الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
**République Algérienne Démocratique et Populaire**
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
**Université Echahid Echikh Larbi Tébessi – Tébessa –**
**Faculté des Sciences et de la Technologie**
**Département de Génie Mécanique**

# MEMOIRE

Pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

**Spécialité: Génie des matériaux**

**Intitulé**

# Etude des caractéristiques mécaniques des joints soudés d'un tube en acier à haute limite d'élasticité

Présenté par :

Benarfa Khaoula
Djalleb Meriem

Mémoire soutenue le 10 / 06 / 2025 devant le jury composé de

| | | |
|---|---|---|
| Président : | LAOUADI Bouzid | MCB |
| Encadreur : | BOUNOUARA Abdelouahab | MCB |
| Examinateur : | KHELIFA Hocine | MCB |

**Année universaire: 2024/2025**

# Remerciements

Nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force et la volonté d'entamer et d'achever ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur Bounouara Abdelouahab pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa disponibilité, sa patience et sa rigueur tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble de nos professeurs pour leur générosité et leur grande patience malgré leurs nombreuses charges. Nous adressons une mention particulière aux enseignants de la filière Génie Mécanique pour leurs efforts précieux dans notre encadrement et leur contribution essentielle à notre formation académique tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre famille pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leur encouragement constant tout au long de cette aventure académique. Leur présence à nos côtés, dans les moments de doute comme dans ceux de réussite, a été une source inestimable de motivation.

Nous remercions également nos amis sincères pour leur compagnie, leur entraide et les moments de partage qui ont su alléger les périodes de stress et enrichir notre parcours universitaire d'expériences humaines inoubliables.

# Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous qui me sont chers.

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

Mama, reposez votre cœur, votre rêve est devenu réalité, enfin votre petite fille est devenue diplômée comme que tu as tant imaginée et désirée.

À mes frères et sœurs

Merci pour votre amour, votre soutien et votre présence constante à mes côtés dans toutes les circonstances. Vous avez toujours été un pilier dans les moments de joie comme dans les moments difficiles. Votre présence est inestimable. Que Dieu vous protège et que l'amour et la compassion règnent toujours entre nous.

À mon encadrant

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour votre accompagnement, votre disponibilité et vos précieux conseils. Votre encadrement bienveillant a joué un rôle crucial dans la réalisation de ce travail. Merci pour votre patience et votre soutien tout au long de ce parcours.

À mes amis

À vous, qui avez partagé avec moi des moments de joie, de stress et de persévérance. Votre soutien et votre camaraderie ont rendu cette aventure bien plus agréable. Merci pour votre écoute, vos conseils et votre précieuse amitié.

**Benarfa Khaoula**

**Dédicaces**

Nous dédions ce modeste travail:

A nos chères parents, notre source de tendresse, qui ont sacrifié leur vie pour notre éducation

À mon frère et à ma sœur
A nos meilleurs amis qui nous ont accompagnés le long de toutes les années d'étude à tous nos professeurs et collègues

de la promotion 2024/2025

Djellab Meriem.

# Sommaire

Remerciements
Dédicaces
Sommaire ..... I
Liste des Figures..... V
Liste des Tableaux..... VII
Nomenclature ..... VIII
Résumé..... X
Abstract ..... XII
Introduction Générale..... 1
**CHAPITRE I. Généralités sur les Aciers**..... 3
I .1 Introduction :..... 4
I.2. Définition :..... 4
I.3. Histoire de l'acier :..... 5
I.4 Classification des aciers :..... 6
I.5 Les aciers à haute limite élastique :..... 7
I.5.1 Présentation :..... 7
I.5.2 Structure et propriétés des aciers HLE :..... 7
I.5.3 Mécanismes de durcissement des aciers HLE :..... 8
I.5.4 Catégories des aciers HLE :..... 8
I.5.5. Applications des aciers à haute limite élastique (HLE) :..... 8
CHAPITRE II. Procédés de Fabrication des Tubes Soudes en Spirale ..... 11
II.1. Introduction :..... 12
II.2. Présentation du lieu de stage :..... 12
II.3. TUBERIE ANNABA :..... 12
II.4. Historique de l'unité ALFA-PIPE ANNABA :..... 13
II.5. Process de fabrication :..... 13
II.5.1. Introduction :..... 13
II.5.2. Fabrication des tubes soudés :..... 14
II.5.3. Tubes soudés sous la forme en spirale :..... 14
II.5.3.1. Stockage de bobines de pipeline :..... 14

II.5.3.2. Préparation de la bobine sur la machine : 15
II.5.3.3. Entrée bobine : 16
II.5.3.4. Préparation arêtes : 16
II.5.3.5. Soudage de tubes : 17
II.5.3.5.1. Introduction : 17
II.5.3.5.2. Définition de soudage : 18
II.5.3.6.1 . Soudage SMAW : 20
II.5.3.6.2. Soudage sous flux en poudre SAW : 20
II.5.3.7. Machine à Souder : 21
II.5.3.8. Types de flux en poudre utilisés : 22
II.6. Classification des défauts dans les assemblages soudés : 23
II.6.1. Défauts de fissures : 23
II.6.1.1. Causes des fissures : 23
II.6.1.2. Remèdes contre les fissures : 24
II.6.2. Les cavités : 24
II.6.3. Défauts de pénétration : 25
II.6.3.1. Cause des défauts : 25
II.6.3.2. Moyens de prévention : 25
II.6.4. Défauts divers : 26
II.7. Coupe du tube : 26
II.8. Nettoyage de tube : 27
II.9. Contrôle des tubes soudés : 27
II.9.1. Contrôle des bobines : 27
II.9.2. Contrôles des tubes : 28
II.9.2.1. Contrôle non destructif (CND) : 28
II.9.2.1.1. Contrôle visuel : 28
Figure II. 14: Contrôle visuel 28
Tableau II. 1 paramètre de contrôle visuel. 29
II.9.2.1.2. Contrôle ultrasons : 29
II.9.2.1.3. Contrôle par radiographie : 30
II.9.2.1.4. Contrôle hydrostatique : 31
II.10. Prélèvement des échantillons : 33

II.11. L'essai de traction :.....33
II.12. Machines d'essais : .....34
II.13. Les éprouvettes :.....35
II.15. Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction :.....36
II.16. L'essai de résilience : .....37
II.17. Principe de l'essai Charpy :.....37
II.19. Définition de dureté :.....40
II.20. Les types d'essai de dureté :.....40
II.20.1. Essai de dureté Brinell :.....40
II.20.2. Essai de dureté Rockwell :.....41
II.20.3. Essai de dureté Vickers : .....41
II.20.3.1. Principe :.....41
II.20.3.2. Conditions d'essai : .....42
II.21. L'essai de pliage :.....43
II.22. Revêtement des tubes : .....44
II.23. Types du revêtement :.....44
II.23.1. Revêtement extérieur :.....44
II.23.1.1. Les étapes du revêtement :.....45
II.23.2. Revêtement intérieur : .....46
II.24. Conclusion :.....47
CHAPITRE III. Resultats Experimentaux et Discussion.....48
III.1. Résultats expérimentaux : .....49
III.1. Résultats expérimentaux de Contrôle visuelle :.....49
III.2 : Résultats de la Composition chimique :.....51
III.3: Résultats expérimentaux de l'essai dureté Vickers (HV10) : .....52
III. 4 Résultats expérimentaux de l'essai de traction : .....56
III.4.1. Caractéristiques géométriques : .....58
III.4.2. L'analyse statique et les courbes d'essai de traction :.....58
III.4.3. Interprétation des résultats de l'essai de traction : .....60
III. 5. Résultats expérimentaux de l'essai de résilience Charpy : .....61
III. 5.1. Éprouvettes utilisées :.....62
III. 5.2. Caractéristiques géométriques : .....64

III.5.3. L’analyse statique et les courbes d’essai de résilience :.....65
CONCLUSION GENERALE .....67

# Liste des Figures

## Chapitre I

**Figure I. 1 :Tube soudée en spirale Pipeline.** ……10

## Chapitre II

**Figure II. 1: Stockage bobine.** 15
**Figure II. 2: Machine de Préparation des bobines.** 16
**Figure II. 3: Entrée bobine.** 16
**Figure II. 4: Préparation arêtes.** 17
**Figure II. 5: Assemblage de deux pièces par soudage.** 18
**Figure II. 6: les zones de la soudure.** 19
**Figure II. 7: Machine à souder de pipe.** 21
**Figure II. 8: Le soudage intérieur et extérieur.** 22
**Figure II. 9: Défauts de fissures.** 24
**Figure II. 10: Illustration des défauts de soufflures ou cavités.** 25
**Figure II. 11: Défaut de pénétration.** 26
**Figure II. 12: Équipement industriel de découpe de tubes.** 26
**Figure II. 13: Nettoyage de tube.** 27
**Figure II. 14: Contrôle visuel.** 28
**Figure II. 15: CND Ultrason.** 30
**Figure II. 16: Test hydrostatique.** 31
**Figure II. 17: Manomètres de mesure de pression dans l'unité de teste hydrostatique** 31
**Figure II. 18: Système de surveillance des données du test hydrostatique** 31
**Figure II. 19: Inspection visuelle et marquage final des tubes.** 32
**Figure II. 20: Tube fini sans revêtement.** 32
**Figure II. 21: Schéma de prélèvement des échantillons pour les essais destructifs.** 33
**Figure II. 22: Machines d'essais de traction.** 34
**Figure II. 23: éprouvette de traction.** 35
**Figure II. 24: Courbe de traction d'un matériau ductile présentant un décrochement.** 36
**Figure II. 25: Géométrie des éprouvettes Charpy entaillées en V.** 38
**Figure II. 26: Mouton de Charpy.** 38
**Figure II. 27: Pince de préhension pour four de laboratoire.** 39
**Figure II. 28: Four de trempe utilisé dans l'essai de dureté.** 39
**Figure II. 29: Principe de dureté brinell.** 40
**Figure II. 30: principe de la dureté Rockwell.** 41
**Figure II. 31: principe de la dureté Vickers.** 42
**Figure II. 32: Éprouvettes d'essai de pliage** 43
**Figure II. 33: Machine d'essai de pliage.** 44
**Figure II. 34: revêtement extérieur.** 46
**Figure II. 35: Tube revêtu.** 47

## Chapitre III

**Figure III. 1: Machine de l'essai de dureté HV10** 53

**Figure III. 2: Pénétrateur de la machine de dureté HV10 en contact avec l'éprouvette.** 53
**Figure III. 3: Eprouvettes avec joint de soudure pour mesurer la dureté Vickers.** 54
**Figure III. 4: Résultats d'essai dureté Vickers HV10.** 55
**Figure III. 5: Machine de l'essai de traction.** 56
**Figure III. 6 :Éprouvette normalisée de l'essai de traction.** 57
**Figure III. 7: Éprouvettes de traction avec soudure après la rupture.** 57
**Figure III. 8: Éprouvettes de traction sans soudure après la rupture.** 57
**Figure III. 9: Résultats de l'essai de traction selon la norme ISO 6892-1.** 59
**Figure III. 10: Machine de l'essai de résilience.** 62
**Figure III. 11: Éprouvette normalisée de l'essai de Charpy.** 63
**Figure III. 12: Éprouvettes de résilience avant et après la rupture** 64
**Figure III. 13: Schéma des éprouvettes extraites du MB, de la ZF et de la ZAT.** 65
**Figure III. 14: Courbe d'absorption d'énergie KV8 de l'échantillon A1589 à -10 C°.** 66

