



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Abassi Imane

Le : lundi 28 septembre 2020

Etude microstructurale d'un joint soudé par procédé SMAW d'acier X70

Jury :

Dr.	Ghebghoub Fatima	MCA	Université de Biskra	Président
Dr.	Chérifi-Bennadji Nedjema	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr.	Digheche Kalthoum	MCA	Université de Biskra	Examineur

Résumé :

L'assemblage par soudage est le moyen le plus répandu dans le domaine industriel, il consiste à assembler deux ou plusieurs corps métalliques en créant une liaison permanente entre eux.

L'assemblage des pipelines par soudure occupe une place très importante dans l'industrie pétrolière, surtout les aciers X70 qui sont plus utilisables vu leur bonne soudabilité par le procédé de soudage SMAW.

Ce travail concerne l'étude de la microstructure optique des différentes zones d'un joint soudé d'acier X70.

Mots clé: soudage, SMAW, microstructure, X70.

ملخص :

تعد عملية التجميع باللحام هو الطريقة الأكثر استخدامًا في القطاع الصناعي، فهو يقتضي على جمع جسمين معدنيين أو أكثر عن طريق إنشاء رابطة دائمة بينهم. ان تجميع الانابيب بطرق التلحيم يحتل مكانة هامة في الصناعة البترولية و بالأخص المعادن ذات المرونة العالية X70 والتي تستخدم نظرا لجودة قابلية تلحيمها بطريقة SMAW. يتعلق هذا العمل بدراسة البنية الدقيقة البصرية للمناطق المختلفة لفولاذ X70.

الكلمات المفتاحية: اللحام، SMAW، البنية الدقيقة، X70.

Remerciements

Je remercie Allah, le Tout Puissant, le Miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de ce mémoire.

Également, mon encadreur de projet de fin d'étude Dr CHÉRIFI-BENNADJI Nedjema, docteur à l'université Mohamed Khider Biskra, pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité.

Ma gratitude s'exprime pareillement pour Dr Ghebghoub Fatima, présidente du jury.

Également, je remercie Dr Digheche Kalthoum membre du jury pour la pertinence de ses remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

Je remercie également tous les enseignants du département de chimie industrielle de l'université Mohamed Khider - Biskra, qui ont participé à ma formation pendant tout mon cycle universitaire.

Je remercie également tous les responsables de l'entreprise COSIDER – BISKRA pour leurs accueils, aides, et en particulier l'équipe de l'atelier de soudage par SMAW qui ont effectués la totalité des prélèvements des échantillons au cours de la production.

Enfin, je ne peux oublier de remercier les membres du laboratoire de métallurgie de l'université Mohamed Khider, Biskra.

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire de Master:

À ma mère Meriem

À mon père Mahboub

À ma sœur Karima

À mes familles : ABASSI & LAKHAL

À tous mes amis et collègues

À tous les enseignants au long de mon cycle d'étude.

Sommaire

SOMMAIRE

Sommaire.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures.....	iii
Liste des abréviations.....	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur le soudage

I. Le soudage.....	3
I.1. Définition.....	3
I.2. Formes de soudage.....	3
I.3. Différents types d'un assemblage en soudage.....	3
I.4. Métaux d'apport.....	4
I.5. Technique de soudage.....	5
I.5.1. Procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobé (SMAW).....	6
I.5.2. Les différents types d'électrodes enrobées.....	6
I.6. Caractéristiques de la soudure.....	8
I.6.1. La zone fondue.....	8
I.6.2. La zone affectée thermiquement.....	8
I.6.3. La zone liaison.....	8
I.6.4. Le métal de base.....	8
I.7. Les avantages et les inconvénients du soudage SMAW.....	9
I.8. Préparation des joints.....	9
I.9. Méthodes de réalisation d'un joint soudé.....	10
I.10. Vitesse de soudage.....	12
I.11. Aspects métallurgiques du soudage.....	12

Chapitre II : Généralités sur les aciers

II. Généralité sur les aciers.....	14
II.1. Définition.....	14
II.2. Types des aciers.....	15
II.3. Aciers HSLA.....	15
II.4. Tubes en aciers de pipelines.....	16
II.5. Les aciers utilisés pour fabriquer les pipelines.....	17
II.6. Diagramme d'équilibre.....	18
II.7. Les principales phases de diagramme de phase.....	19
II.7.1. La ferrite.....	19
II.7.2. La cémentite.....	20
II.7.3. La perlite.....	21
II.7.4. L'austénite.....	21
II.7.5. La martensite.....	22
II.7.6. Le point eutectoïde.....	22

Chapitre III : La microstructure d'un joint soudé X70

III. La microstructure.....	24
III.1. Classification des microstructures des aciers soudés.....	24
III.2. Nomenclature d'acier X70.....	26
III.3. La microstructure de la soudure des pipelines l'acier X70 soudé.....	26
III.4. Microstructure de l'acier X70.....	27
III.5. Essais de résilience et de dureté.....	28

Chapitre IV : Etude expérimentale

IV.1. Métal de base.....	33
IV.1.1. Présentation du métal de base.....	33
IV.1.2. Identification du métal de base.....	33
IV.1.3. Propriétés mécanique.....	34
IV.1.4. Composition chimique.....	34
IV.2. Métal d'apport.....	34
IV.3. Conditions de soudage.....	34
IV.4. Méthodes expérimentales.....	35
IV.4.1. Préparation de l'échantillon.....	35
IV.4.2. Opération de découpage.....	35
IV.4.3. Opération de polissage.....	36
IV.4.4. Attaque chimique.....	37
IV.4.5. MO (Microscope optique).....	37
Conclusion générale.....	39
Références.....	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Les résultats de l'essai de résilience pour chaque zone.....	30
Tableau III.2 : Résultats d'essai HV (les unités sont en Kg/mm^2).....	31
Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques de l'acier X70 selon l'API5L.....	34
Tableau IV.2 : Composition chimique de l'acier X70.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Les différents types d'assemblage.....	4
Figure I.2 : Comparaison des électrodes et des fils-électrodes pour les procédés SMAW, GMAW, FCAW et MCAW.....	4
Figure I.3 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie.....	5
Figure I.4 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	6
Figure I.5 : Présentation macrographique d'un joint soudé.....	9
Figure I.6 : Formation d'une piscine de la soudure.....	11
Figure I.7 : Solidification de métal de la soudure.....	11
Figure II.1 : Mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C).....	14
Figure II.2 : Pipelines.....	17
Figure II.3 : Diagramme d'équilibre Fe-C métastable ou à cémentite.....	19
Figure II.4 : Structure ferritique.....	20
Figure II.5 : Structure cémentite.....	20
Figure II.6 : Structure perlitique.....	21
Figure II.7 : Structure austénitique.....	22
Figure II.8 : Structure martensitique.....	22
Figure III.1 : Micrographies optiques montrant plusieurs constituants microstructuraux trouvés dans les aciers soudés faiblement alliés et à faible pourcentage en carbone.....	25
Figure III.2 : Microstructure ferrito-perlitique de l'acier API 5L X70, plan LT.....	27
Figure III.3 : Micrographie dans une section transversale du tuyau X70-Grossissement 500 (E2).....	28
Figure III.4 : a) Mouton Charpy (Alpha-Pipe, Annaba) (b) éprouvette Charpy V selon la norme EN 10045-1.....	29
Figure III.5 : Configuration des éprouvettes des résiliences et de micro dureté.....	29
Figure III.6 : Eprouvette de résilience en état final.....	30
Figure III.7 : Préparation de l'échantillon. (a) Découpage (b) Polissage et (c) état finale des éprouvettes.....	30
Figure III.8 : Procédure et machine de dureté (Type Vickers).....	31
Figure III.9 : positionnements des indentations selon la norme NF EN ISO 9002.....	31
Figure III.10 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones.....	32
Figure IV.1 : Un joint soudé par SMAW d'X70, fournis par COSIDER, Biskra.....	33
Figure IV.2 : Électrode enrobée.....	34
Figure IV.3 : Poste de soudure.....	35
Figure IV.4 : Appareil de découpage : scie électrique.....	36
Figure IV.5 : Polisseuse de type PHOENIX ALPHA de m arque ANALIS.....	36
Figure IV.6 : Polisseuse à disque en feutre de marque MICAPOL P310.....	37
Figure IV.7 : Microscope optique de marque OLYMPUS.....	38

LISTE DES ABREVIATIONS

SMAW : Shield metal arc welding.

GMAW : Gas metal arc welding.

FCAW : Flux-cored arc welding.

MCAW : Metal-Cored Arc Welding.

GTAW : Gas tungsten arc welding.

EE : électrode enrobée.

ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

U_0 : Tension à vide.

V : Volt.

ZF : Zone fondu.

ZAT : Zone affectée thermiquement.

ZL : Zone de liaison.

KJ : Kilo Joule.

A : Ampère.

Q : Apport calorifique [KJ/cm].

I : Courant [A].

U : Tension [V].

V : Vitesse de soudage [cm/min].

CC : Cubique centrée.

CFC : Cubique à face centrée.

HSLA : High Strength Low Alloy (Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique).

MPa : Mégapascal.

Re : la limite d'élasticité.

Rm : la résistance à la traction.

γ : Austénite.

α : Ferrite.

Fe_3C : Cémentite.

$\alpha + Fe_3C$: Perlite.

°F : Degré Fahrenheit.

GF : Grain de Ferrite.

PF : Ferrite Polygonale.

WF : Ferrite de Widmenstätten.

AF : Ferrite aciculaire.

UB : Bainite Supérieure.

LB : Bainite Inférieure.

M : Martensite.

API : American Petroleum Institute.

μm : Micromètre.

MEB : Microscope électronique à balayage.

J : Joule.

MD : Métal d'apport.

DL : direction de laminage.

NF : Norme Française.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Parmi les procédés d'assemblage, 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 [Deb18].

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique et thermomécanique [Deb18].

Les techniques d'assemblage des matériaux métalliques sont en constante évolution. Afin de réaliser une parfaite continuité entre les matériaux assemblés, il est important de contrôler la soudure et réparer tout défaut [Maa16].

Les pipelines sont des outils essentiels pour le transport des hydrocarbures à haut débit sur de grandes distances. Ils sont utilisés comme l'un des plus pratiques et des plus basses méthodes de tarification pour les grands transports de pétrole et de gaz depuis 1950 [Had11].

Jusqu'à présent, ce moyen de transport joue un rôle important dans les industries du pétrole et du gaz puisqu'il est peut-être le plus économique et le plus efficace moyen de transport des fluides à grande échelle pour le pétrole brut et le gaz naturel [Taw13].

Le transport pétrolier dans les conditions de production nécessite l'utilisation de pressions très élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite élastique HSLA avec des bonnes soudures. De plus, la sécurité des installations soudées demande une bonne propriété mécanique pour éviter l'éclatement et l'endommagement des pipelines [Ben12].

De nos jours, l'industrie pétrolière porte un grand intérêt à la caractérisation de soudage des pipelines, ce type d'assemblage se distingue particulièrement par des zones d'hétérogénéités, qui reflètent des microstructures et des caractéristiques mécaniques très différentes, il est alors nécessaire de les identifier afin de les prendre en compte lors de l'installation du réseau de gazoducs [Ben12].

L'objectif de notre travail est d'étudier la microstructure d'un joint soudé par SMAW d'acier X70. Les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de soudage par SMAW, société nationale COSIDER CANALISATION, base Oumech-Biskra, où deux tubes (pipelines) d'acier de nuance X70 ont été assemblés par

soudage en multi-passes manuel à l'arc électrique, selon le procédé de soudage avec électrodes enrobées (SMAW).

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- ✓ Le premier chapitre rassemble des informations bibliographiques sur le soudage.
- ✓ Le deuxième chapitre traite des généralités sur les aciers.
- ✓ Dans le troisième chapitre une étude théorique sur la microstructure d'un acier X70.
- ✓ Le quatrième chapitre assemble les travaux expérimentaux réalisés.

Ce travail se termine par une conclusion générale où on résume les principaux travaux obtenus et on énumérera les perspectives de ce travail.

CHAPITRE I

Généralités sur le soudage

Introduction :

Ce chapitre présente des notions générales sur le soudage et explique les différents types d'assemblage et procédés, précisément le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW), cela va nous permettre de connaître les zones essentielles d'un joint soudé.

I. Le soudage :**I.1. Définition :**

C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport [Abd18].

I.2. Formes de soudage [Abd18] :

On désigne trois formes de soudage :

- **Soudage homogène** : les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique et lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique semblable à celle du matériau de base.
- **Soudage hétérogène** : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente.
- **Soudage autogène** : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint.

