieur et De La Recherche Scientifique-Nabeul, (2014).
- [27] **K. DIGHECHE**, « Etude microstructurale de la zone affectée thermiquement dans un acier soudé », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.

Résumé :

Le but de cette mémoire est l'étude de l'effet du traitement thermique sur la microstructure et le comportement mécanique des joints soudés, Les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de COSIDER CANALISATION où deux tubes d'acier de nuance X70 ont été assemblés par soudage à l'arc électrique, Pour suivre les évolutions structurales et mécaniques de notre échantillons, On a utilisé des méthodes expérimentales (le microscope optique, la micro-dureté).

D'après les résultats de cette étude, les zones soudées sont identifiées comme la zone fondue et la zone affectée thermiquement, des structures ont également été observées dans ces régions.

Mots clés : Soudage, Traitement thermique, Acier.

Abstract :

The purpose of this thesis is the study of the effect of heat treatment on the microstructure and the mechanical behavior of welded joints, the welds carried out in this study were carried out at the COSIDER CANALISATION workshop where two tubes of X70 grade steel were assembled by electric arc welding, to follow the structural and mechanical evolutions of ours amples, we used experimental methods (optical microscope, micro-hardness).

From the results of this study, the welded areas are identified as the melted area and the heat affected area, structures were also observed in these areas.

Key words : Welding, Heat treatment, Steel.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية على البريق المجهرية و السلوك الميكانيكي للحام، وقد تم إجراء اللحامات في هذه الدراسة في ورشة كوسيدار للقنوات تم تجميع أنبوبان من الفولاذ عن طريق اللحام بالقوس الكهربائي، من أجل متابعة التطورات البنيوية و الميكانيكية لهذه العينات، استعملنا الطرق التجريبية (المجهر الضوئي ، جهاز قياس درجة الصلادة).

من نتائج هذه الدراسة، تم تحديد المناطق المكونة لمكان التلحيم مثل المنطقة المنصهرة والمنطقة المتأثرة حرارياً، كما لوحظت بنيات في هذه المناطق .

الكلمات المفتاحية : اللحام، المعالجة الحرارية، فولاذ.