## Liste des Tableaux

### Chapitre II

**Tableau II. 1: paramètre de contrôle visuel.** 29

### Chapitre III

**Tableau III. 1: résultats du contrôle visuelle et dimensionnel du tube.** 50
**Tableau III. 2: Résultats de l'analyse chimique.** 52
**Tableau III. 3: Résultats d'essai HV10.** 55
**Tableau III. 4: Dimensions de l'éprouvette d'essai de traction selon la norme API 5L.** 58
**Tableau III. 5: Résultats de l'essai de traction pour l'échantillon A1589.** 59
**Tableau III. 6: Caractéristiques géométriques.** 64
**Tableau III. 7: Résultats de l'essai de résilience pour l'échantillon A1589.** 65

## Nomenclature

**HLE :** Haute Limite Elastique

**API 5L :** American Petroleum Institute-Spécification 5L

**X70 :** Type d'acier utilisé pour les pipelines

**ISO 9001 :** Organisation Internationale de Normalisation 9001

**NFA 49150 :** Norme Française Acier

**NF EN 10020 :** Norme européenne définissant la classification des aciers selon leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques

**NF A 02-025 :** Norme française relative à la présentation et à l'interprétation des résultats d'analyses chimiques des métaux

**HV10 :** Dureté Vickers mesure avec une charge de 10 kg

**HV :** Dureté Vickers

**HB :** Dureté Brinell

**HR :** Dureté Rockwell

**MB :** Métal de base

**ZAT :** Zone affectée thermiquement

**ZF :** Zone fondue

**ZL :** Zone de liaison

**F :** La force

**$S_0$:** Section initial

**Re :** Limite d'élasticité

**Rm :** Résistance maximale

**$R_r$ :** Résistance à la rupture

**CD :** Contrôle destructive

**CND :** Contrôle non destructive

**E :** Module d'Young

**A (%) :** L'allongement à la rupture

**L :** Longueur après rupture

**$L_0$ :** longueur initiale

**Z (%) :** Striction à la rupture :

**ν:** Coefficient de poisson

$\varepsilon_r$**:** La déformation à la rupture

$\varepsilon$**:** La déformation

**V :** Forme de l'entaille utilisée dans les éprouvettes de l'essai de choc (essai Charpy)

**d** : Diamètre

$\pi$ :est une constante (3.14)

**Résumé :**

Ce mémoire porte sur l'étude du comportement d'un acier faiblement allié de grade API X70 destiné à la fabrication de tubes spiralés soudés pour le transport des hydrocarbures. L'objectif est d'évaluer l'impact des procédés de formage et de soudage (SAW, SMAW) sur les propriétés mécaniques, chimiques et microstructurales du matériau. L'unité industrielle ALFAPIPE (Annaba), conforme à la norme API 5L, a servi de site d'application. L'étude s'appuie sur une approche expérimentale incluant des essais de traction, de résilience à -10 °C, de dureté (Vickers) et une analyse métallographique sur le métal de base et les zones affectées thermiquement. Les résultats confirment la conformité de l'acier X70 aux exigences normative en matière de résistance, ductilité et homogénéité structurelle, mettant en évidence l'importance d'un contrôle rigoureux du procédé de soudage pour garantir la fiabilité à long terme des pipelines.

**Mots-clés :** Acier X70, Pipeline, Soudage spiralé, API 5L, Essais mécaniques, Microstructure.

**ملخص :**

يتناول هذا البحث دراسة سلوك فولاذ منخفض السبيكة من الصنف API X70 المخصص لتصنيع الأنابيب الحلزونية الملحومة والمستعملة في نقل المحروقات .تهدف الدراسة إلى تقييم تأثير عمليات التشكيل واللحام (SAW, SMAW) على الخواص الميكانيكية والكيميائية والبنيوية للمادة .تم اختيار وحدة ALFAPIPEالصناعية) عنابة (كموقع تطبيقي نظراً لتوافقها مع معيار .API 5L اعتمدت المنهجية على تجارب شد، ومتانة عند 10- درجة مئوية، وصلادة(Vickers) ، وتحليل بنيوي معدني على المعدن الأساسي والمناطق المتأثرة حرارياً .أظهرت النتائج توافق الفولاذ X70 مع المتطلبات المعيارية من حيث المقاومة، الليونة والتجانس البنيوي، مؤكدة على ضرورة التحكم الصارم في عملية اللحام لضمان موثوقية طويلة الأمد لأنظمة النقل.

**الكلمات المفتاحية** : فولاذX70 ، أنابيب، لحام حلزوني،API 5L ، اختبارات ميكانيكية، البنية المجهرية.

**Abstract :**

This thesis investigates the behavior of a low-alloy steel grade API X70 used in the production of spiral welded pipes for hydrocarbon transport. The objective is to assess the influence of forming and welding processes (SAW, SMAW) on the mechanical, chemical, and microstructural properties of the material. The industrial unit ALFAPIPE (Annaba), certified under API 5L standards, served as the application site. The experimental methodology involved tensile tests, Charpy impact testing at -10 °C, Vickers hardness measurements, and metallographic analysis on both the base metal and heat-affected zones. Results confirm the conformity of X70 steel to international standards in terms of strength, ductility, and microstructural homogeneity, highlighting the critical role of precise welding control in ensuring the long-term reliability of pipeline infrastructure.

**Keywords:** X70 steel, pipeline, spiral welding, API 5L, mechanical testing, microstructure.

# Introduction générale

## Introduction Générale.

Le recours aux aciers à haute limite d'élasticité (HLE), notamment ceux obtenus par laminage à chaud, s'est imposé dans de nombreux secteurs industriels stratégiques en raison de leurs excellentes performances mécaniques **[1]**. Ces aciers sont particulièrement prisés dans la fabrication de tubes destinés au transport de gaz liquéfié, d'hydrocarbures et d'eau (agricole ou potable), sur de longues distances. Leur robustesse, combinée à une fiabilité structurelle avérée, en fait une solution économique et performante dans les réseaux de transport sous pression **[2]**.

L'essor industriel des tubes HLE impose une maîtrise rigoureuse des procédés de fabrication afin de garantir la conformité des produits finis aux normes internationales les plus exigeantes. À ce titre, les exigences techniques portent sur :

- des propriétés mécaniques optimales (résistance, ductilité, ténacité) ;
- le respect strict des tolérances dimensionnelles (épaisseur, diamètre, longueur) ;
- l'absence de défauts métallurgiques ou procédés, notamment ceux liés au soudage **[3]**.

Les aciers faiblement alliés utilisés (enrichis en Nb, V, Ti) sont soumis à un procédé de soudage en spirale, basé sur l'enroulement hélicoïdal d'une tôle laminée, puis soudée sur ses deux faces (interne et externe). Ce procédé vise à garantir l'homogénéité microstructurale et la continuité mécanique de l'assemblage. La qualité du soudage dépend de nombreux paramètres : la préparation des bords, la maîtrise des conditions de soudage, le choix des matériaux d'apport, ainsi que les traitements thermiques post-soudage **[4]**.

Dans les applications sous pression, notamment dans les pipelines, la maîtrise de la zone affectée thermiquement (ZAT) et de la zone fondue (ZF) est essentielle pour éviter les risques de fissuration, de fragilité ou de corrosion localisée **[5]**.

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'une étude théorique et expérimentale approfondie visant à évaluer les performances de l'acier X70 (conforme à la norme API 5L), largement utilisé dans la fabrication des tubes spiralés destinés au transport d'hydrocarbures.

La structure du mémoire est organisée comme suit :

- Le **chapitre 1** présente une revue bibliographique des aciers HLE et des procédés de soudage associés ;
- Le **chapitre 2** détaille les étapes de fabrication des tubes spiralés chez un fabricant industriel, en insistant sur les paramètres critiques du soudage ;

- Le **chapitre 3** est consacré aux essais expérimentaux (analyse chimique, traction, dureté, résilience) réalisés sur le métal de base (MB), la zone fondu (ZF) et la zone affectée thermiquement (ZAT), dont l'analyse permet d'interpréter l'influence du procédé sur les propriétés finales du tube.

Cette approche vise à garantir une compréhension globale des enjeux scientifiques et techniques relatifs à l'usage des aciers HLE pour des infrastructures critiques, en veillant à leur conformité aux exigences de sécurité et de performance.

# CHAPITRE I.
# Généralités sur les Aciers

## I .1 Introduction :

L'acier, grâce à ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques, occupe une place essentielle dans l'industrie des métaux ferreux. Cette importance explique son utilisation dans divers domaines, notamment pour le transport par canalisation des hydrocarbures (pétrole et gaz naturel). Il sert à la fabrication de pipelines (gazoducs et oléoducs) permettant d'acheminer d'importantes quantités d'hydrocarbures sur de longues distances, depuis les gisements jusqu'aux zones de consommation et de transformation. Aujourd'hui, on compte plus d'un million de kilomètres de réseaux de pipelines en exploitation à travers le monde.

En Algérie, le réseau de pipelines est estimé à plus de 16 000 kilomètres, avec des diamètres variants entre 8 et 48 pouces. Pour garantir leur efficacité, ces canalisations doivent répondre à des impératifs de rentabilité et de sécurité. Plus de 95 % des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers micro alliés à haute résistance. Ces aciers sont produits selon des schémas métallurgiques de plus en plus performants, en augmentant notamment la vitesse de refroidissement après le laminage contrôlé. Cela permet de fabriquer des tôles TMCP (Thermo-Mechanical Controlled Process), obtenues par laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré.

Les canalisations enterrées dans le sol sont exposées à des contraintes importantes et à un environnement corrosif. Ainsi, le développement de nouveaux aciers à haute limite d'élasticité (HLE) s'est orienté vers l'amélioration des propriétés mécaniques, afin d'éviter une augmentation excessive de l'épaisseur des tubes. Ce progrès a permis de trouver un compromis entre une haute limite d'élasticité, capable de supporter de fortes pressions, et une bonne ténacité, nécessaire pour résister à la propagation des fissures, grâce à l'utilisation des tôles TMCP. Les aciers ont évolué du grade X52 au grade X70, actuellement employés, avec des microstructures ferrito-perlitique. La transition vers des grades supérieurs, comme le X80 et le X100, repose sur le développement d'aciers à structures ferrito-bainitique. **[6]**

## I.2. Définition :

L'acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ». **[7]**

D'après la norme **NF EN 10020**, qui a remplacé la norme **NF A 02-025** en juin 1989, l'acier est défini comme « un matériau dont le fer est l'élément prédominant, dont la teneur en carbone

est généralement inférieure à 2 %, et qui contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ». **[8]**

À la lecture de ces définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone dans les alliages fer-carbone (Fe-C) définissant l'acier par opposition à la fonte reste délicate à préciser. Pour cette raison, une approche métallurgique est souvent privilégiée, en tenant compte des différences intervenant lors de la solidification de ces alliages.