I.3. Différents types d'assemblage par soudage :

Les assemblages soudés sont généralement classés en fonction des dispositions relatives des éléments assemblés. On distingue les assemblages suivants [Méc00] [Méc97]:

- **Assemblage bout à bout** : La soudure bout-à-bout est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle. Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égale à 5 mm (Figure I.1 : a) [Bel17].
- **Assemblage en coin** : L'assemblage en coin est particulièrement difficile à réaliser. La tolérance sur le jeu entre les deux pièces doit être sévère (Figure I.1 : b).

- **Assemblage en angle** : Cet assemblage est surtout utilisé pour la fixation des raidisseurs sur les panneaux, la préfabrication des profilés reconstitués et dans les pièces mécano soudées. (Figure I.1 : c).

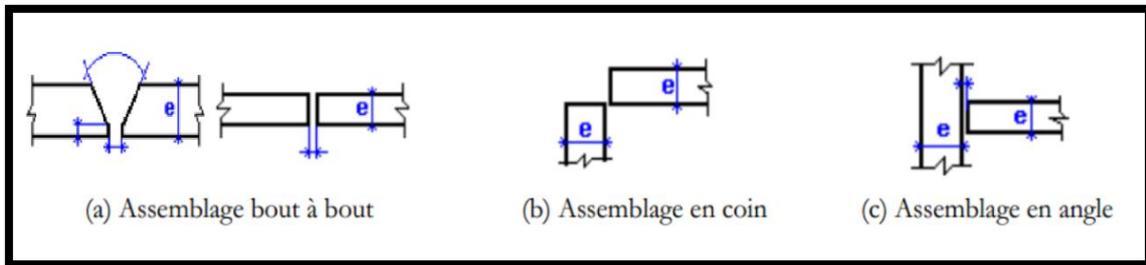


Figure I.1 : Les différents types d'assemblage [Cha05].

I.4. Métaux d'apport :

Le métal d'apport provient généralement d'une électrode enrobée pour le procédé SMAW, d'un fil-électrode dans le cas des procédés GMAW, FCAW et MCAW (Figure I.2) ou d'une baguette pour le procédé GTAW. La classification des métaux d'apport permet de connaître leur résistance à la traction, leur composition chimique, la résilience du métal déposé et les positions de soudage possibles [Csm06].

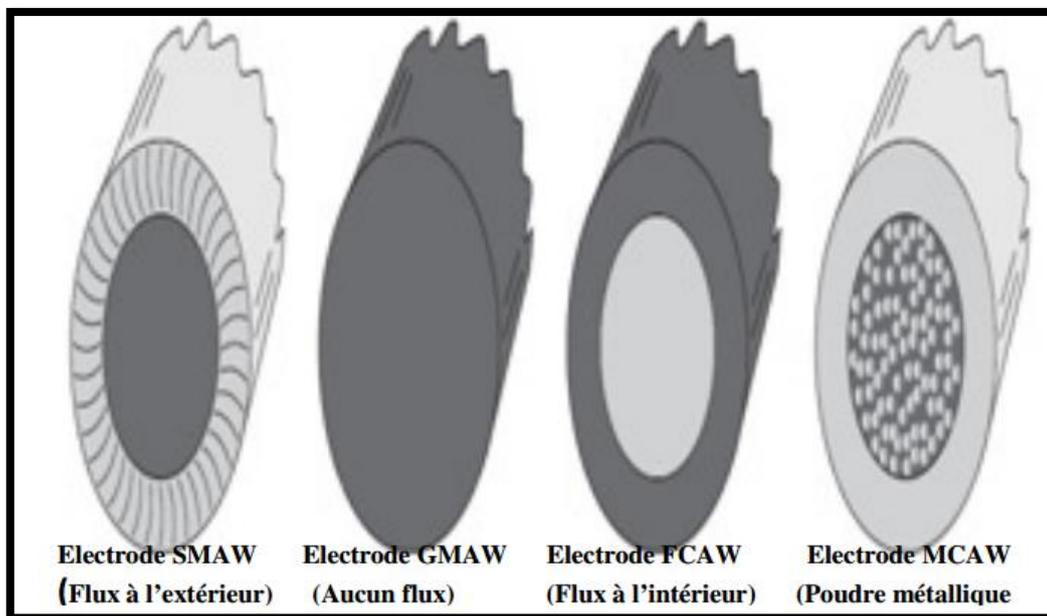


Figure I.2 : Comparaison des électrodes et des fils-électrodes pour les procédés SMAW, GMAW, FCAW et MCAW [Csm06].

I.5. Technique de soudage:

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de types chimiques, électriques, optiques ou mécaniques [Kec13].

On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre [Kec13].

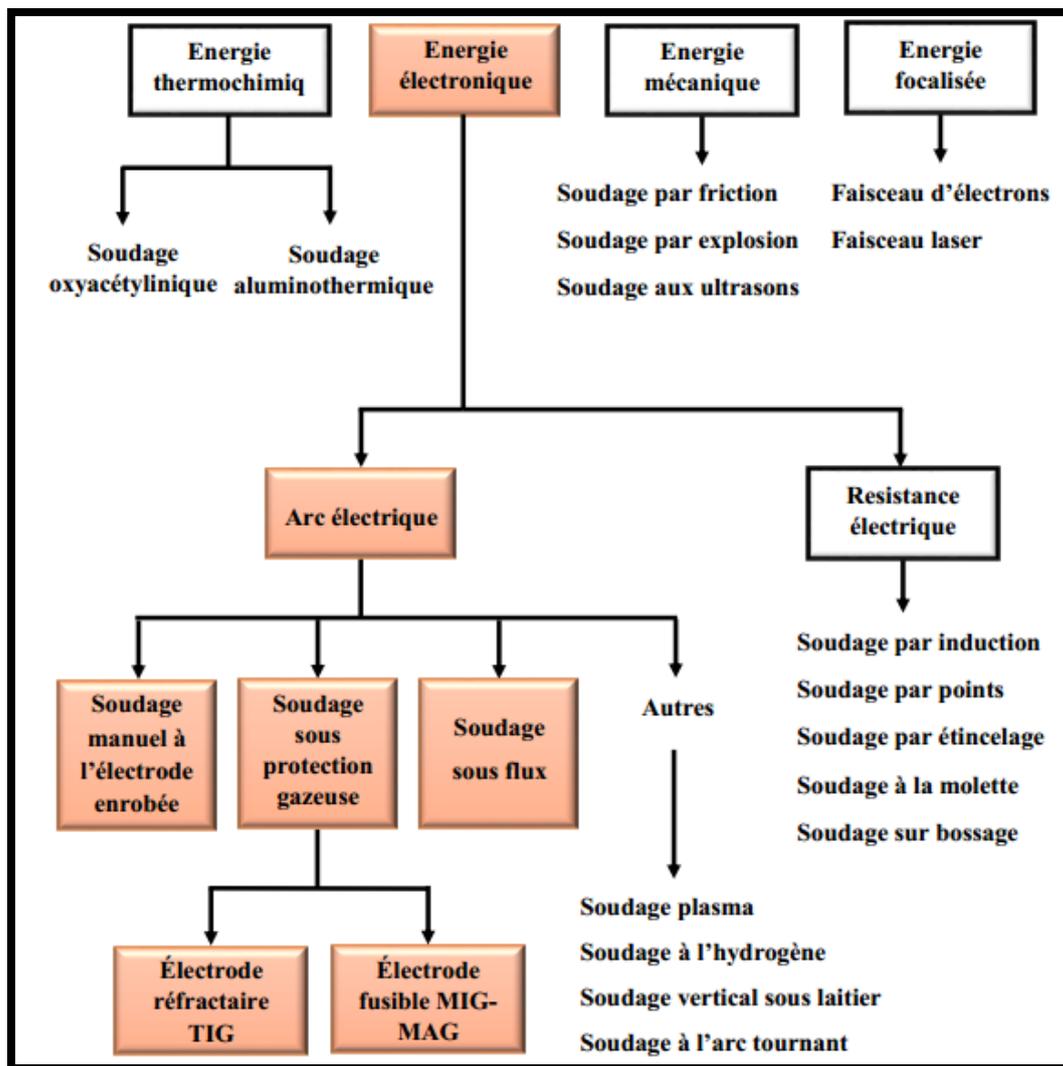


Figure I.3 : Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie [Kec13].

I.5.1. Procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (EE) (procédé 111 selon l'ISO 4063) [Caz95]. Dans ce procédé, on fait jaillir un arc électrique entre le bout de l'électrode et le métal à souder. L'électrode est constituée d'une âme métallique, recouverte de flux ou d'un revêtement (enrobage). L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage [Abd18].

- **L'âme** : partie métallique (métal d'apport) située au centre de l'électrode pour conduire le courant électrique [Bel17].
- **L'enrobage** : partie extérieure adhérent à l'âme qui dépose lors de sa fusion un laitier protecteur contre l'action de l'air ambiant [Bel17].

Le flux protège de l'air ambiant les ions métalliques de l'arc et assure ainsi la stabilité de l'arc. A mesure que le flux fond, il dégage des fumées et dépose un laitier protecteur sur le métal en fusion [Abd18].

Ce type de soudage est utilisé pour les travaux d'entretien et de réparation effectués sur l'acier doux, l'acier inoxydable, l'aluminium et les métaux non ferreux. Dans les ateliers de soudage, ce type de soudage est peu utilisé [Abd18].

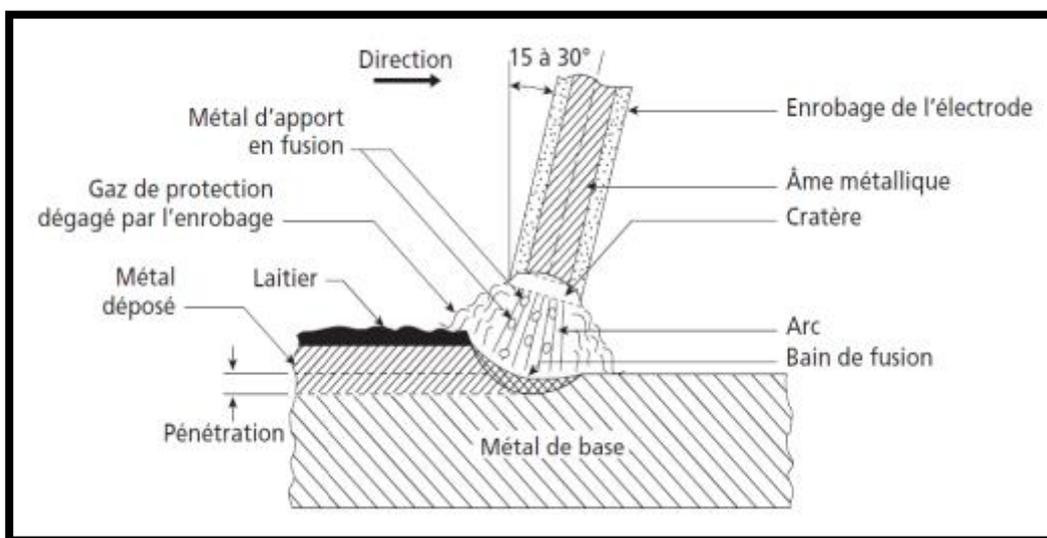


Figure I.4 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) [Gra77].

I.5.2. Les différents types d'électrodes enrobées :

Les différents types d'électrodes enrobées pour le procédé SMAW sont :

- **Enrobage Acide (A)** : Cet enrobage contient du ferro-manganèse, de l'oxyde de fer et de l'oxyde de manganèse. Le laitier est très fluide et abondant. Cet enrobage convient pour le soudage à plat et en gouttière. Il convient mal au soudage en

position. La soudabilité du métal de base doit être bonne si non le métal constituant le joint est sensible à la fissuration à chaud pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression).