En effet, la solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique, qui inclut la précipitation de carbure de fer ($Fe_3C$, cémentite) et/ou de graphite. Ce phénomène est déterminant dans la distinction entre les aciers et les fontes, car ces dernières présentent généralement une structure contenant des phases eutectiques, tandis que les aciers se caractérisent par des transformations métallurgiques distinctes en fonction de leur composition et de leur traitement thermique. **[9]**

### I.3. Histoire de l'acier :

L'Âge du fer se caractérise par l'adaptation du bas fourneau à la réduction du fer. Ce bas fourneau produisait une loupe, un mélange hétérogène de fer, d'acier et de laitier, dont les meilleurs morceaux devaient être sélectionnés, puis cinglés afin d'en chasser le laitier. **[10]** Avec l'augmentation du souffle du vent, la combustion s'intensifie et la température de fusion du métal est atteinte. Le métal est alors extrait par vidange du creuset : c'est ainsi que débute la production au haut fourneau. Ce procédé permet d'obtenir de la fonte, le fer liquide se chargeant en carbone au contact du charbon de bois. Deux phénomènes complémentaires se produisent dans le creuset du haut fourneau : d'abord, le fer absorbe du carbone au contact du charbon de bois, ce qui abaisse son point de fusion ; ensuite, le métal en fusion continue à s'enrichir en carbone en dissolvant le charbon de bois. **[11]**

Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre 453 et 221 av. J.-C.). Ils maîtrisaient également l'art de brûler le carbone de la fonte en le faisant réagir avec de l'air, afin d'obtenir de l'acier. Ce procédé, qualifié d'indirect, implique que l'acier soit élaboré après l'obtention de la fonte **[12]**. En Europe et en Asie, durant l'Antiquité, l'acier était aussi produit par cémentation, un procédé de décarburation du fer à l'aide de gaz de combustion et de charbon de bois.

L'évolution de la métallurgie connaît un tournant majeur en 1722 grâce aux travaux de Réaumur **[13]**, qui réalise de nombreuses expériences et publie ses observations. Il est le premier à théoriser que l'acier est un état intermédiaire entre la fonte et le fer pur, bien que les connaissances de son époque ne lui permettent pas d'en préciser les fondements scientifiques (Réaumur, 1722). Il faut attendre 1786 pour que la métallurgie devienne véritablement une science : cette année-là, trois savants français issus de l'école de Lavoisier, **[14]**, présentent à l'Académie royale des sciences un *Mémoire sur le fer,* dans lequel ils définissent les trois principaux produits ferreux : le fer, la fonte et l'acier (Berthollet et al., 1786). À cette époque, l'acier est obtenu à partir du fer, lui-même issu de l'affinage de la fonte extraite des hauts fourneaux. Plus tenace que le fer et moins fragile que la fonte, l'acier reste néanmoins coûteux à produire en raison des multiples transformations nécessaires à son élaboration.

La révolution industrielle marque une avancée décisive dans la fabrication et la conversion de la fonte en acier. En 1856, le procédé Bessemer permet pour la première fois de produire directement de l'acier à partir de la fonte. Son amélioration par **[15]** favorise sa généralisation à l'échelle industrielle, menant à la production massive d'un acier de qualité pour l'époque **[16].** Enfin, dans la seconde moitié du XIXe siècle, **[17]** découvre les transformations polymorphes de l'acier et établit le diagramme binaire fer-carbone, faisant ainsi passer la métallurgie de l'état d'artisanat à celui de science. **[18]**

### I.4 Classification des aciers :

En raison du grand nombre d'éléments ajoutés au fer et de la large gamme de leurs teneurs, les aciers présentent une grande diversité de nuances. **[19]** Ils peuvent être classés en fonction de leur composition chimique ou de leur domaine d'utilisation. **[20]**

Ce classement permet d'identifier quatre grandes familles d'aciers :

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

Dans notre étude, nous nous intéressons aux aciers au carbone utilisés pour la fabrication des tubes.

## I.5 Les aciers à haute limite élastique :

### I.5.1 Présentation :

Les aciers à haute limite élastique, également appelés HSLA (*High-Strength Low-Alloy*), sont des aciers micro-alliés conçus pour offrir de meilleures propriétés mécaniques et/ou une meilleure résistance à la corrosion atmosphérique que les aciers au carbone conventionnels. **[21]**

Ils contiennent entre 0,05 et 0,25 % de carbone, ce qui leur confère une bonne formabilité et soudabilité. Leur composition inclut également jusqu'à 1,5 % de manganèse, ainsi que de faibles quantités de niobium, cuivre, vanadium ou titane. Ces éléments modifient la microstructure des aciers au carbone, généralement constituée de ferrite et de perlite, afin de produire une dispersion fine de carbures dans une matrice ferritique presque pure. **[22]**

La résistance mécanique des aciers HSLA est optimisée grâce aux procédés de laminage à chaud et aux traitements thermomécaniques contrôlés, qui permettent un affinement du grain et un durcissement par précipitation. **[23]**

### I.5.2 Structure et propriétés des aciers HLE :

#### I.5.2.1 Dureté :

La dureté d’un acier dépend de plusieurs paramètres :

- La teneur en carbone.
- La présence d’éléments d’alliage.
- Les conditions d’austénitisation (mise en solution des carbures et grosseur des grains d’austénite).

Les éléments d’alliage contribuent au durcissement par solution solide, en créant des distorsions du réseau cristallin du fer, ou par formation de précipités, généralement des carbures. **[24]**

#### I.5.2.2 Ductilité :

La ductilité varie inversement avec la dureté. Certains modes de durcissement, comme l’affinement du grain ou l’introduction d’une phase martensitique dans la ferrite, permettent d’améliorer la résistance mécanique sans trop réduire la ductilité. **[25]**

#### I.5.2.3 Ténacité :

La ténacité des aciers est souvent caractérisée par la température de transition ductile-fragile. L’augmentation du taux de perlite réduit la ténacité en favorisant l’amorçage du clivage. Les

structures bainitiques et martensitiques, grâce à un affinement ultérieur des grains gamma, peuvent améliorer la résistance à la rupture. **[26]**

### I.5.3 Mécanismes de durcissement des aciers HLE :

L'amélioration des propriétés mécaniques des aciers HLE peut être obtenue par plusieurs procédés:

- Solution solide.
- Précipitation.
- Dispersion.
- Affinement de grain.
- Écrouissage.
- Traitement thermique. **[27]**

### I.5.4 Catégories des aciers HLE :

Les aciers HLE regroupent plusieurs nuances répondant à des exigences spécifiques de résistance, de formabilité et de soudabilité. Ils sont classés en six grandes catégories :

- Aciers résistants à la corrosion.
- Aciers micro-alliés ferrito-perlitiques.
- Aciers laminés à structure perlitiques.
- Aciers à ferrite aciculaire.
- Aciers dual-phase.
- Aciers à inclusions contrôlées. **[28]**

### I.5.5. Applications des aciers à haute limite élastique (HLE) :

#### a) Les pipelines :

Un pipeline (terme d'origine anglaise) est une canalisation constituée d'un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, utilisée pour transporter des fluides, qu'ils soient gazeux ou liquides, d'un point à un autre. Ces tubes sont généralement revêtus intérieurement et extérieurement afin d'assurer leur protection contre la corrosion et l'usure. Ils sont le plus souvent enterrés, bien que dans certaines régions, ils puissent être installés en surface.

Les pipelines jouent un rôle essentiel dans l'acheminement des produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Leur longueur peut varier de quelques kilomètres à

plusieurs milliers de kilomètres, et ils sont souvent interconnectés pour former un vaste réseau, parfois très dense, ressemblant à une véritable « toile d'araignée » **[6].**

Selon la nature du fluide transporté, les pipelines se distinguent en plusieurs catégories :

- **Les gazoducs** : destinés au transport du gaz naturel.
- **Les oléoducs** : utilisés pour l'acheminement du pétrole brut et des hydrocarbures liquides.
- **Les aqueducs et émissaires** : employés pour le transport d'eau douce et l'irrigation **[29].**

**b) Caractéristiques des pipelines :**

Un pipeline se compose principalement d'une conduite en acier capable de résister à des pressions élevées, pouvant atteindre environ 100 bars. Son diamètre varie généralement entre 15 cm et 1 mètre, tandis que son épaisseur oscille entre 4 et 13 mm**,** en fonction des conditions d'exploitation et des exigences mécaniques.

La construction d'un pipeline représente un investissement considérable et est strictement encadrée par des réglementations spécifiques, garantissant la sécurité et la fiabilité du réseau.

Les pipelines offrent de nombreux avantages par rapport aux autres modes de transport :

- **Un transport de masse efficace** : un pipeline peut acheminer environ $60 \times 10^6$ L/jour en continu, fonctionnant 24 heures sur 24, toute l'année.
- **Un mode de transport hautement sécurisé** : le taux d'incidents est inférieur à deux événements pour 10 000 kilomètres de pipeline par an**.** De plus, contrairement aux autres modes de transport (routier, ferroviaire, maritime), les pipelines ne congestionnent pas les infrastructures de surface, optimisant ainsi l'efficacité énergétique.
- **Un coût d'exploitation réduit** : pour le transport à longue distance et de gros volumes, les pipelines représentent la solution la plus économique. À titre d'exemple, les États-Unis possèdent plus de $3{,}7 \times 10^6$ km de pipelines, assurant l'acheminement du pétrole brut et du gaz naturel depuis les raffineries jusqu'aux consommateurs **[30].**



**Figure I. 1: Tube soudée en spirale Pipeline [30].**

# CHAPITRE II.

# Procédés de Fabrication des Tubes Soudes en Spirale

## II.1. Introduction :

L'industrie est le moyen de développement de chaque pays, visant la production de biens et de service.

On a décidé de privilégier le secteur de l'industrie lourde pour le premier investissement, car ce domaine est perçu comme le socle de tout développement industriel capable de garantir notre autonomie économique.

Ce rapport vous présentera le secteur des pipelines au sein de l'entreprise I Métal, plus précisément dans l'unité ALFAPIPE. Pour décrire les phases du processus de fabrication des tubes soudés spiralés, ces derniers sont réalisés à partir d'une tôle en forme de spirale qui permet de créer un tube monté par une soudure intérieure et extérieure sur la muraille. Cette méthode nécessite une préparation minutieuse de la tôle et un ajustement précis de l'appareil.

## II.2. Présentation du lieu de stage :

ALFAPIPE est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisations d'hydrocarbures et d'hydrauliques. Elle dispose d'un système management qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales AP1 et ISO9001 depuis 2000. **[31]**

## II.3. TUBERIE ANNABA :

Située à 15 Km d'Annaba ALFAPIPE est spécialisée dans la fabrication de tubes soudés en spirale destines pour l'industrie des hydrocarbures (gaz et pétrole) et leurs revêtements (extérieur et intérieur).

Son savoir-faire et son aptitude à répondre aux besoins diversifiés des utilisateurs, est entré dans le concert des grands fabricants de tubes.

C'est aujourd'hui :

- Une prestation de qualité : un tube revêtu livré sur site pour éviter les aléas de manutention et de stockage intermédiaire.
- Un partenariat actif avec SONATRACH et les compagnies étrangères associées (Thyssen crupp ; Arcelor,Lincoln...etc).
- Une ferme volonté de conforter sa place de leader de production de tubes par la recherche de nouvelles formes d'association et par le renforcement de son processus de modernisation

Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150.