- **Enrobage Basique (B)**: Cet enrobage contient principalement du spath-fluor et du carbonate de calcium. Il fournit un laitier calcaire dont l'effet désulfurant est favorable au soudage des aciers ferritiques et il diminue le risque de fissuration à chaud du métal déposé. Ces électrodes nécessitent dans la plupart des cas un étuvage effectué au minimum à 350°C pendant 2 heures sauf prescriptions contraires du fournisseur. La majeure partie de ces électrodes fonctionnent en courant continu avec une polarité inverse (+ à l'électrode). Certaines peuvent fonctionner en courant alternatif à condition d'utiliser un générateur de soudage avec une tension à vide suffisamment élevée $U_0 > 60V$.
- **Enrobage Cellulosique (C)** : Cet enrobage contient une grande quantité de substances organiques comme la cellulose. Il donne peu de laitier mais un souffle à forte teneur en CO_2 . Celui-ci favorise le soudage rapide en position descendante et améliore la pénétration. Comme pour les électrodes basiques, les cellulosiques fonctionnent en courant continu en polarité inverse. La tension à vide doit être au moins égale à 60 Volts pour les soudures à forte pénétration en position descendante.
- **Enrobage Oxydant (O)** : Cet enrobage contient principalement des oxydes de fer et des oxydes de manganèse. Il correspond à des électrodes faciles à amorcer avec un laitier en général auto-détachable. Il s'utilise en courant continu ou alternatif pour des travaux ordinaires sur aciers doux. Les caractéristiques mécaniques du métal déposé étant très médiocres, il ne supporte aucune déformation de l'assemblage à chaud ou à froid.
- **Enrobage Rutile (R)** : Cet enrobage contient une quantité importante d'oxyde de titane. Le laitier obtenu s'élimine facilement. Il permet de souder aisément en toutes positions en courant continu ou alternatif. Les caractéristiques du métal déposé sont bonnes lorsque les aciers de base sont de bonnes qualités et ont des teneurs en carbone ainsi qu'en soufre limitées [Ben07, Ben11, Twi08].

I.6. Caractéristiques de la soudure :

I.6.1. 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, 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 [Fri01].

I.6.2. 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 [Fri01].

I.6.3. La zone liaison :

Nommée Z.L, c'est une zone marquant la frontière entre la zone fondue (Z.F) et la zone affectée thermiquement (Z.A.T). Autrement dit, c'est la limite entre le métal qui s'est solidifié après être fondu et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage [Gra95].

I.6.4. Le métal de base :

Nommé M.B, cette partie de la structure du métal soudé 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 [Ché15].

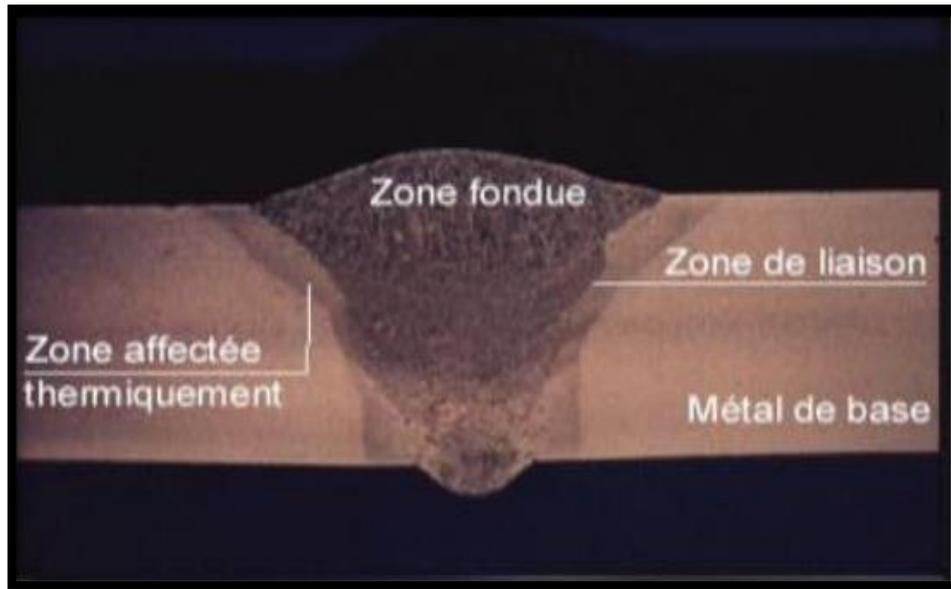


Figure I.5 : Présentation macrographique d'un joint soudé [Var87].

I.7. Les avantages et les inconvénients du soudage SMAW :

Grâce à la simplicité de son principe, le soudage manuel présente les avantages suivant [Deb18]:

- Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux [Kha18].
- Possibilité de soudage d'un large éventail de matériaux sous réserve de trouver l'électrode correspondante.
- Possibilité de souder également une large gamme d'épaisseur (quelques mm à plusieurs centimètres).

Par contre ce type de soudage présente les inconvénients suivants [Deb18]:

- Productivité réduite (nécessité de changer l'électrode, taux de dépôt faible).
- Nécessité d'une main d'œuvre qualifiée.

I.8. Préparation des joints :

L'application permet de souder tous les types de joints. Toutefois, il est important de savoir que généralement, on n'utilise pas de bague d'apport pour le soudage des plaques minces. Dans ce cas, on privilégie un joint à bords relevés pour permettre un assemblage par fusion des bords seulement [Deb18].

Le type de préparation du joint pour un travail donné dépend principalement des facteurs suivants [Deb18]:

- Propriétés requises pour le cordon de soudure.
- Coût de préparation du joint et du dépôt de la soudure.
- Nature du métal de base.
- Dimensions, forme et apparence de l'assemblage à souder.

Il faut aussi tenir compte des considérations suivantes pour le choix du type de joint [Deb18]:

- Nombre de points de soudage et dimensions de ces points.
- Possibilité de réaliser une purge.
- Distance entre les plaques, profondeur et angle du chanfrein, s'il y a lieu.
- Nombre de passes requises.
- Diamètre de la baguette d'apport.
- Méthode d'amorçage de l'arc.
- Position de soudage.
- Possibilité de renforcement du joint (bridage).
- Type d'électrode employée.
- Type de poste de soudage.
- Tolérances de l'assemblage.

I.9. Méthodes de réalisation d'un joint soudé :

Comme on peut le voir sur la figure I.6, un joint soudé s'obtient en faisant fondre des plats en acier ou des profilés (métal de base) le long de la ligne du joint. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal fondu qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base, comme on le voit sur la figure I.7. Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint [Deb18].

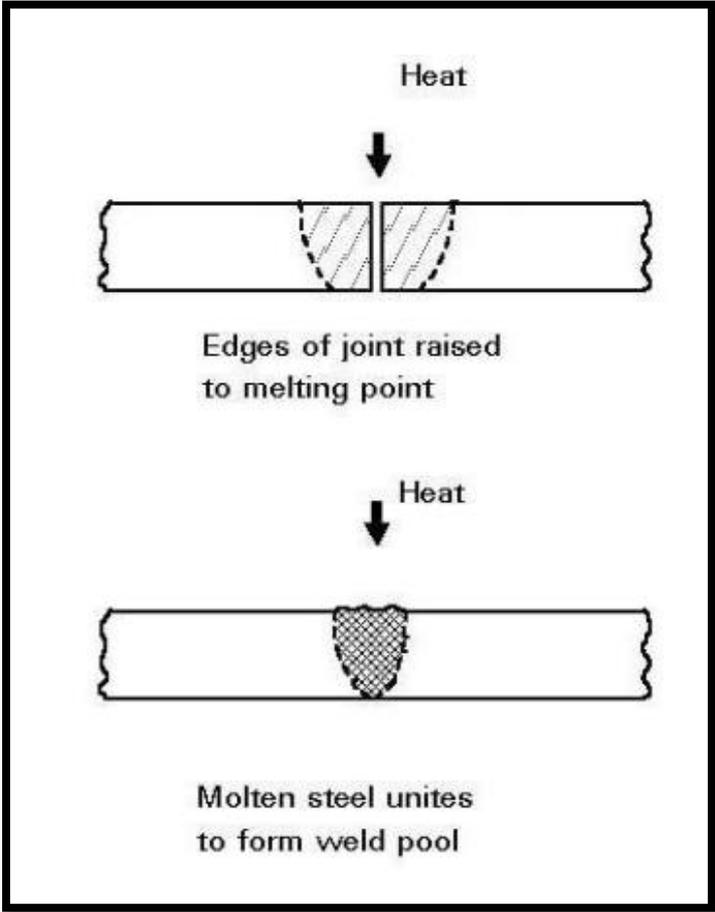


Figure I.6 : Formation d'une piscine de la soudure [Deb18].

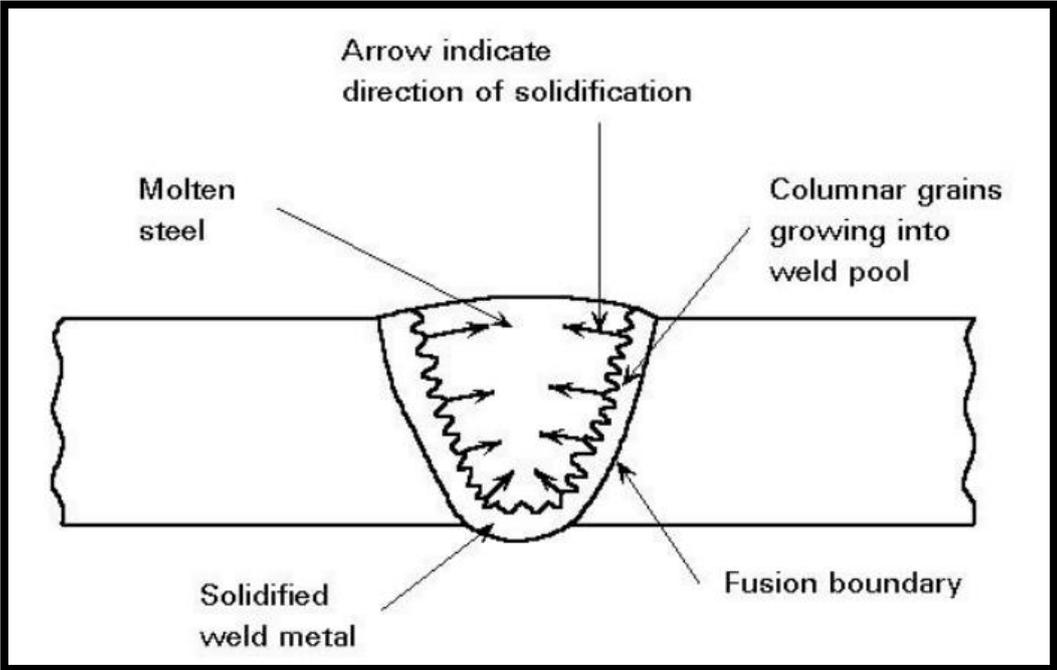


Figure I.7 : Solidification du bain de soudure [Deb18].

I.10. Vitesse de soudage :

L'influence de la vitesse de soudage peut être évaluée par son effet sur l'apport calorifique linéaire de soudage. L'apport calorifique est lié à la vitesse de soudage par la relation :

$$Q = I.U/V \dots \dots \dots \text{I.1}$$

Avec :

Q : Apport calorifique (KJ/cm).

I : Courant (A).

U : Tension (V).

V : Vitesse de soudage (cm/min).

Une augmentation de la vitesse de soudage diminue la quantité de chaleur par unité de longueur de soudure, ce qui aboutit à une diminution de la section de la zone fondue. Cependant, plusieurs auteurs [Nil75] ont constaté que le rendement d'arc est supérieur quand la vitesse de soudage est relativement élevée.

Un chercheur appelé LIPTAK [Sun83] remarque que la diminution de la vitesse de soudage favorise la pénétration. Il précise cependant, que cette diminution doit être très importante pour que l'augmentation de la pénétration puisse être obtenue.

La vitesse de soudage gère aussi la température maximale ainsi que le gradient thermique dans le bain de fusion. L'influence de la vitesse sur la température a été étudiée par un chercheur appelé SUNDELL et al. [Sun85] .En soudage d'un acier laminé à froid. Ils ont remarqué qu'avec le même apport calorifique, l'augmentation de la vitesse de soudage diminue la température maximale et le gradient de température à la surface de la soudure. Ils ajoutent, cependant, que cette diminution peut être également due à l'élargissement de la distribution thermique de l'arc, dépendant lui-même d'un courant de soudage volontairement augmenté en vue de maintenir le même apport calorifique.

I.11. Aspects métallurgiques du soudage :

Au cours du soudage par fusion la structure de solidification en zone de fusion se réalise à partir de la structure du métal solide des zones voisines [Bab91]. La solidification s'établit à l'interface solide-liquide à partir des grains qui se trouve à cette interface. Ces grains servent de substrats à partir desquels la croissance débute et se développe selon la direction du gradient maximum de température. Cette direction de croissance est celle de l'avancée du front de solidification afin de dissiper la

chaleur latente de solidification vers le métal solide avoisinant. La structure d'une soudure est fortement influencée par les cycles thermiques du soudage [Dav03]. La taille et la forme des anciens grains ainsi que les transformations de phase qui se produisent lors du refroidissement sont des caractéristiques essentielles pour définir les propriétés mécaniques des assemblages. Selon la nature des métaux de base à assembler et les cycles thermiques appliqués, les microstructures des cordons de soudure des zones de fusion et des zones affectées thermiquement, présentent des différences de morphologie et des caractéristiques mécaniques [Kha18].