La soudure des bords est faite en automatique à l'arc émergé sous flux, l'une à L'intérieur, l'autre à l'extérieur. **[31]**

## II.4. Historique de l'unité ALFA-PIPE ANNABA :

SONATRACH, est une société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures depuis 1966. Ses considérables besoins en moyens de transports, oléoducs et gazoducs sont réalisés en tubes d'acier. La SNS société nationale de sidérurgie était alors chargée par le ministère de l'industrie de prendre toutes les dispositions nécessaires pour assurer la réalisation immédiate de cette demande. Elle est appelée à satisfaire une part importante de des besoins exceptionnels en tubes de la SONATRACH, auxquels s'ajoutent ceux de l'hydraulique, de l'agriculture et de l'équipement industriel en général. C'est pourquoi le projet d'implantation d'unités de fabrication de tubes soudés en spirale au sein de la SNS était mis à l'étude, TSS Début des travaux en 1967 et mise en service en mai 1969.

Deux investissements importants ont été effectués entre 1975 et 1995, pour répondre aux besoins du marché des tubes de transport d'hydrocarbures :

**En 1975**, l'implantation d'un atelier d'enrobage intérieur (revêtement intérieur) de tube par époxy, surtout utilises pour des tubes de gaz.

**EN 1995**, l'implantation d'un atelier de revêtement extérieur en trois couches en polyéthylène. Après restructuration de SIDER en 1999, l'unité devient ALFATUS (l'algérienne de fabrication des tubes soudés en spirale), une filiale du groupe SIDER. En juillet 2000, ALFATUS SIDER signe sa fusion avec PIPE-GAZ Annaba/Ghardaïa et devient ALFAPIPE (l'algérienne de fabrication des pipes) avec une direction générale commune à Alger. **[29]**

## II.5. Process de fabrication :

### II.5.1. Introduction :

Les tubes sont fabriqués à partir de bobines laminées à chaud pesant entre 10 et 30 tonnes, avec une largeur variant de 600 à 1800 mm, en fonction du diamètre du tube.

Les bobines sont déroulées à plat, façonnées en spirale, puis soudées par arc submergé avec un flux de deux passes consécutives sur une machine spécifique appelée machine de soudure en spirale.

La fabrication des tubes soudés en spirale par ALFA PIPE repose sur une vérification constante, depuis l'arrivée de la matière première (bobine) jusqu'au produit final (tube), conformément à la norme américaine API 5L et en respectant plusieurs phases d d'Annaba **[29]**.

- ✓ Stockage bobines
- ✓ Préparation bobines
- ✓ Entrée bobine
- ✓ Préparation arêtes
- ✓ Soudage intérieure et extérieure
- ✓ Coupe du tube
- ✓ Nettoyage de tube
- ✓ Contrôle visuel
- ✓ Contrôle par ultrasons
- ✓ Contrôle par Radio Graphie
- ✓ Contrôle par hydrostatique
- ✓ Contrôle finale

### II.5.2. Fabrication des tubes soudés :

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication, constituent de la diversité du réseau de transport gazier et pétrolier algérien on retrouve :

- Les tubes non soudés.
- Les tubes soudés en spirale et longitudinalement.

On se limitera dans le cadre de cette étude à la présentation du mode de fabrication des tubes dits de grandes diamètres et utilisés dans les transports. Cette appellation est réservée aux tubes de diamètres extérieurs supérieurs à 16 '' (406,4mm). Ils sont obtenus par formage suivi de l'opération de soudages en long ou en spirale de tôles laminés à chaud **[32].**

### II.5.3. Tubes soudés sous la forme en spirale :

#### II.5.3.1. Stockage de bobines de pipeline :

Le stockage des bobines de pipeline est une étape essentielle pour garantir leur intégrité avant l'installation.

Voici les principales recommandations pour un stockage sûr et efficace :

**Surface stable et plane :**

Éviter les terrains meubles pour prévenir les déformations.

**Zone propre et dégagée :**

Réduire les risques de contamination par la poussière, la boue ou d'autres particules.

**Protection contre les intempéries :**

Elles doivent être stockées dans des endroits à l'abri de l'abri de l'humidité, des rayons du soleil et des variations thermiques.



**Figure II. 1: Stockage bobine.**

### II.5.3.2. Préparation de la bobine sur la machine :

Cette machine est alimentée en bobines à axe horizontal par le pont roulant. La bobine ainsi placée et déroulée sur une certaine longueur pour subir plusieurs opérations. La première partie de la bobine est coupée d'équerre suivant l'axe de la bande et elle est soumis à :

- Un contrôle dimensionnel (épaisseur, criques, ... etc.)
- Un contrôle visuel (empreintes, criques, .... etc.)
- Un contrôle ultrasonique pour détecter les éventuels défauts interne (des doublures).

Si le début de la bande ne présente pas des défauts, on considère que la bobine est apte à être consommer. Dans le cas où le début de la bobine contient des défauts, la bobine sera refusée. **[33]**

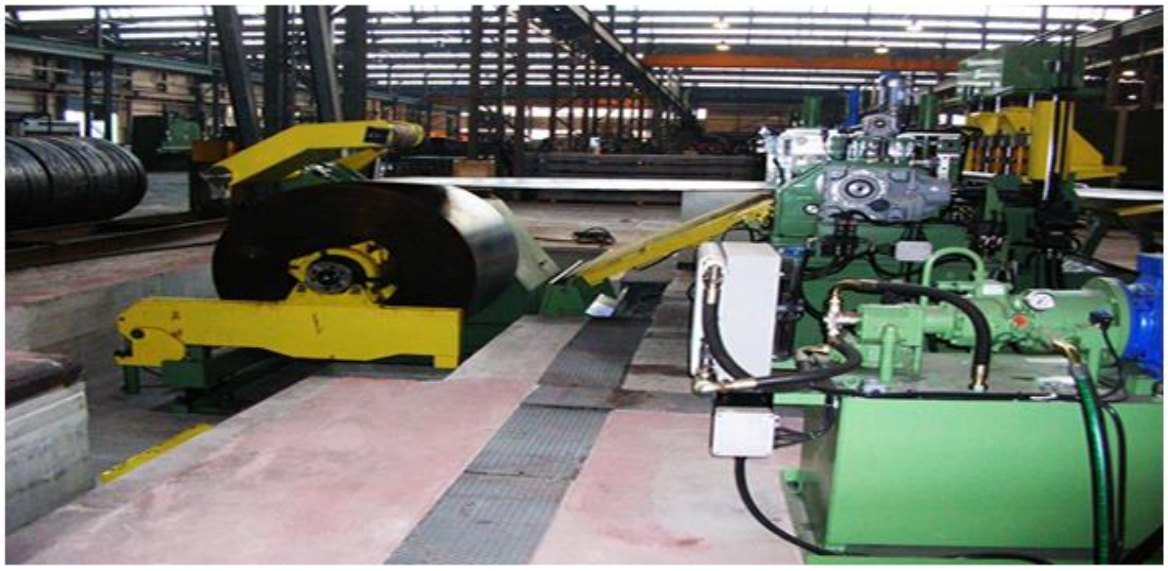


**Figure II. 2: Machine de Préparation des bobines. [33]**

### II.5.3.3. Entrée bobine :

La bobine est placée sur la chaine de production, ou elle est dépliée et dirigée les machines qui la transformeront en tube.



**Figure II. 3: Entrée bobine.**

### II.5.3.4. Préparation arêtes :

Les arêtes des tôles sont préparation en éliminant toute irrégularité ou fil tranchant pour garantir une qualité de soudure optimale lors de l'assemblage des extrémités.



**Figure II. 4: Préparation arêtes.**

### II.5.3.5. Soudage de tubes :

#### II.5.3.5.1. Introduction :

Parmi les procèdes 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.

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. **[34]**

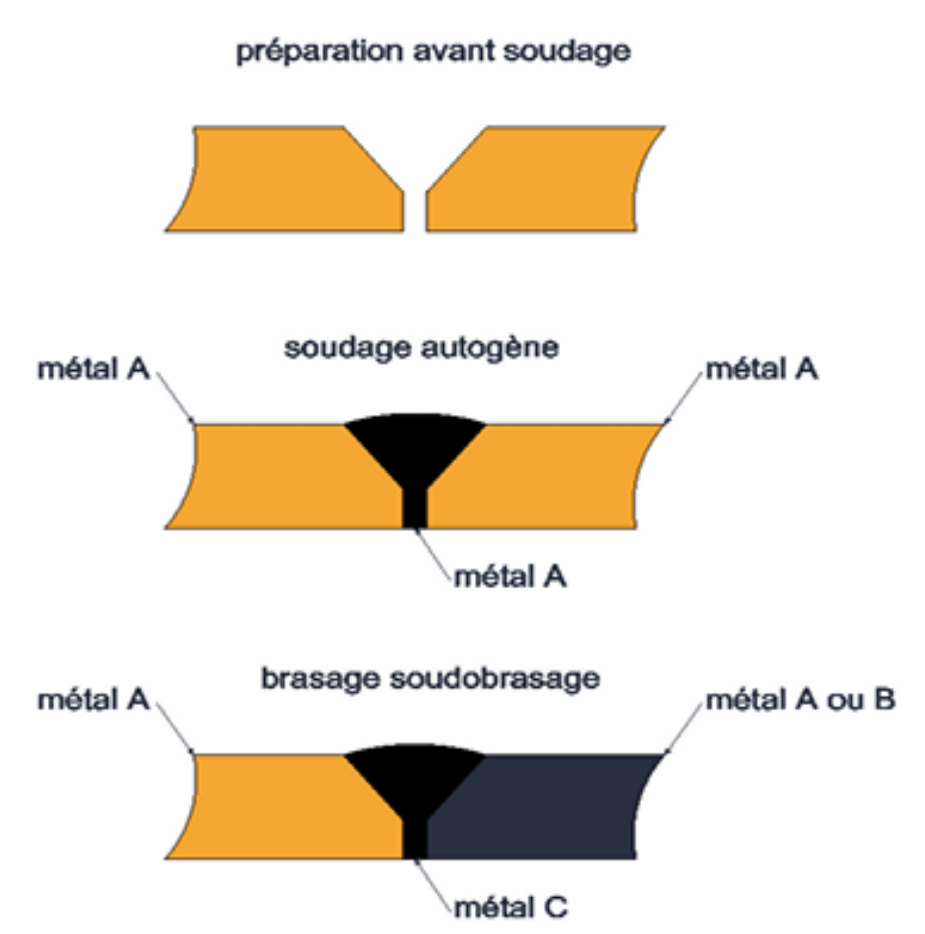



**Figure II. 5: Assemblage de deux pièces par soudage. [35]**

### II.5.3.5.2. Définition de soudage :

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assurer la continuité entre parties consécutives d'un assemblage métallique, de manière à assembler la continuité entre les parties à assembler.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones voire la Figure II. 6.

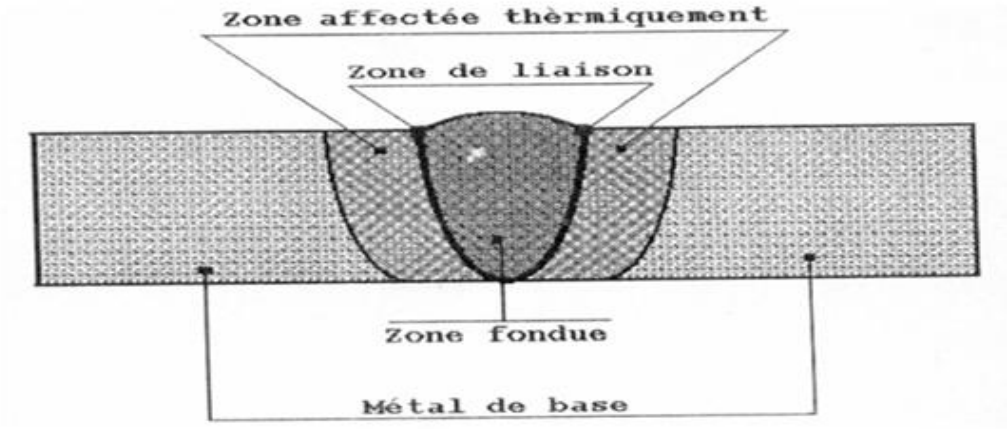



**Figure II. 6: les zones de la soudure. [34]**

**Métal de base (MB) :** Le métal de base, est la partie l'assemblage qui ne subit aucune action thermique. [29]

**Zone affectée thermiquement (ZAT) :** La zone affectée thermiquement 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 pour modifier la structure du métal de base. **[29]**

**Zone de liaison (ZL) :** Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion. **[29]**

**Zone fondue (ZF) :** Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification. **[34]**

### II.5.3.6. Principaux procédés de soudage :

Le soudage est un processus technique vaste et complexe, avec une grande diversité de méthodes et d'applications industrielles. En raison de l'ampleur de ce domaine et du grand nombre de techniques existantes, il est difficile d'en couvrir tous les aspects dans le cadre de cette étude. C'est pourquoi nous avons choisi de nous concentrer sur deux procédés de soudage principaux :

Le soudage à l'arc submergé (SAW) et le soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). Ces deux procédés ont été sélectionnés car ils sont les plus couramment utilisés pour le

soudage des pipelines de pétrole et de gaz, en particulier au sein de l'entreprise Alpha Pipe, située à Annaba.

Cette entreprise privilégie les techniques SAW et SMAW en raison de leurs caractéristiques qui garantissent une soudure robuste et durable, tout en répondant aux normes de qualité exigées pour les conduites de transport d'hydrocarbures.

Cette étude mettra en avant les principales caractéristiques de ces deux méthodes de soudage, en insistant sur leurs avantages, leurs applications et les normes techniques qui leur sont associées, afin d'assurer une performance optimale du soudage des pipelines dans différents environnements industriels. **[36]**

**II.5.3.6.1 . Soudage SMAW :**

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

Le poste de soudage produit un puissant courant électrique qui circule entre l'extrémité de l'électrode (baguette de métal d'apport) et le métal de base à souder. Le courant électrique produit un arc d'une chaleur si intense (de 3 982 à 5 537 °C) que l'extrémité de la baguette de métal d'apport ainsi que la surface du métal de base sont portées à la fusion. La force de l'arc dirige le métal d'apport fondu vers le bain de fusion de façon à former le cordon de soudure. Dans le procédé de soudage SMAW, la source de chaleur (énergie électrique) et l'apport de métal (électrode) sont indissociables. Le soudage à l'arc est un procédé de soudage avec fusion des bords et addition de métal d'apport. **[37]**

**II.5.3.6.2. Soudage sous flux en poudre SAW :**

Le soudage électrique à l'arc sous flux solide (Submerged Arc Welding « SAW ») électro conducteur est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de m étal (de Ø 1,2 à Ø 6 mm) dévidé à une vitesse constante et la pièce à souder. Un dépôt continuel de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder. L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.

Le procédé de soudage est essentiellement utilisé en installation automatique sur banc ou potence de soudage. Il est principalement utilisé pour le soudage à plat. La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la tête de soudage. La tête de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie généralement positive du générateur de soudage à courant continu. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une trémie branchée par une dérivation sur la tête de soudage l'alimente par la poudre. L'arc jaillit lorsque l'opérateur actionne le bouton électrique du coffret de commande et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder. Le flux en poudre non fondu est récupéré à l'aide d'un aspirateur et le flux est recyclé après tamisage **[38].**

### II.5.3.7. Machine à Souder :

La TUBERIE spirale dispose de quatre (04) machines à soudes identiques, qui permettent la réalisation de plusieurs opérations pour la fabrication du tube.



**Figure II. 7: Machine à souder de pipe. [33]**



**Figure II. 8: Le soudage intérieur et extérieur.**

### II.5.3.8. Types de flux en poudre utilisés :

- Flux fondu : Les ingrédients sont mélangés et traités dans un four électrique à l'arc. Le produit obtenu est parfaitement homogène.
- Flux aggloméré : Les ingrédients constitués de poudres métalliques et de produits minéraux sont agglomérés avec un liant (silicate de sodium) dans un four à basse température.

Le flux en poudre à trois rôles principaux :

**Rôle électrique :** Isolants à froid, les flux deviennent conducteurs à chaud et participent de ce fait à la fusion du métal.

**Rôle physique :** Le flux transformé en laitier liquide pendant le soudage maintient et moule le métal déposé. De là, les effets du flux sur l'aspect du cordon, sa forme, son profil et ses

raccordements avec les bords soudés, ainsi que celui sur la compacité du métal déposé du fait du dégazage en cours de soudage.

**Rôle métallurgique :** Le flux protège le bain de fusion contre l'action de l'oxygène et de l'azote atmosphérique.

Il participe à la scarification de l'oxyde de fer existant sur les bords à souder. Affine le métal en fusion par l'action de ses éléments calmants. (Manganèse, silicium…) Incorpore en faible quantité des éléments d'alliage tels que chrome, nickel, etc. Assure un refroidissement lent du bain. **[39]**

### II.6. Classification des défauts dans les assemblages soudés :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger, Les défauts sont classés en cinq groupes.

- ✓ Groupe 1 : Fissures ;
- ✓ Groupe 2 : Cavités (Soufflures) ;
- ✓ Groupe 3 : Manque de fusion et de pénétration ;
- ✓ Groupe 4 : Défauts divers

### II.6.1. Défauts de fissures :

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents, Types de fissures fréquentes (Figure II. 9) .

- ✓ Fissure longitudinale ;
- ✓ Fissure transversale ;
- ✓ Fissure de rayonnantes ;
- ✓ Fissure de cratère.

#### II.6.1.1. Causes des fissures :

Les fissures peuvent être dues :

- ➢ A des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté…) ;
- ➢ Volume de cordon trop faible (préparation des bords trop étroite…) Arrêt trop brutal de la soudure ;
- ➢ L'humidité dans l'air ;

- La présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.).

### II.6.1.2. Remèdes contre les fissures :

- Choisir un métal d'apport approprié
- Adopter un préchauffage approprié
- Effectuer une bonne préparation des joints. **[40]**

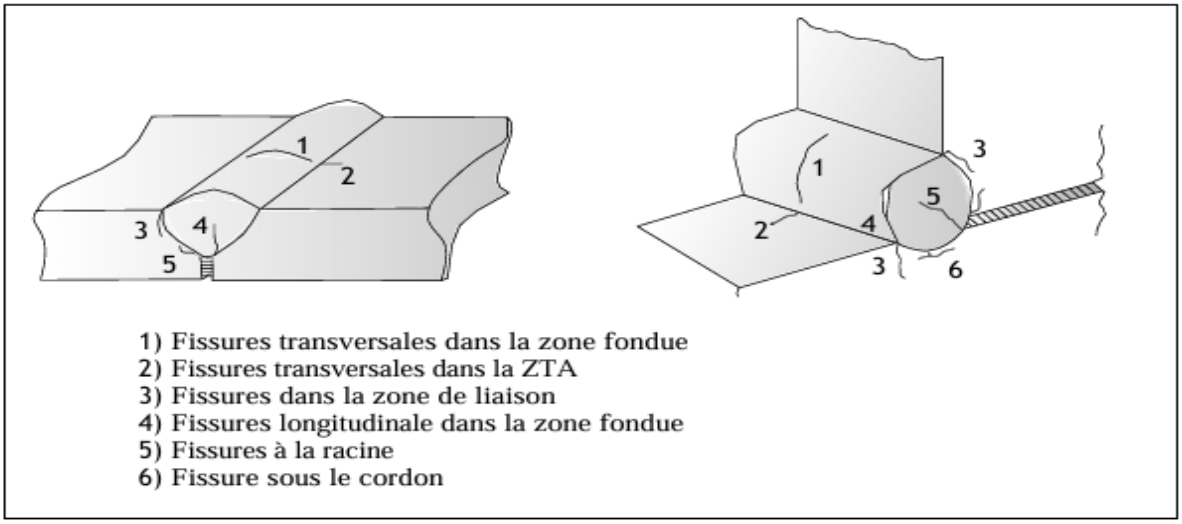



**Figure II. 9: Défauts de fissures. [40]**

### II.6.2. Les cavités :

Appartiennent à la famille des défauts volumiques et peuvent résulter de mécanismes différents. On distinguera :

- Les retassures : suit à un retrait du métal lors de son refroidissement, l'espace vide formé apparait visuellement à la surface du cordon, ainsi qu'à l'intérieur du cordon.
- Les soufflures : formés par de gaz emprisonné lors de la solidification, qui se présente sous la forme des bulles. **[41]**

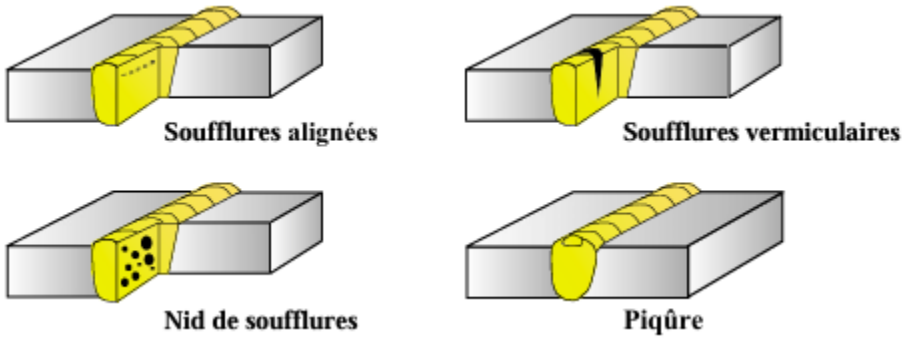



**Figure II. 10: Illustration des défauts de soufflures ou cavités. [42]**

### II.6.3. Défauts de pénétration :

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé. Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci. Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure. **[43]**

#### II.6.3.1. Cause des défauts :

- Vitesse d'avance trop lente
- Intensité du courant trop forte
- Mauvaise préparation des bords
- Arc trop court − Vitesse d'avance trop élevée
- Intensité du courant trop faible
- Métal de base trop épais et froid

#### II.6.3.2. Moyens de prévention :

- Augmenter la vitesse
- Diminuer l'intensité
- Utiliser le joint approprié
- Éloigner la torche
- Diminuer la vitesse.
- Augmenter l'intensité

- S’assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée **[43]**

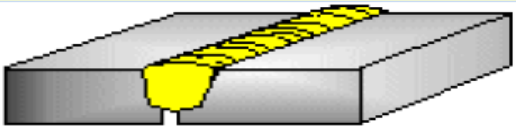
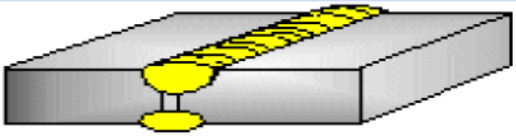
| Désignation | Illustration |
|---|---|
| Manque de pénétration |  |
| Manque d'interpénétration |  |

**Figure II. 11: Défaut de pénétration. [44]**

### II.6.4. Défauts divers :

Ce groupe englobe d’autres anomalies comme la contamination di métal de soudure, l’oxydation de surface et des défauts liés aux matériaux ou à l’environnement de soudage. **[31]**

## II.7. Coupe du tube :

Après la formation du tube, il est sectionné en longueurs précises en fonction des besoins du projet.