Conclusion :

- ✓ Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Le soudage à l'arc (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique et la pièce à souder [Kha18].
- ✓ Le cordon est obtenu à partir d'un arc électrique s'établissant entre les pièces à souder et une électrode fusible. Le montage est réalisé de telle manière que les électrons circulent de la tôle vers l'électrode, c'est à dire en polarité indirecte [Rüc05].
- ✓ Le joint soudé comporte trois parties : le métal de base, la ZAT et la ZF. Le flux forme le laitier qui, une fois déposé, protège la soudure contre l'oxydation pendant le processus de solidification et de refroidissement. [Kha18].

CHAPITRE II

Généralités sur les aciers

Introduction :

Ce chapitre présente une généralité sur les aciers de construction des pipelines et ses types, en plus d'une explication de diagramme d'équilibre et leurs principales phases.

II. Généralités sur les aciers :

L'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 [Bou16a].

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle «acier». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferroalliages par exemple [Bou16a].

II.1. Définition :

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 outre 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 [Bou16b], la figure II.1 présente les mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C).

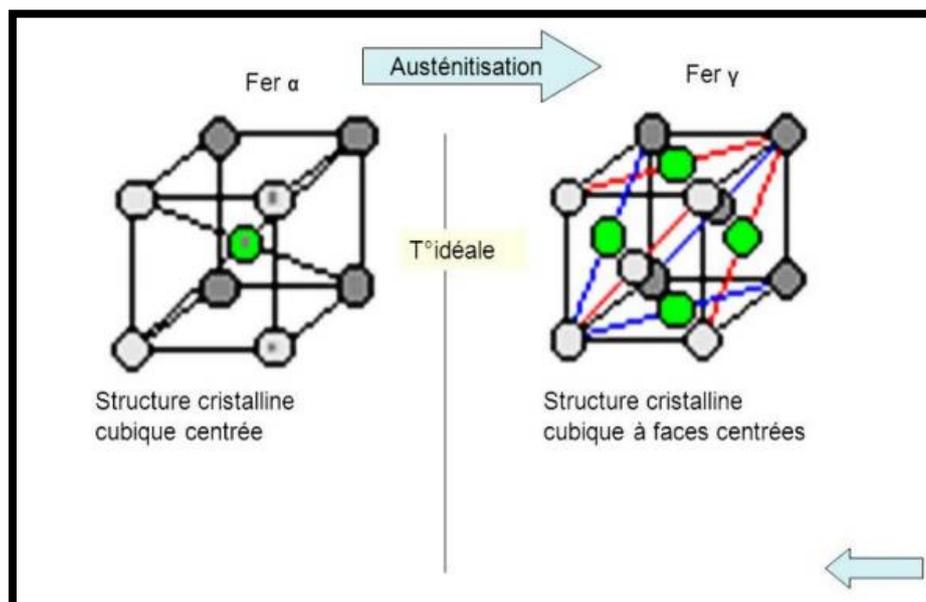


Figure II.1 : Mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C) [Bar16].

II.2. Types des aciers :

Les aciers ont été classés en fonction de deux critères, la composition et le niveau de qualité. Ainsi, on distingue les aciers non alliés (<1% d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage < 5 %) ou très alliés ≥ 5 %. En fonction de la garantie donnée aux propriétés d'usage, les aciers de base, de qualité ou les aciers spéciaux. Ces derniers sont placés dans trois familles [Deb18] :

- les aciers de construction mécanique (peu ou non alliés).
- les aciers à outils (peu ou très alliés).
- les aciers inoxydables.

L'industrie gazo-pétrolière qui représente le moteur de l'économie mondiale, exige au métallurgiste des aciers possédant une bonne combinaison de résistance, ténacité et soudabilité pour les besoins de transport de leur produits [Deb18].

Ces critères ont conduit au développement d'aciers à bas carbone appelé HSLA (acier à haute limite élastique) [Deb18].

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre des limites d'élasticité plus supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé [Deb18].

Ces aciers ont de meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone laminés. D'ailleurs, parce que la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [Hul97].

II.3. Aciers HSLA :

Les aciers HSLA, ont été développés dans une large gamme de limite d'élasticité, de niveau 315 à 700 MPa en lamination à chaud et de niveau 240 à 355 MPa en lamination à froid.

Ce sont des aciers doux et extra doux auxquelles on ajoute de faibles quantités des éléments notamment (Nb, Ti, V, Al) afin de piéger le Carbone et l'Azote sous formes de carbures et nitrures, et pour cela sont dénommés les aciers micro-allié [Hig90].

Les aciers H.S.L.A peuvent être divisés en six catégories [Deb18] :

- Aciers résistants à la corrosion.
- Aciers laminés à structure perlitique.
- Aciers à ferrite aciculaire.

- Aciers dual-phase.
- Aciers à forme d'inclusion contrôlée.
- Aciers à ferrite-perlitique.

II.4. Tubes en aciers de pipelines :

Un pipeline (originaire de l'anglais) est une canalisation formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, destinée à l'acheminement d'un endroit à un autre de matières gazeuses ou liquides. Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions [Bou17].

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres, voir des milliers de kilomètres [Bou17].

Selon le produit transporté, les pipelines sont nommés différemment. Leurs techniques de construction et d'exploitation diffèrent en fonction de certaines réglementations [Bou17].

Les principaux systèmes de transport par pipeline concernent [Bou17] :

- Les gazoducs pour le transport du gaz naturel.
- Les oléoducs pour le transport du pétrole et des hydrocarbures liquides.
- Les aqueducs (les canaux) conduites ou émissaires utilisés pour l'eau douce et l'irrigation.



Figure II.2 : Pipelines [Pin09].

II.5. Les aciers utilisés pour fabriquer les pipelines :

Le transport à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grande résistance capables de résister à des pressions très élevées [Kha18].

On a eu recours à de nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques améliorées.

C'est ainsi qu'on a vu apparaître les nuances X60, X65, X70, X80 et même X100.

Les types d'aciers utilisés pour les tubes peuvent être divisés en deux groupes [Kha18] :

- aciers au carbone faiblement alliés.
- aciers à faible teneur en carbone.

Dans le premier groupe, on trouve les aciers dits ferrito-perlitique tels que le X42 jusqu'au X52 selon les normes API, renfermant jusqu'à 0,3 %C, 1,6 %Mn, 0,7 %Si [Kha18].

Dans le deuxième groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques faiblement microalliés à plus basse teneur en carbone tels que le : X56, X50, X65, X70 et X80 renfermant 0,12 %C, 0,45 %Si, 0,25 %S, 1,9 %Mn, 0,1% V, 0,1 %Nb, 0,015 %Al [Kha18].

Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinées à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier obtenu par laminage contrôlé. Les propriétés mécaniques peuvent être modifiées en jouant sur la structure en affinant entre autre la structure des tôles laminées (affinement des grains). Ce procédé est reconnu comme permettant d'améliorer à la fois les caractéristiques de traction R_e et/ou R , ainsi que la température de transition. Ces dernières années le procédé de laminage contrôlé a été complété par le refroidissement accéléré, un arrosage à l'eau à des vitesses de refroidissement suffisamment élevées [Bou07], afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des tôles, permettant d'accroître ainsi la résistance de l'acier jusqu'à 700 MPa [Kha18].

II.6. Diagramme d'équilibre :

Le diagramme d'équilibre est une représentation graphique indiquant la composition des phases et la structure d'alliage Fe-C, élaboré sous la pression ordinaire supposant des vitesses de chauffage et de refroidissement extrêmement faibles [Auz04].

Les domaines de solubilité du carbone sont désignés par γ et α respectivement, la solubilité étant très faible à l'état α contrairement à l'état γ qui est plus grande, ce qui explique l'étendue du domaine γ par rapport au domaine α qui est extrêmement réduit [Zao09].

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles [Wil01].

Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région [Gue16].

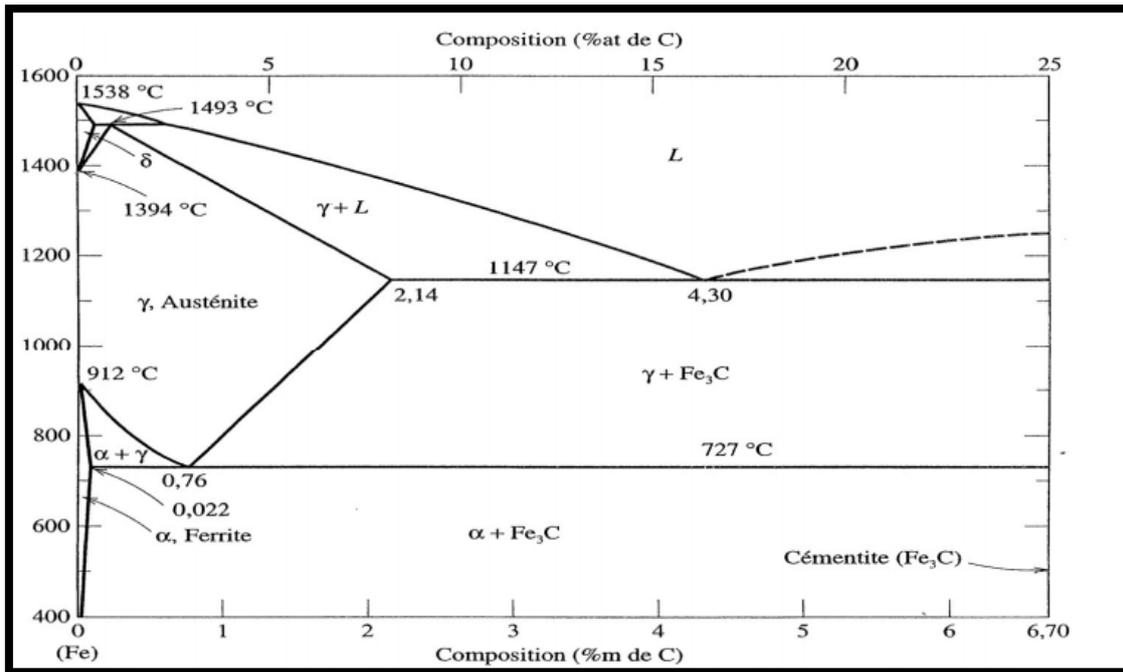


Figure II.3 : Diagramme d'équilibre Fe-C métastable ou à cémentite [Hat13].

- Fer : %C < 0,008%, phase α . [Hat13]
- Aciers : %C < 2,14%, phase α et Fe_3C . [Hat13]

En pratique : %C < 1%

- Pour un acier eutectoïde (%C = 0,76), l'austénite γ solide se transforme totalement en perlite ($\alpha + Fe_3C$) [Gue16].
 - Pour un acier hypoeutectoïde (%C < 0,76), l'austénite γ solide se transforme en $\alpha + (\alpha + Fe_3C)$ [Gue16].
 - Pour un acier hypereutectoïde (%C > 0,76), l'austénite γ solide se transforme en perlite ($\alpha + Fe_3C$) + cémentite (Fe_3C) [Gue16].
- Fontes : 2,14% < %C < 6,70%, phase α et Fe_3C [Hat13].

En général : 2,14% < %C < 4,5%.

II.7. Les principales phases de diagramme de phase :

II.7.1. La ferrite :

Cette phase contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite α ou fer α . Cette phase contient un maximum de 0,02 % de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température

ambiante, la quantité de carbone diminue. La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace (figure II.4) [Ach17].



Figure II.4 : Structure ferritique [Ach17].

II.7.2. La cémentite :

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe_3C . Elle contient 6.69% de carbone, à cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la figure II.5. Comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer [Bou13].

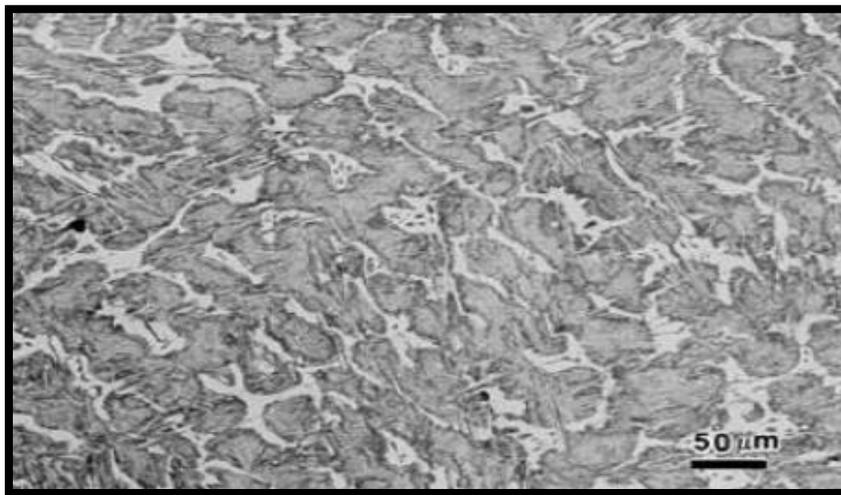


Figure II.5 : Structure cémentite [Ach17].