**Figure II. 12: Équipement industriel de découpe de tubes.**

## II.8. Nettoyage de tube :

Le tube est nettoyé pour éliminer les impuretés ou les résidus issus du soudage et de la fabrication, ce qui améliore sa qualité et la prépare aux inspection et tests.



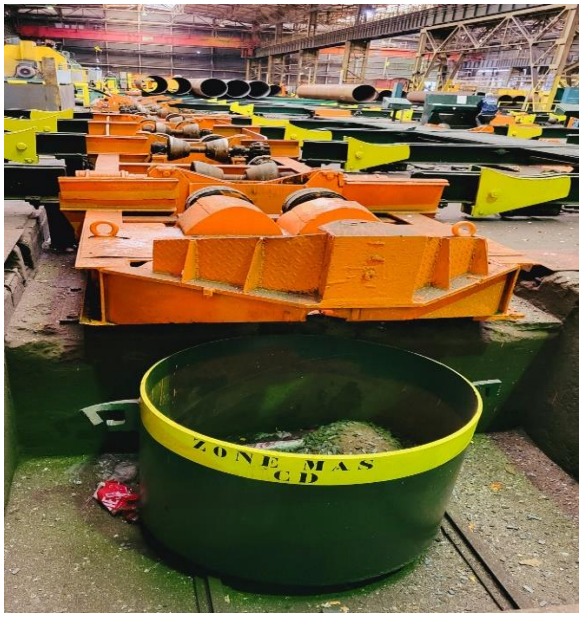



**Figure II. 13: Nettoyage de tube.**

## II.9. Contrôle des tubes soudés :

### II.9.1. Contrôle des bobines :

Avant la fabrication des tubes, un contrôle à la réception des bobines est effectué sur la base des spécifications techniques (forme, dimensions, défauts de surface tels que les empreintes et les griffures), de la liste de colisage et la spécification des bobines dans le but de s'assurer la des bobines reçues avec les documents d'accompagnement.

Un second contrôle consiste à la vérification des documents d'accompagnement (certificats d'analyse chimique et mécaniques) établis par le fournisseur. Les bobines conformes sont saisies sur une liste de réception, et sont identifiées par un marquage indélébile comportant le numéro de la bobine, le numéro de la coulée, la nuance de l'acier, le poids de la bobine, les dimensions, le nom du fournisseur et l'identification du projet. Cette identification permet d'assurer la traçabilité du produit réceptionné. Les bobines non conformes sont isolées avec un marquage spécifique. Contrôles des tubes. **[45]**

### II.9.2. Contrôles des tubes :

Lors de fabrication, le tube est soumis à des essais non destructifs (CND) ainsi qu'à des essais destructifs (CD). Ces contrôles concernent le métal de base et la zone de soudure.

#### II.9.2.1. Contrôle non destructif (CND) :

L'objectif des contrôles non destructif (CND) est donc la mise en évidence de toutes les défectuosités susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. C'est pourquoi le recours aux CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits et de la gestion des risques, assurant ainsi la sécurité des personnes et des biens. Il comporte un contrôle des bobines à la réception, et le contrôle des tubes pour valider la conformité des tubes. Ce dernier se déroule selon les étapes suivantes : **[46]**

- Contrôles visuels
- Contrôle aux ultrasons
- Contrôle par radiographie
- Epreuve hydrostatique
- Contrôle final

##### II.9.2.1.1. Contrôle visuel :

L'examen visuel est le plus simple et le premier des contrôles devant être mise en œuvre. Il permet de déceler les défauts de formes aux autres défauts débouchant en surface des joints soudés. **[47]**



**Figure II. 14: Contrôle visuel. [42]**

Les défauts cités ci-après relèvent du contrôle visuel :

Les manques d'épaisseurs ou effondrements, les caniveaux internes ou externes, les morsures, les défauts plans débouchant en surface, les soufflures et inclusions débouchant en surface, les rochages. **[47]**

**Tableau II. 1: paramètre de contrôle visuel. [39]**

| Paramètre | Unité | Méthode de mesure |
|---|---|---|
| Diamètre | mm | Micromètre (ruban gradué) |
| Épaisseur de la paroi | mm | DM2 (micromètre) |
| Longueur | mm | Double décamètre |
| Rectitude | mm | Fil à plomb et règle |
| Équerrage des extrémités de tube | mm | Équerre |
| Effet de toit | mm | Comparateur |
| Dénivellation (décalage de soudure) | mm | Comparateur |
| Hauteur du cordon de soudure | mm | Calibre d'élévation |
| Largeur de cordon de soudure | mm | Règle |
| Angle de chanfrein | mm | Compas de chanfrein réglable |
| Talon de chanfrein | mm | Règle |
| Enfoncement | mm | Règle |
| Masse de tube | Kg | Balance |

### II.9.2.1.2. Contrôle ultrasons :

Si tous les matériaux sont susceptibles de propager des vibrations mécaniques, leurs structures et notamment I 'amortissement interne, I 'hétérogénéité et I 'anisotropie qu'elles induisent peuvent réduire les possibilités d'utiliser les méthodes de contrôle ultrasonore Les aciers non alliés et faiblement alliés ne présentent pas ces inconvénients. De par l'étendue de leurs emplois comme constituant de structure, ils font l'objet de la majorité des recherches de défauts dans les soudures.

Le contrôle des alliages. Légers, des fontes, des alliages cuivreux, des aciers alliés et plus particulièrement des aciers inoxydables austénitiques est délicat en raison de la structure grossière de ces matériaux. L'emploi de techniques et de matériel spécifique est souvent nécessaire.

Recherche et caractérisation des défauts dans les soudures :

La recherche de l'adéquation entre la sécurité et le coût du contrôle d'une structure conduit à réduire le champ d'investigation. Ainsi, par exemple, la recherche des défauts transversaux n'est pas systématique. Ce sont les normes, codes et spécifications qui fixent les modalités du contrôle et son étendue. La localisation des défauts et la détermination de leurs longueurs sont des opérations relativement aisées et précises. L'identification d'une anomalie et I 'estimation de sa hauteur, constituent, lors d'un contrôle manuel classique, des opérations dont le résultat peut être entaché d'erreurs importantes. Des techniques récentes sont susceptibles de faire évoluer favorablement la situation dans ces deux derniers domaines. **[48]**

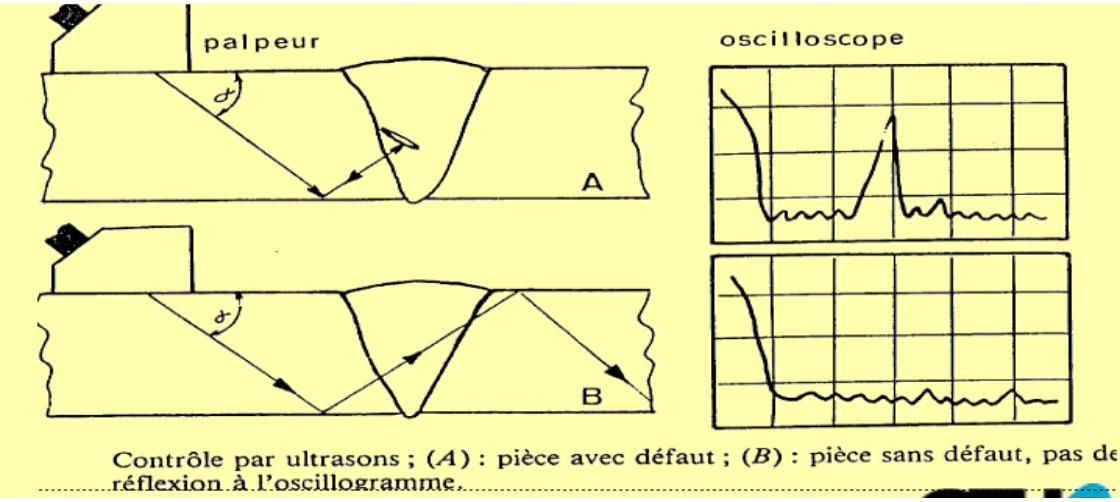



**Figure II. 15: CND Ultrason. [49]**

### II.9.2.1.3. Contrôle par radiographie :

C'est une méthode qui utilise la propriété des rayons X ou de faibles longueur d'onde, aptes à traverser la matière. L'intensité du rayonnement est modifiée selon sa traversée selon qu'il rencontre le matériau sain ou les défauts inclus, en effet, un récepteur radiographique placé derrière l'objet enregistre les variations du faisceau émergent ce qui se traduit par une image ou un film comportant des différences de densité ou contraste, montrant les imperfections de la matière.