II.7.3. La perlite :

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite ($\alpha+Fe_3C$). Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure.

La perlite pure se forme à $727^{\circ}C$ ($1341^{\circ}F$), et contient 0.76 % de carbone. Cette phase comporte toujours 0.76% de carbone. Pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.76 % de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite (figure II.6) [Ach17].



Figure II.6 : Structure perlitique [Ach17].

II.7.4. L'austénite :

L'austénite est une solution solide présente au-dessus de $727^{\circ}C$ ($1341^{\circ}F$) et en dessous de $1538^{\circ}C$ ($2800^{\circ}F$), elle a une structure cubique face centrée (4 atomes par mailles). Le paramètre de maille de cette structure est de $3,58 \text{ \AA}$ ($10^{-10}m$) et elle est compacte à 74 % (26 % de vide par maille). Le paramètre de maille est plus grand que celui de la ferrite ($2,87 \text{ \AA}$) qui a une structure cubique centrée (2 atomes par maille, compacte à 68 %). Quand le changement de phase commence, il y a un changement de coefficient directeur de la droite de dilatation (coefficient thermoélastique) qui entraîne un changement de volume jusqu'à la fin de la transformation vu que l'austénite à une structure plus compacte que la ferrite (figure II.7) [Aus16].

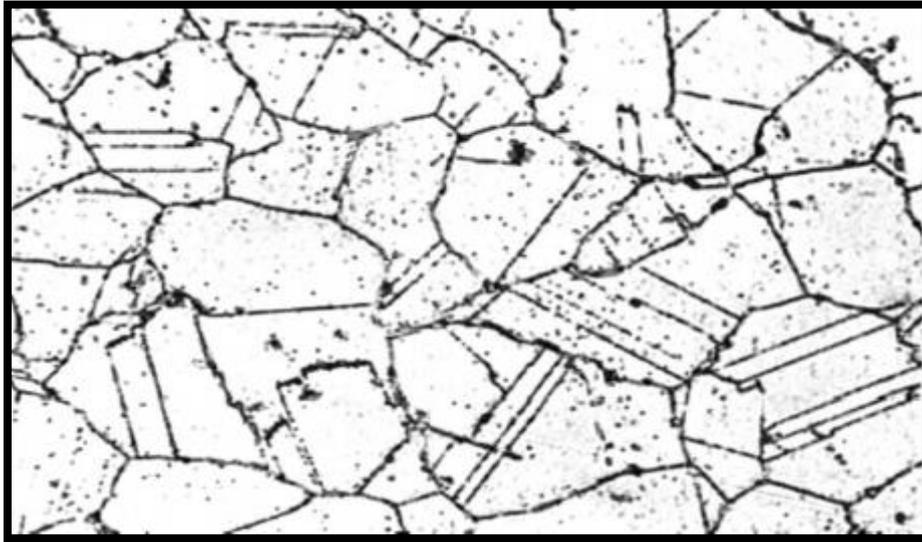


Figure II.7 : Structure austénitique [Ach17].

II.7.5. La martensite :

La martensite est une phase obtenue à partir de l'austénite par refroidissement. En effet, à partir d'une maille d'austénite C.F.C (structure Cubique à Face Centrée), une maille de martensite quadratique centrée est obtenue avec les atomes de carbones qui se placent entre les atomes de fer pour le modèle de Bain (figure II.8) [Aus16].

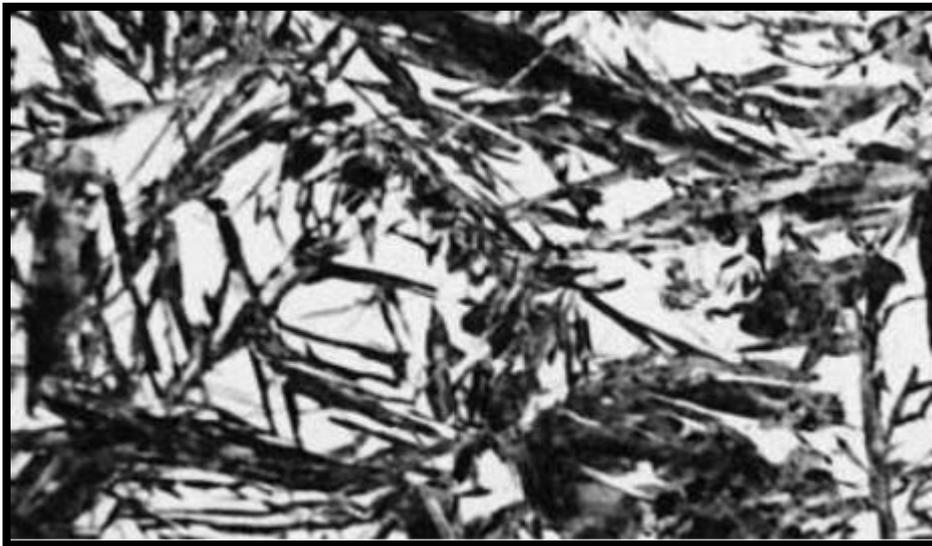


Figure II.8 : Structure martensitique [Aus16].

II.7.6. Le point eutectoïde :

Le point eutectoïde, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.76% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme [Hic19].

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes. La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes. La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite [Bou13].

Conclusion :

- ✓ L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Les types d'aciers utilisés pour les tubes sont : aciers au carbone faiblement alliés, aciers à faible teneur en carbone.
- ✓ L'acier X70 possède une grande ductilité et bonne ténacité, ce qui convient pour les pipelines.
- ✓ Le diagramme d'équilibre est le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires, il comporte en phases : ferrite, perlite, austénite, cémentite, martensite, le point eutectoïde.

CHAPITRE III

La microstructure d'un joint soudé X70

III. La microstructure :

III.1. Classification des microstructures des aciers soudés :

La classification détaillée des différents constituants existant dans les microstructures obtenues par opération de soudage des aciers à bas carbone et faiblement alliés, est effectuée particulièrement à partir de la transformation de l'austénite en ferrite. C'est ainsi qu'une large variété de microstructures peuvent se développer en fonction du degré de refroidissement et de la composition chimique de l'acier en question [Kha18].

Après transformation, la microstructure formée à partir d'un grain austénitique (primaire) devient une mixture de deux ou plusieurs constituants arrangés approximativement dans un ordre de transformation thermiquement décroissant et bien défini [Der11] :

Selon O. Grong [Gro86], l'ordre des transformations thermiquement décroissant est comme suit :

- Grain de Ferrite ou ferrite aliotriomorphe notée FG en anglais (GF).
- Ferrite Polygonale ou ferrite Equiaxe Notée FP en anglais (PF).
- Ferrite de Widmenstätten notée FW en anglais (WF).
- Ferrite aciculaire notée FA en anglais (AF).
- Bainite Supérieure notée BS en anglais (UB).
- Bainite Inférieure notée BI en anglais (LB).
- Martensite notée M en anglais (M).

Les microstructures citées ci-dessous sont représentées dans la Figure III.1.

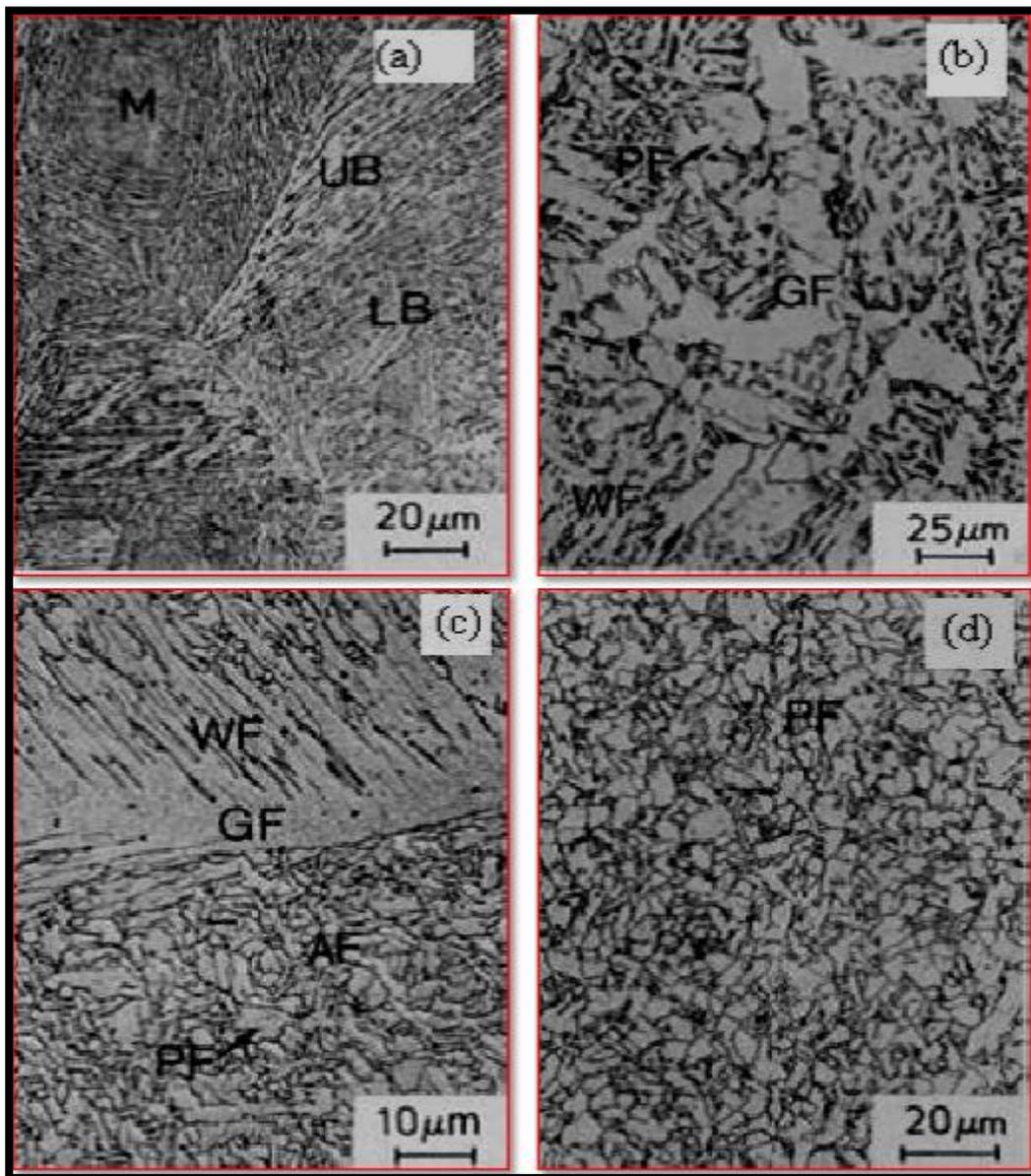


Figure III.1 : Micrographies optiques montrant plusieurs constituants microstructuraux trouvés dans les aciers soudés faiblement alliés et à faible pourcentage en carbone [Gro86]. (a) Grain grossier de la ZAT (soudage réalisé à basse chaleur), (b) Grain grossier de la ZAT (soudage réalisé à haute chaleur), (c) Dépôts du métal soudé (soudage réalisé à basse chaleur) et (d) Réchauffage du métal soudé (soudage réalisé à basse chaleur) [Kha18].

III.2. Nomenclature d'acier X70 [Dje19] :

Le matériau utilisé comme électrode de travail est un acier au carbone utilisé pour le transport des hydrocarbures de nomination API 5L X70, est répond à la spécification imposée par la norme API.

La norme API (American Petroleum Institute) est conçue pour être admissible à l'industrie de pétrole selon les exigences de la législation et de l'environnement. L'acier API 5L X70 est désigné par sa limite élastique (70).

- API 5L signifie : pipeline.
- X70 signifie : le grade de l'acier. Les autres grades sont, par exemple, A, B, X60, X70.
- Le chiffre 70 signifie : 70000 psi, c'est la limite élastique de l'acier en psi «pound per square inch » (livre par pouce carré).

III.3. La microstructure de la soudure des pipelines l'acier X70 soudé :

Le soudage entraîne des modifications des propriétés des matériaux dans la région affectée thermiquement (ZAT) [Sun11]. De plus, la distribution et la densité des dislocations dans l'acier sont affectées, de même que la plasticité de l'acier. De plus, les modifications de la répartition des contaminants affectent essentiellement les propriétés du joint [Hir19].

Sur la base de la connaissance du mécanisme et de la cinétique de ces changements, il est possible d'envisager en détail les propriétés attendues des régions affectées thermiquement. Cependant, la majorité des joints soudés sont des systèmes qui associent, le long de la région affectée thermiquement, le métal soudé à ses aspects structurel, sous structurel et de dislocation. La plasticité de la zone affectée par la chaleur, identique à celle du métal soudé, est plus difficile à contrôler. Par conséquent, ces régions sont devenues un maillon faible des pipelines. Les phases de base pouvant être considérées dans les pipelines en acier soudé sont la ferrite, la perlite, la martensite et l'austénite. Autres phases telles que sorbide, bainite. La microstructure la plus couramment observée dans le dépôt de soudure d'acier à faible teneur en carbone est la ferrite acrylique [Sun11][Lee00].

Les aciers de type X60, X65, X70 présentent une microstructure de type ferritoperlitique. Les bandes de perlite marquées dans les aciers de type X60, X65, X70 expliquent la sensibilité de ces aciers à la fissuration. Cette microstructure en bandes favorise la propagation des fissures [Had13].

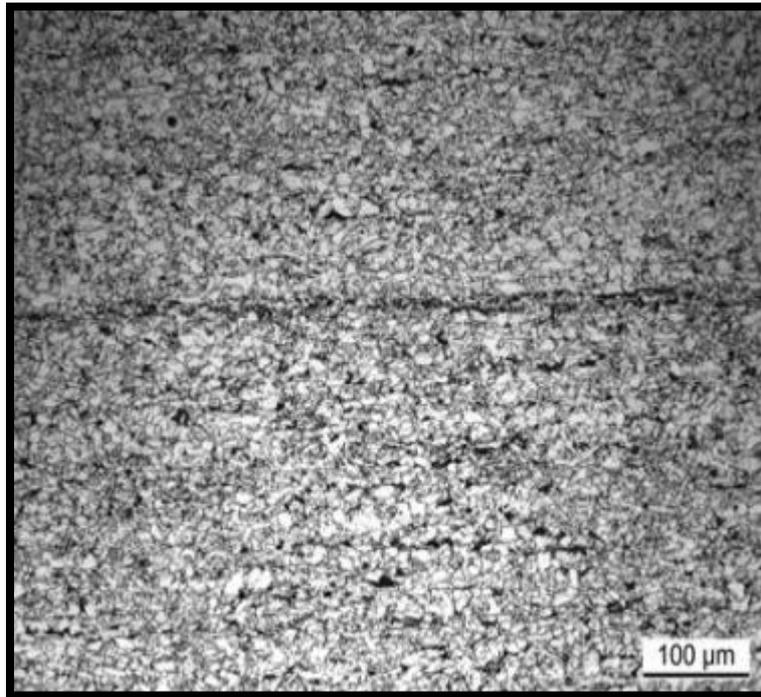


Figure III.2 : Microstructure ferrito-perlitique de l'acier API 5L X70, plan LT [Sma08].

III.4. Microstructure de l'acier X70 :

À l'aide des microscopies optique et électronique, la microstructure des aciers a été étudiée. Les surfaces observées ont été polies jusqu'à 1 µm, nettoyées à l'acétone et séchées. La présence d'inclusions, non métalliques, pouvaient être observée directement sur les surfaces polies [Bou15].

Une attaque chimique ou électrochimique est effectuée, pour visualiser les différentes phases de la microstructure. Les aciers au carbone sont attaqués par le Nital (4% solution de HNO_3 dans l'éthanol) pendant quelques secondes. Après cette attaque, la ferrite apparaît au microscope optique comme une phase blanche, la perlite est plus foncée alors qu'au microscope électronique à balayage (MEB), les grains de ferrite sont foncés et la perlite est claire.

Les données disponibles sur l'acier X70 dans les publications récentes montrent qu'il existe un large spectre d'aciers répondant aux critères de composition prévus pour cette désignation. Il convient donc d'identifier plus en détail les paramètres caractérisant l'acier dont les échantillons sont obtenus. Une section dans le plan perpendiculaire à l'axe du tube, a permis d'observer la microstructure qui se compose essentiellement de grains de ferrite polygonale (blanc) et de perlite (en foncé) organisés en bandes. Ce type

de microstructure est engendré par la ségrégation des éléments Mn et P lors du laminage, elle est très courante pour les aciers X70 [Car08][Bul06].

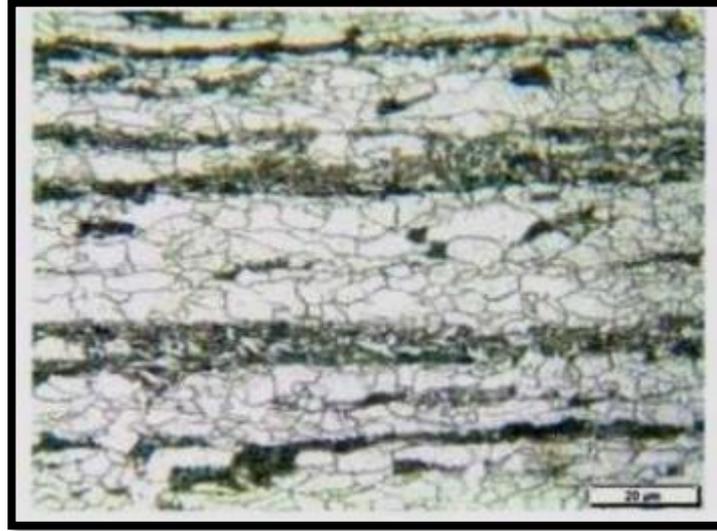


Figure III.3 : Micrographie dans une section transversale du tuyau X70-Grossissement 500 (E2) [Bou15].

III.5. Essais de résilience et de dureté :

Les caractérisations mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent être insuffisante car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières rendant le matériau à l'état fragile.

L'essai de résilience est un complément essentiel de l'essai de traction. L'essai de flexion par choc, nommé aussi de résilience, sur éprouvette entaillée Charpy a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale [Kof13] [Bou11].

Ces essais ont été effectués sur un mouton Charpy V comme le montre la figure III.4, dont la capacité maximale est de 300J, à une température ambiante au laboratoire d'ALFAPIPE.

Douze (12) éprouvettes ont été préparées : trois éprouvettes usinés a partir de métal de base (MB), trois autres prisent au niveau du cordant de soudure (ZF) et les six dernières éprouvettes prélevées dans la zone affecté thermiquement (ZAT), figure III.5, une configuration des éprouvettes des résiliences et de micro dureté est présentée dans la figure III.5. Les dimensions de l'éprouvette sont données dans la figure III.4, ainsi que la photographie du pendule de Charpy.

La variation d'énergie de rupture, Energie absorbé par l'éprouvette, dans les trois zones est très importante, la valeur moyenne la plus importante est obtenue dans la zone

ZAT, suivi de celle du métal de base puis de celle de la zone fondue. Pour les essais de dureté, une plaque rectangulaire a été extraite dans l'état final dans le sens de laminage (DL), figure III.7.c.

Dans cette partie, la variation de la dureté dans les trois zones (MB, ZAT, ZF) a été mesurée avec la machine (ZAWICK) Z HV10, Figure III.8, étalonnée et certifiée, du laboratoire ALFA PIPE. La machine est assistée par ordinateur, et permet de tracer la filiation de la dureté. Les charges appliquées varient dans la plage : charge maximale 10 Kg et charge minimale 200g.

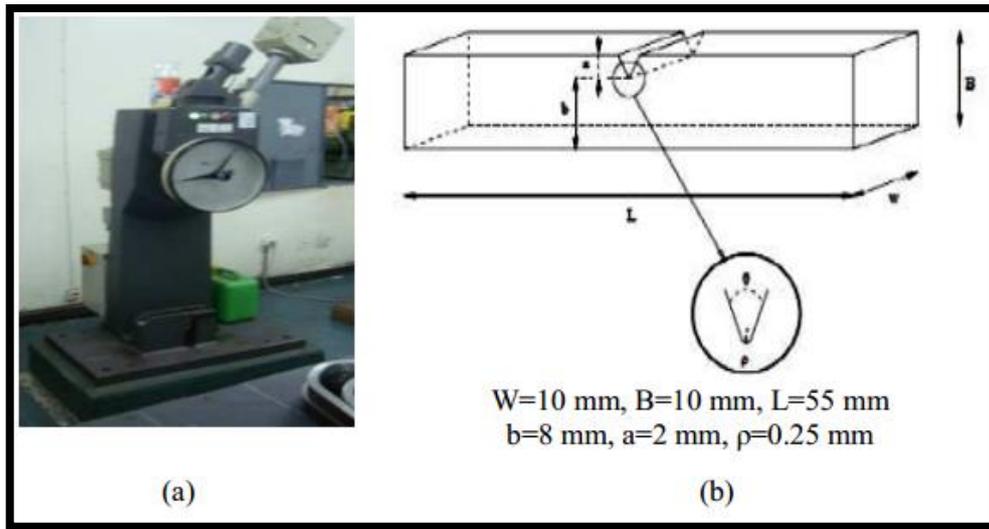


Figure III.4 : a) Mouton Charpy (Alpha-Pipe, Annaba) (b) éprouvette Charpy V selon la norme EN 10045-1 [Nfe90].

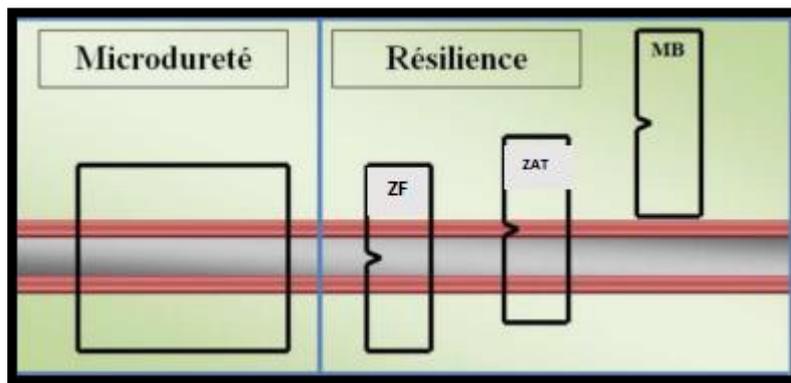


Figure III.5 : Configuration des éprouvettes des résiliences et de micro dureté [Bou15].

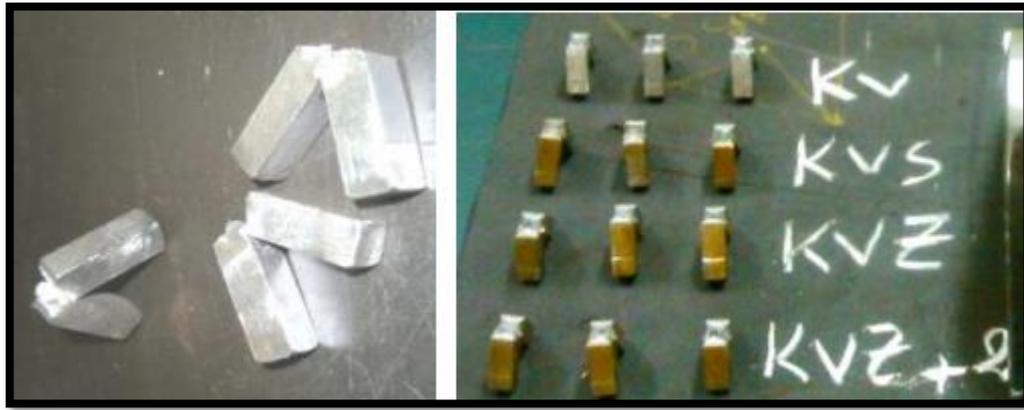


Figure III.6 : Eprouvette de résilience en état final [Bou15].

Zone	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	$E_{Moyenne}$ (Joules)
MB	220	215	214	216.33
ZF	180	140	206	175.33
ZAT	241.5	240	243.08	242.16

Tableau III.1 : Les résultats de l'essai de résilience pour chaque zone [Bou15].