Ce contraste entre l'image d'un domaine contenant un défaut et celle d'un domaine exempt de défaut permet à l'observateur de distinguer l'imperfection. Cette méthode permet :

- La détection de la corrosion interne ou externe des tuyauteries calorifugées ou non
- La recherche d'obstructions de tuyauteries ou d'accessoires

Cette technique est surtout utilisée dans le cadre de la politique préventive conditionnelle des entreprises pour identifier d'éventuels défauts préalablement constatés. **[50]**

### II.9.2.1.4. Contrôle hydrostatique :

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test non destructif final. Les tubes sont testés à 90% de leur limité élastique selon API 5L et la spécification du client, en respectant la règlementation algérienne (DDP). Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai pendant au moins 15 secondes. Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes. **[31]**



**Figure II. 16: Test hydrostatique. [47]**



**Figure II. 17:** Manomètres de mesure de pression dans l'unité de teste hydrostatique



**Figure II. 18:** Système de surveillance des données du test hydrostatique.

### II.9.2.1.5. Contrôle final :

C’est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours. **[51]**



**Figure II. 19: Inspection visuelle et marquage final des tubes. [51]**



**Figure II. 20: Tube fini sans revêtement.**

### II.9.2.2. Contrôle destructif (CN) :

Les Contrôle destructives des tubes enroulés par soudure renforcent la qualité de la production. Il s'agit d'une série de tests mécaniques réalisés conformément aux normes API 5L. **[47]**

## II.10. Prélèvement des échantillons :

Les échantillons pour les essais destructifs sont prélèves d'un anneau du tube obturé a l'une des extrémités, désigné pour le test .La paire de plaques (métal de base, métal de base soudé) sont prélevés transversalement a l'axe du tube. **[52]**

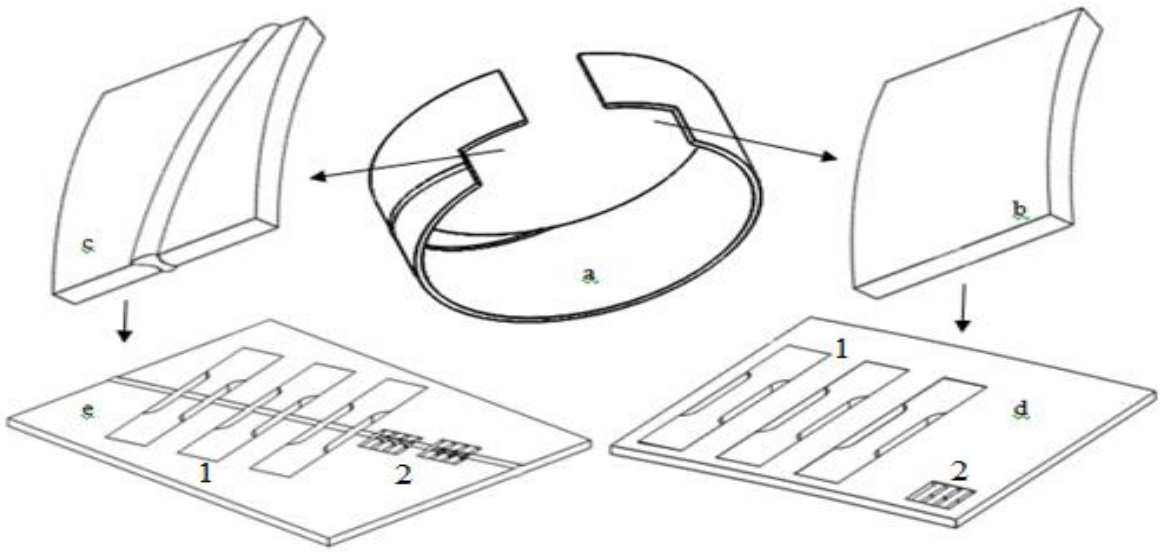



**Figure II. 21: Schéma de prélèvement des échantillons pour les essais destructifs.**

Nous avons réalisé quatre types d'essais mécaniques en conformité avec les normes API 5L et avec les spécifications du client.

- Essai de traction
- Essai de résilience
- Essai de dureté
- Essai de pliage

## II.11. L'essai de traction :

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante.

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette. **[53]**

## II.12. Machines d'essais :

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système de démarrage. Grâce au micro-ordinateur, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches. **[54].** La machine de traction doit être illustrée dans la **figure II.22.**



**Figure II. 22: Machines d'essais de traction. [51]**

## II.13. Les éprouvettes :

Les éprouvettes utilisées pour l'essai de traction sont généralement de section constante, cylindriques ou prismatiques, avec des extrémités adaptées pour la fixation. Afin de garantir des résultats fiables sous une contrainte axiale, la zone de mesure doit être éloignée des zones de fixation pour éviter toute influence des mors. Les têtes de l'éprouvette doivent être plus résistantes que la zone centrale afin d'éviter toute déformation ou rupture prématurée.

La limite d'écoulement plastique étant sensible aux contraintes latérales, il est essentiel de minimiser l'effet de la force de serrage. La longueur de base ($L_o$) est définie entre deux repères utilisés pour la mesure de l'allongement à l'aide d'un extensomètre. Ces repères doivent être tracés avec précision pour éviter qu'ils ne deviennent des points de rupture.

Lors de l'application progressive de la charge, on observe d'abord un allongement élastique uniforme, suivi d'un allongement plastique après la limite d'élasticité. À l'approche de la rupture,une striction (réduction de section localisée) apparaît. Finalement, la courbe force-allongementdépend non seulement de la déformation, mais aussi des dimensions géométriques de l'éprouvette. **[49]**

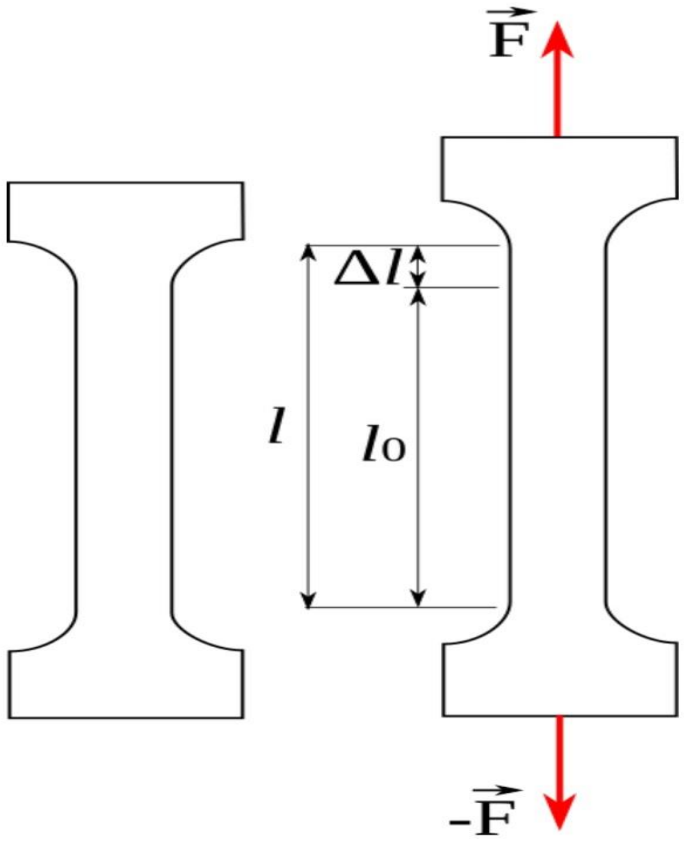



**Figure II. 23: éprouvette de traction. [55]**

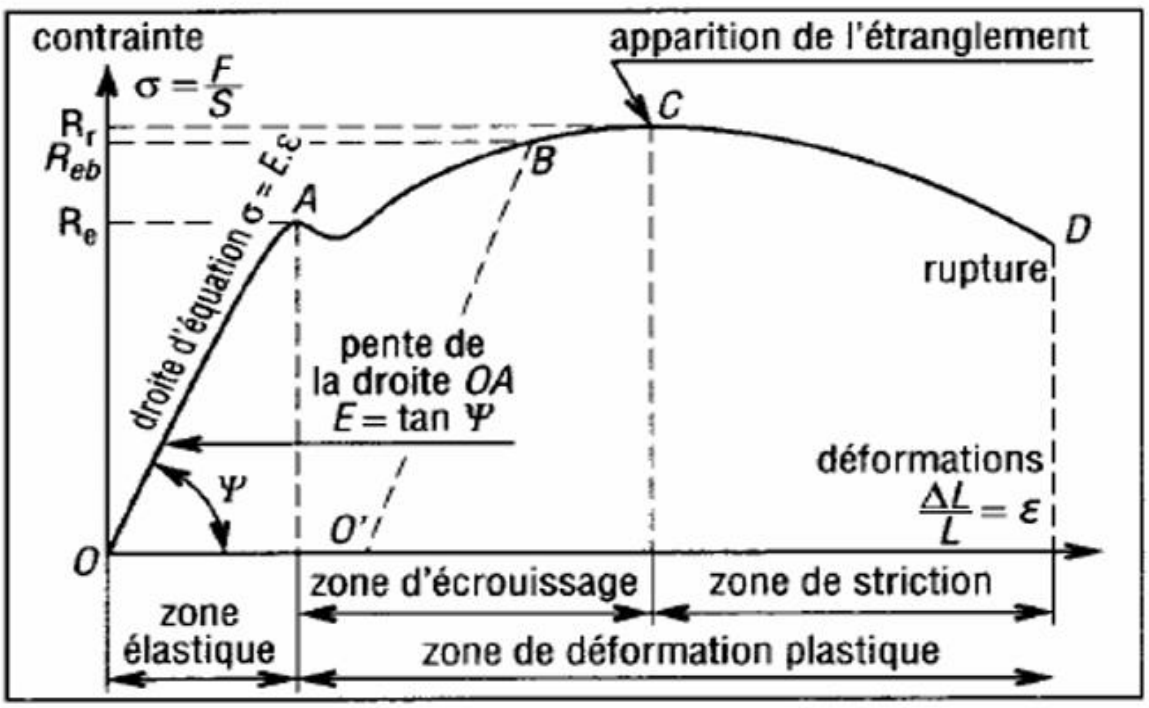



**Figure II. 24: Courbe de traction d'un matériau ductile présentant un décrochement. [49]**

## II.15. Caractéristiques obtenues lors d'un essai de traction :

**Le module d'Young E (MPa) :**

On le définit comme la pente de la courbe de traction dans la zone élastique (de l'origine à Re). On le considère généralement constant pour tous les types d'acier et on dit couramment : E=210000Mpa, souvent arrondi à 200000Mpa.

$$\sigma = E \times \varepsilon \Rightarrow E = \sigma/\varepsilon \quad \text{..... (1)}$$

**La limite d'élasticité Re (MPa) :**

Elle délimite la frontière du domaine élastique. Pour les valeurs excédant, le matériau cesse de se déformer de manière élastique et passe à une déformation plastique (l'éprouvette ne reprend plus ses dimensions d'origine après « décharge », il persiste un allongement permanent un phénomène de persistance).

$$Re = Fe/S0 \quad \text{..... (2)}$$

**La résistance ultime, ou contrainte maximum de traction Rm (MPa) :**

C'est le seuil maximal que le matériau peut tolérer avant d'atteindre la zone de striction. Employé dans le calcul des dispositifs de sécurité. Communément désignée comme résistance à La rupture.

$$Rm = F_m/S_0 \quad \text{..... (3)}$$

**L'allongement à rupture A% (%) :**

L'extension désigne la déformation maximale relative autorisée d'un acier avant qu'il ne se brise.

$$A\ (\%) = L - L_0 / L_0 * 100 \quad \text{..... (4)}$$

Dans cette expression, $L_0$ et L sont respectivement les longueurs initiales et finales après rupture.

**Striction à la rupture :**

La déformation due à la striction ne demeure pas constamment uniforme après un certain étirement, elle se concentre dans une région particulière du spécimen. Il s'agit du phénomène de striction, lié à l'instabilité plastique.

$$Z\ (\%) = (S_0 - S) / S_0 * 100 \quad \text{..... (5)}$$

Dans ce contexte, $S_0$ et S désignent respectivement les sections initiale et finale suite à une rupture.

**Coefficient de Poisson :**

Tout matériau qui s'étire dans une direction va nécessairement se contracter dans la direction opposée. C'est attribuable à la préservation de la matière. Une éprouvette qui s'étire va donc observer son diamètre se réduit. En désignant ε par l'allongement longitudinal et εr par l'allongement transversal, nous pouvons formuler le coefficient de Poisson :

$$\nu = \boldsymbol{\varepsilon_r} / \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{..... (6)}$$

**II.16. L'essai de résilience :**

(L'essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre K.