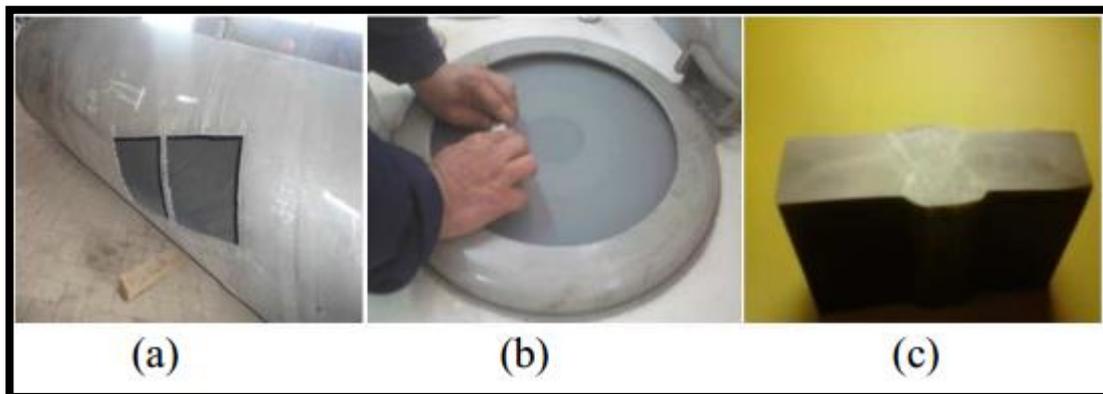


Figure III.7 : Préparation de l'échantillon. (a) Découpage (b) Polissage et (c) état finale des éprouvettes [Bou15].



Figure III.8 : Procédure et machine de dureté (Type Vickers) [Bou15].

Les indentations (1, 2, 3, 14, 15, 16) sont appliquées dans le métal de base (MB).
 Les indentations (7, 8, 9, 10) sont appliqués sur la soudure ou dans la zone fondue (ZF).

Les indentations (4, 5, 6, 11, 12, 13) sont appliqués dans la zone de transition ou bien dans la zone affectée thermiquement (ZAT) [Bou15].

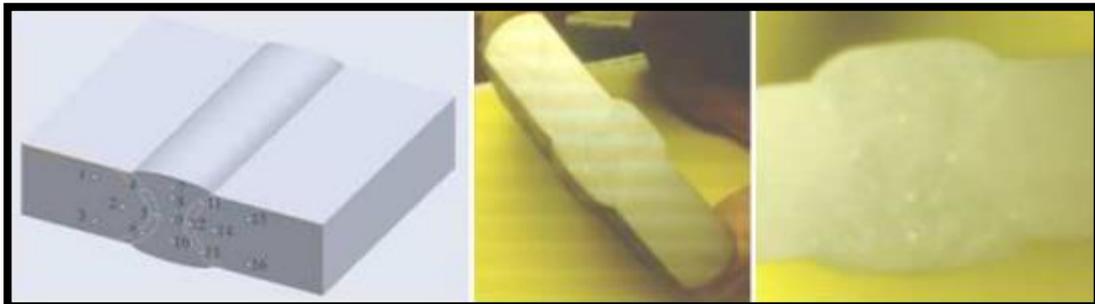


Figure III.9 : Positionnements des indentations selon la norme NF EN ISO 9002 [Nfe94].

Zone	MB						ZF				ZAT					
Points	1	2	3	14	15	16	7	8	9	10	4	5	6	11	12	13
DV	219	218	215	215	219	217	224	219	221	222	229	234	230	235	233	232
Moyenne	217,16						221,5				232,16					

Tableau III.2 : Résultats d'essai HV (les unités sont en Kg/ mm²) [Bou15].

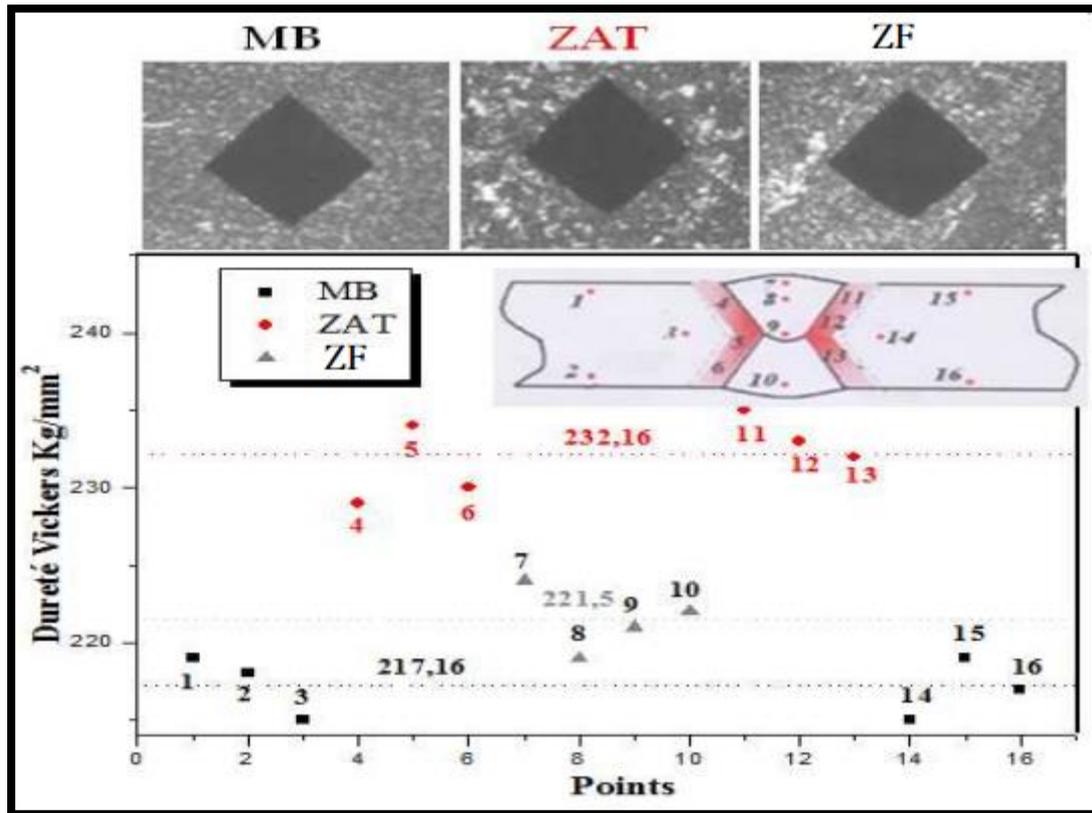


Figure III.10 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones [Bou15].

On observe ces valeurs de micro dureté de ce tube, elles sont acceptables et ne présentent aucune anomalie. Elles sont conformes aux exigences de la norme API. Les filiations de micro dureté ont montré une bonne fluctuation tout au long de l'assemblage soudé (métal de base, zone fondue et zone affectée thermiquement) pour le tube étudié. Les résultats de micro dureté des indentations 7, 8 et 9, 10 relatives à la zone fondue, ont montré une uniformité des valeurs entre le métal de base et le cordon de soudure, signe d'un soudage correct. Nous avons remarqué que les zones 4, 5, 6, 11, 12, 13 correspondent à une dureté très élevée. Ces zones sont donc les plus fragiles et risquent d'être soumises à rupture [Bou15].

Conclusion :

- ✓ la microstructure, la dureté, et la résilience montrent que les propriétés mécaniques sont convenables pour l'utilisation dans le transport des hydrocarbures. Les résultats expérimentaux sont en bonne accords avec les normes internationales.

CHAPITRE IV

Etude expérimentale

Introduction :

L'approche expérimentale est mise en évidence dans ce chapitre. Tout d'abord, une présentation des matériaux : métal de base, métal d'apport et un échantillon d'acier X70 soudé par la technique de soudage à l'arc avec électrode enrobé (SMAW). Ensuite c'est par des techniques et des méthodes d'analyses expérimentales que nous avons procédé pour essayer de suivre, caractériser et comparer l'évolution de la morphologie structurale dans chaque zone du joint soudé de l'échantillon, dans le but de comprendre et de discuter les changements observés, mais malheureusement la pandémie COVID-19 nous a limité pour suivre notre travail.

IV.1. Métal de base :**IV.1.1. Présentation du métal de base :**

Le métal de base utilisé dans notre travail est sous forme de plaque de dimensions 40×50 cm et d'une épaisseur de 1,4 cm. Il nous a été fourni par la société algérienne COSIDER à la base Oumech, Biskra, atelier de soudage par SMAW, sous forme des tubes d'acier où ils sont utilisés pour les canalisations des hydrocarbures, comme le montre la figure IV.1.

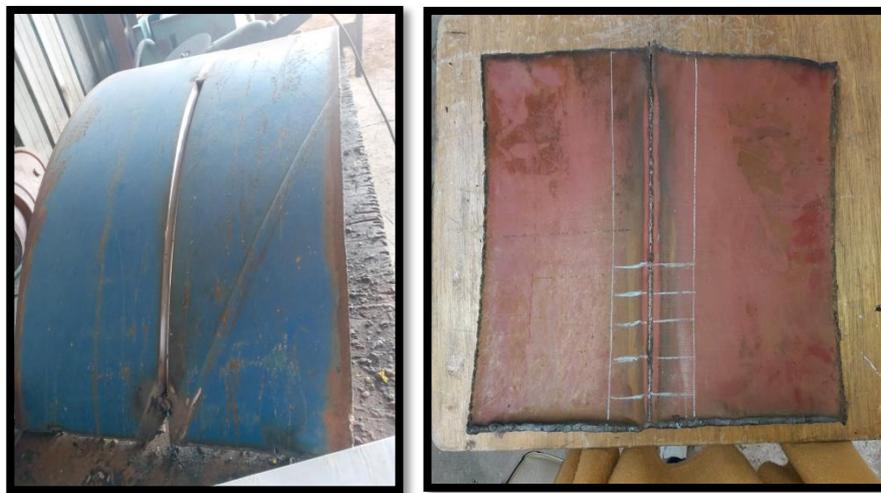


Figure IV.1 : Un joint soudé par SMAW d'X70, fournis par COSIDER, Biskra.

IV.1.2. Identification du métal de base :

Le métal de base est de type acier X70. C'est un acier faiblement allié, constitué d'élément de base fer avec un réseau cristallin d'atomes Fe cubique centré. Des impuretés (Nb, vanadium...) sont également présentes en faible quantité massique.

IV.1.3. Propriétés mécanique :

Caractéristiques API5L	EPAISSEUR (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Re/Rm
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.90

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques de l'acier X70 selon l'API5L.

Avec :

- Re : la limite d'élasticité.
- Rm : la résistance à la traction.
- A% : le pourcentage d'allongement après rupture.

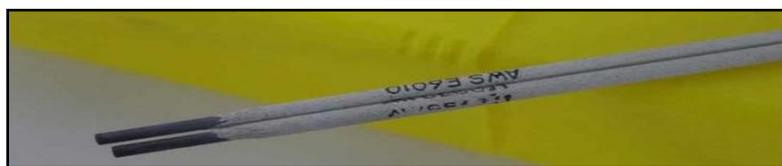
IV.1.4. Composition chimique :

L'acier X70 contient une faible teneur de carbone (0.085), il s'agit d'une nuance d'acier à base de carbone faiblement allié aux éléments à dispersives au niobium-titane-vanadium. La composition chimique est obtenue par l'analyse par spectrométrie (mesure d'onde d'élément) comme le montre le tableau IV.2.

Elément	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Value	0.085	0.321	1.52	0.002	0.006	0.033	0.018	0.003	0.038	0.003	0.013
Elément	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+ Nb	S+D	C eq	
Value	0.053	0.007	0.063	0.003	0.604	0.001	97.8	-	0.0073	0.36	

Tableau IV.2 : Composition chimique de l'acier X70.**IV.2. Métal d'apport :**

L'électrode enrobée est généralement composée de trois types de flux : Flux cellulosique (E6010), Flux cellulosique (E8010) de diamètre 4mm et Flux cellulosique (E8010) de diamètre 5mm. La forme de la pointe de l'électrode peut affecter la forme du bain de fusion, comme le montre la figure VI.2.

**Figure IV.2 :** Électrode enrobée.**IV.3. Conditions de soudage :**

La technique de soudage utilisée pour assembler bout à bout deux plaques métalliques d'acier X70 est le soudage à l'arc avec électrode enrobé (SMAW).

L'ampérage utilisé au niveau de l'atelier de soudage COSIDER Biskra est de 110A, avec un courant continu ou alternatif.

L'appareil poste de soudure utilisé est présenté dans la figure IV.3.



Figure IV.3 : Poste de soudure.

IV.4. Méthodes expérimentales :

La partie expérimentale de la préparation de l'échantillon : découpage, polissage et prise des micrographies par ordre est faite au sein du hall technologique et du laboratoire de métallurgie, faculté des sciences et de la technologie, université Mohamed Khider, Biskra.

IV.4.1. Préparation de l'échantillon :

Le matériau en étude est un joint d'acier X70 soudé par SMAW non traité. La préparation de l'échantillon a été effectuée de sorte à éviter tout échauffement ou déformation du matériau, afin d'éliminer toute modification structurale. L'obtention de la surface d'observation commence par le prélèvement de l'échantillon jusqu'à l'attaque chimique.

IV.4.2. Opération de découpage :

Après une opération de découpage soignée à l'aide d'une scie électrique, comme le montre la figure IV.4, utilisant de l'eau de robinet comme lubrifiant, nous avons préparé un

échantillon de joint soudé de dimension 7,4 x 1,3 cm dont l'épaisseur est d'environ 1,4 cm.



Figure IV.4 : Appareil de découpage : scie électrique.

IV.4.3. Opération de polissage :

Les faces de l'échantillon soudé ont été polies aux disques abrasifs de granulométries (grades 120, 180, 400, 600, 800, 1200, 2400 puis 4000) avec lubrification à l'eau et une vitesse de 250 tours/ min, comme le montre la figure IV.5.

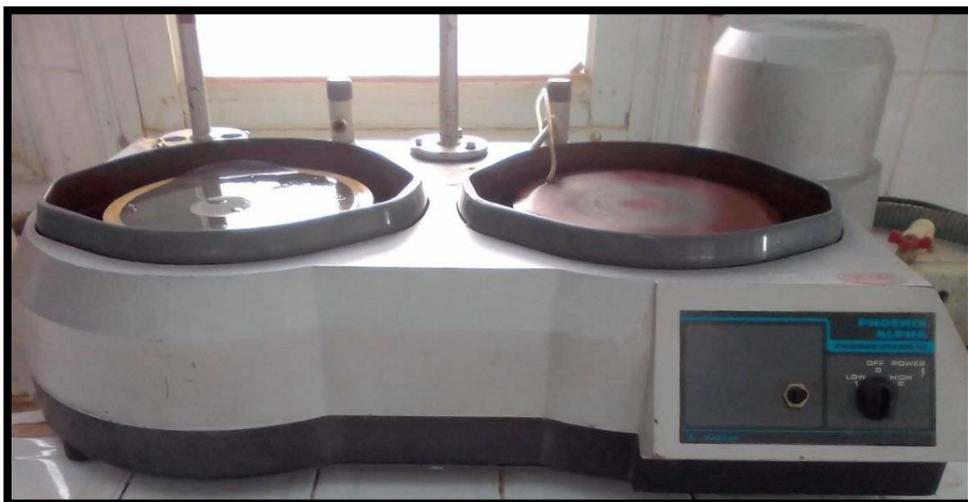


Figure IV.5 : Polisseuse de type PHOENIX ALPHA de marque ANALIS.

Dans le but d'obtenir des faces miroir, la finition a été réalisée à l'aide de disque en feutre avec l'addition du lubrifiant et de la pâte diamantée de granulométrie $6\ \mu\text{m}$, comme le montre la figure IV.6. A la fin, l'échantillon est nettoyé à l'acétone et conservé à l'abri de l'humidité.



Figure IV.6 : Polisseuse à disque en feutre de marque MICAPOL P310.

IV.4.4. Attaque chimique :

Après polissage, l'échantillon soudé est attaqué chimiquement pour révéler les macro et les micro structures des différentes zones.

L'essai d'attaque chimique a été effectué sur notre échantillon polis en utilisant le réactif Nital :

- 96% ml d'éthanol.
- 4% ml de HNO_3 .

L'échantillon est plongé de 20 à 45 secondes dans la solution.

IV.4.5. MO (Microscope optique) :

L'observation métallographique au microscope optique est une technique de base pour étudier les transformations structurales. Elle permet de caractériser et de suivre l'évolution structurale du joint soudé d'une zone à une autre, comme le montre la figure IV.7.



Figure IV.7 : Microscope optique de marque OLYMPUS.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail on a défini le soudage généralement et énuméré ses procédés, notamment le soudage à l'arc avec électrode enrobé SMAW, ainsi que les différents types des électrodes et les caractéristique qu'ont les principales zones d'un joint soudé.

Il nous a paru nécessaire de donner assez d'information sur les aciers et ses différents types, ainsi que le diagramme d'équilibre qui est le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone, après avoir ce diagramme nous pourrons connaitre le pourcentage de carbone pour le fer, les aciers et les fontes, et avoir les principales phases de diagramme.

Cette étude s'inscrit dans un travail de compréhension globale des microstructure des différentes zones d'un cordon soudé d'acier X70.

REFERENCES

REFERENCES

- Abd18** : M. Abdellatif, "Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration à froid dans la ZAT ", Mémoire de Master, Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2018.
- Ach17** : A. Achouri, "Caractérisations mécaniques et structurales d'un acier de construction des pipelines (API 5LX60) ", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2017.
- Aus16** : L. Aussiel, "Méthodes de caractérisation des propriétés thermomécaniques d'un acier martensitique", Mémoire de Magister, école technologie supérieure, Québec, 2016.
- Auz04** : Q. Auzoux, "Fissuration en relaxation des aciers inoxydables austénitiques-influence de l'écroutissage sur L'endommagement intergranulaire", l'Ecole Nationale Supérieure des Mines, Thèse de Doctorat, Paris, 2004.
- Bab91** : S. Babu, et al, Journal of Materials Science Letters, vol. 10, P 142-144, 1991.
- Bar16** : Y. Barkat, "Étude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines ", Mémoire de Master, Université de Biskra ,2016.
- Bel17** : A. Belabed, "Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles ", Mémoire du Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- Ben07** : M.K. Bencharif, "Procédés de soudage –le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée ", Vinçotte International Algérie, 2007.
- Ben11** : M.K. Bencharif, " Soudage – métaux d'apport ", Cosider, Biskra, 2011.
- Ben12** : M. F. Benlamnouar, et al, "Comportement mécanique des soudures SMAW ", 3ème Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Matériaux et Alliages (IC-WNDT-MI'12) Oran, P 59, 2012.
- Bou07** : R. Bouzid, et al, "Analyse tendancielle et différentielle des interactions entre le procédé de soudage d'assemblage de gros Tubes et son environnement ", 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007.
- Bou11** : B. Bourdiliau et al. "Comparative study on charpy specimen reconstitution techniques ", Nuclear engineering and design, Sciencedirect, 2011.
- Bou13** : F. Bounab, " Évolutions microstructurales lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4) ", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2013.
- Bou15** : O.Bouledroua, et al, "Qualification d'un Acier API 5L X70 : Etude Expérimentale et Validation Numérique ", Nature & Technologie, Sciences fondamentales et Engineering, n° 13, P 34-39, 2015.

- Bou16a** : H. Bouchelliga, " Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 D'ALFAPIPE ", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- Bou16b** : H. Bouhaf, " Contribution à l'étude des causes de dégradation des conduites du transport d'eau industrielle ", Mémoire de Master, université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- Bou17** : Y. Bouguerra et S. Bourahla, " Analyse structurale de l'acier XC42 du point de vue fissuration à froid en soudage ", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017.
- Bul06** : P.T. Bulger, et al, "Microstructural effect on neutral axis stress corrosion cracking resistance of pipeline steels ", 41:5001-5005–doi 10.1007/s10853-006-0131-7J, Master SCI, 2006.
- Car08** : F. Carboni, et al, "The development of new steel grades and products ", Casting and rolling of api x70 grades for arctic applications in a thin slab rolling plant, Buenos aires, 2008.
- Caz95** : R. CAZES, "Soudage à l'arc ", techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage, Article B7730, 1995.
- Cha05** : S. Chayoukhia, et al, " Approche entité préparation pour la génération de gamme de fabrication des pièces à souder ", 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, Septembre 2005.
- Ché15** : N. Chérifi, "Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A ", Thèse Doctorat, Université de Biskra, 2015.
- Csm06** : Csmofmi, "soudage et assemblage-soudage, procédés de soudage manuels et semiautomatiques ", 2006.
- Dav03** : S. A. David, et al, vol. 55, n°06, P 14, 2003.
- Deb18** : A. Debabi, " Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique ", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'SILA, 2018.
- Der11** : C. E. Derfouf, "Effet de la soudure sur la structure de l'acier ", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2011.
- Dje19** : M. Djellab, " Corrosion des installations pétrolières : Effet de la synergie des ions iodures et des inhibiteurs naturels sur la protection contre la corrosion de l'acier API 5L X70 en milieux acides ", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2019.
- Fri01** : S. Fricke, et al, "Numerical weld modeling - a method for calculating weld-induced residual stresses ", Nuclear Engineering and Design 206, P 139-150, 2001.
- Gra77** : H. Granjon, Bases métallurgiques du soudage, Eyrolles, Paris, 1977.

- Gra95** : H.Granjon, "Bases métallurgiques de soudage", Publication du soudage et de ses applications, Paris, 1995.
- Gro86** : O. Grong, et al, "Microstructural development in mild and low alloy steel weld metals", Int Met, P 27-48, 1986.
- Gue16** : N.Guelai et F.Boutarfif, "Comportements mécaniques Des aciers faiblement alliés avant et après cémentation", Mémoire de Master, Université de Tébessa, 2016.
- Had11** : M. Hadj Meliani, "Corrosion de fectassessment on pipe using limit analysis and notch fracture mechanics", Engineering Failure Analysis 18, 2011.
- Had13** : Hadjoui Féthi, "Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différents grades", Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- Hat13** : L.Hattali, Cours "M2104 – Mise en œuvre et comportement des matériaux", Université Paris Sud IUT Cachan, 2013.
- Hic19** : N.Hicher, "Étude des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2) soudé", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2019.
- Hig90** : "High strength structural and high-strength lowalloy steels", Metals Handbook, Tenth edition, 1990.
- Hir19** : B. Hireche et H. Ferhat, "Etude de l'effet inhibiteur des huiles essentielles de Cyprès (Cupressus Sempervirens. L) sur la corrosion de l'acier X70 (sans et avec soudure)", Mémoire de Master, Université de Biskra, 2019.
- Hul97** : K. Hulka, "HSLA large diameter pipe plate from standard production to X80/X100", Niobium Information 13/39, 1997.
- Kec13** : A. Kechaou, "Etude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage", Thèse de Doctorat, Université de Liège, 2013.
- Kha18** : F. Khamouli, "Influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des Pipelines", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2018.
- Kof13** : K. Kofiani et al, "New calibration method for high and low triaxiality and validation on sent specimens of api x70", Science direct, International journal of pressure vessels and piping, 2013.
- Lee00** : T.K. Lee, et al, "ISIJ International", n°40, P 12, 2000.
- Maa16** : B. Maamache et al, "Mechanical and metallurgical characterization of HSLA X70 welded pipeline steel subjected to successive repairs", Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 29(6), P 568–576, 2016.
- Méc00** : Mécano soudage : Fabrication, Edition CETIM, Mars 2000.
- Méc97** : Mécano soudage : Conception, Edition CETIM, Août 1997.

- Nfe90** : NF EN 10045-1, "Essai de flexion par choc sur éprouvette charpy. Partie 1: Méthode d'essai, association française de normalisation", Afnor, 1990.
- Nfe94** : NF EN ISO 9002, "Système qualité. Modèle pour l'assurance de la qualité en production", installation et prestations associées, 1994.
- Nil75** : R.W. NILES et al, "Wei thermal efficieny of the GTAW process", Welding Journal, res. Supp, P 25s-32s, 1975.
- Pin09** : A. Pineau, "Intégrité mécanique des pipelines et gazoducs : enjeux scientifiques et techniques". Séminaire International sur les Technologies Mécaniques : SITEM 09, Tlemcen, 05 et 06 Décembre 2009.
- Sma08** : V. Smanio-Renaud, "Etude des mécanismes de Fragilisation Par l'Hydrogène des aciers non alliés en milieu H_2S humide : contribution de l'émission acoustique", Thèse de Doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2008.
- Sun11** : H.K. Sung, et al, "Materials Science and Engineering", P 3350-3357, 2011.
- Sun83** : R.E. SUNDELL, et al, "Minor element affects on gas tungsten arc weld penetration", Contract No MEA-8208950, General Electric Company, Shenectady, New York 12301, 1983.
- Sun85** : R. E. SUNDELL, et al, "Minor element affects on gas-tungsten-arc weld penetration", Interim report, contract no. M.E.A-8208950, General Electric Company, Shenectady, New york 12301, 1985.
- Taw13** : H.M. Tawancy, et al, "Analysis of corroded elbow section of carbon steel piping system of oil-gassepara torves sel". Case Studies in Engineering Failure Analysis, n°1, P 6–14, 2013.
- Rüc05** : G. Rückert, "Etude de la contribution des flux activant en soudage A-TIG: application de la silice au soudage de différents métaux et alliages", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2005.
- Twi08** : TWI, "Section15: Welding Consumables", Senior Welding Inspection, 2008.
- Var87** : R. Varisellaz, Soudage, "Eléments de conception de réalisation", Duodi, 1987.
- Wil01** : D. WILLIAM, et al, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada, 2001.
- Zao09** : M. Zaoui, "Influence des traitements thermique sur la rupture fragile des constructions soudées, cas des soudures épaisses", Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2009.