**II.17. Principe de l'essai Charpy :**

Le principe de base consiste à mesurer l'énergie absorbée par la rupture lors du choc d'un barreau rectangulaire de dimensions 10 × 10 × 55 mm, présentant une entaille de 2 mm de profondeur en son milieu (cas de l'éprouvette avec entaille en V) Figure II.25.

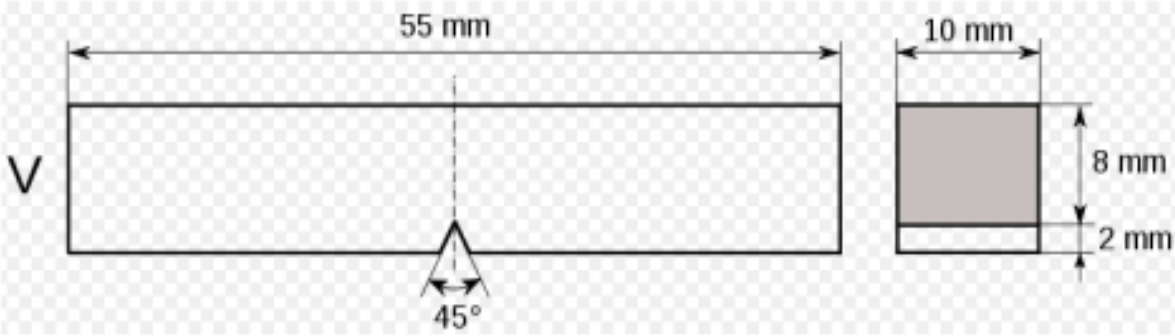



**Figure II. 25: Géométrie des éprouvettes Charpy entaillées en V. [51]**

Le dispositif expérimental est constitué d'un bras oscillant sur lequel est fixé le percuteur (ou marteau) qui vient frapper en son milieu l'éprouvette en butée sur deux appuis distants de 40mm. Au moment du choc, la vitesse du marteau est d'environ 5 m/s (selon la géométrie du pendule). Sous le choc, l'éprouvette se déforme et se rompt entièrement, ou non, selon la résistance du matériau ; elle quitte les appuis, entraînée par le marteau qui continue sa course pendulaire. **[56]**

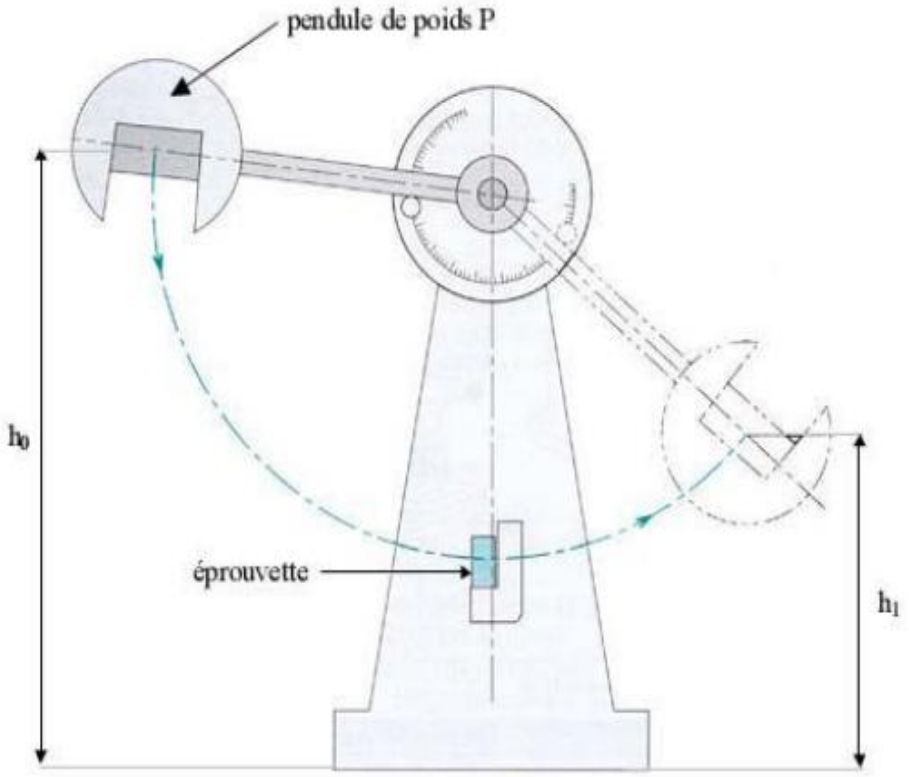



**Figure II. 26: Mouton de Charpy. [45]**

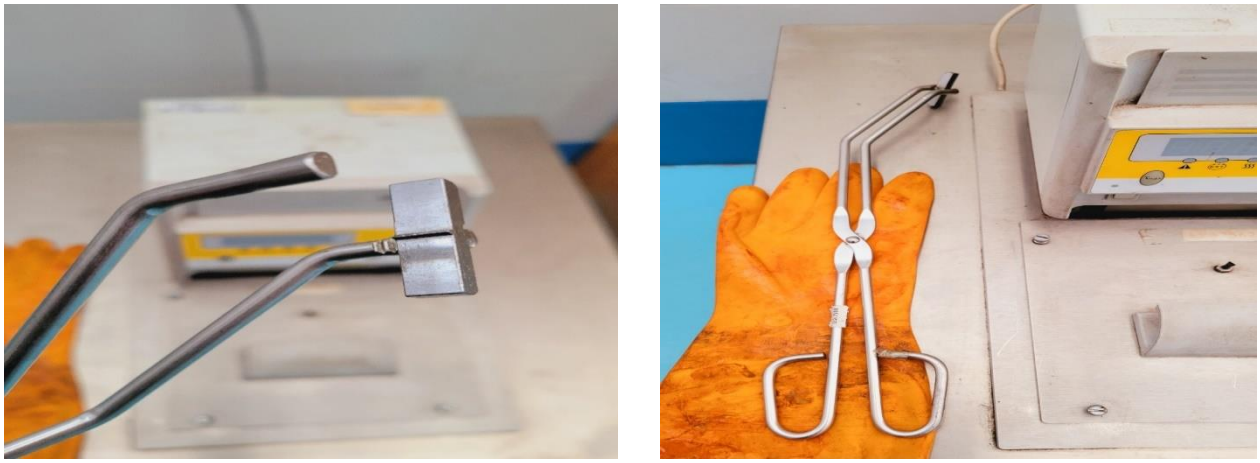


**Figure II. 27: Pince de préhension pour four de laboratoire.**

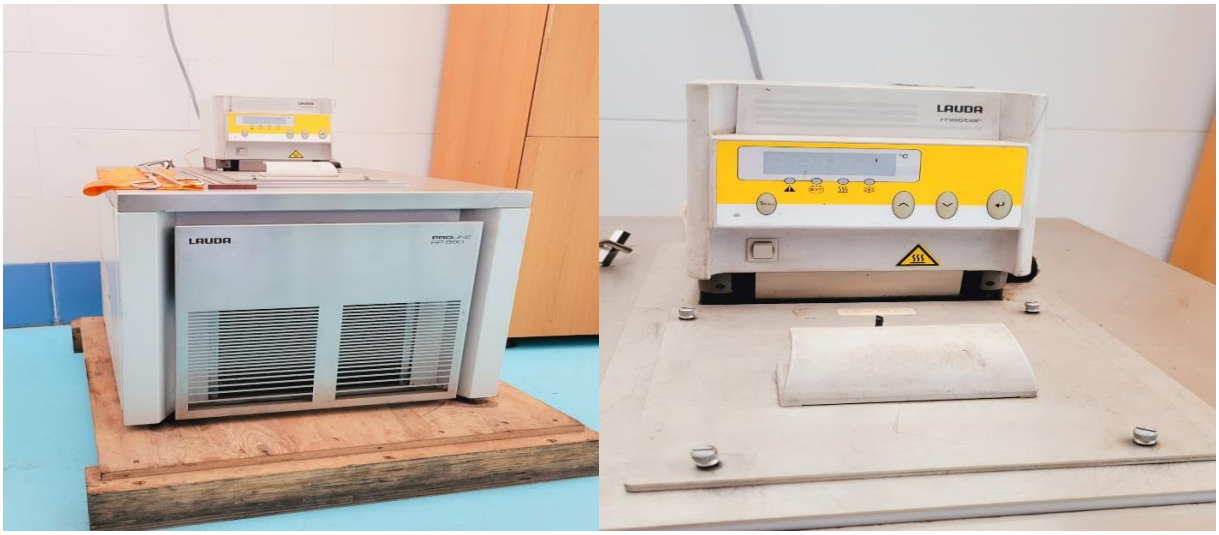



**Figure II. 28: Four de trempe utilisé dans l'essai de dureté.**

## II.18. L'essai de dureté :

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. Les essais de la dureté permettent de définir quelques caractéristiques des matériaux tels que ; (les modules d'Young et de Coulomb, coefficient de poisson, dureté, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.), mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. **[57]**

## II.19. Définition de dureté :

La mesure de la dureté correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété mécanique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration**. [58]**

## II.20. Les types d'essai de dureté :

Il existe trois types courants de teste de dureté :

- Essai Brinell
- Essai Rockwell
- Essai Vickers

Mais dans l'industrie des pipelines de pétrole et de gaz, on utilise principalement le teste de dureté Vickers.

### II.20.1. Essai de dureté Brinell :

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène **(Figure II.29)**. Le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, ,5mm et 10mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre $d$. **[59]**

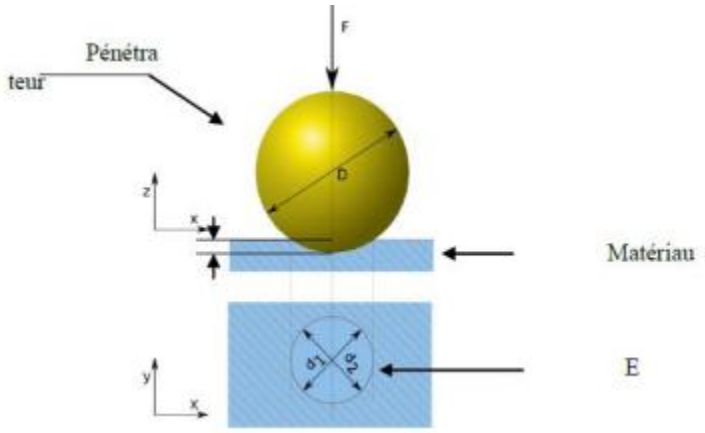



**Figure II. 29: Principe de dureté brinell. [59]**

La force $F$ étant exprimée en kg, le diamètre de l'empreinte en mm et la dureté Brinell $HB$ est exprimée en kgf /mm$^2$ selon la relation suivante :

$$HB=\frac{2F}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})} \quad \text{..... (7)}$$

F : Charge appliquée (Kgf)

D : Diamètre de la bille (mm)

d : Diamètre de l'empreinte (mm)

**II.20.2. Essai de dureté Rockwell :**

Les essais de dureté Rockwell (HR) sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge. L'essai se déroule en trois phases :

• Application sur le pénétrateur d'une charge initiale F0= 98 N. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I. Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesure la dureté Rockwell :

• Application d'une force supplémentaire F1. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P.

• Relâchement de la force F1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement. **[60]**

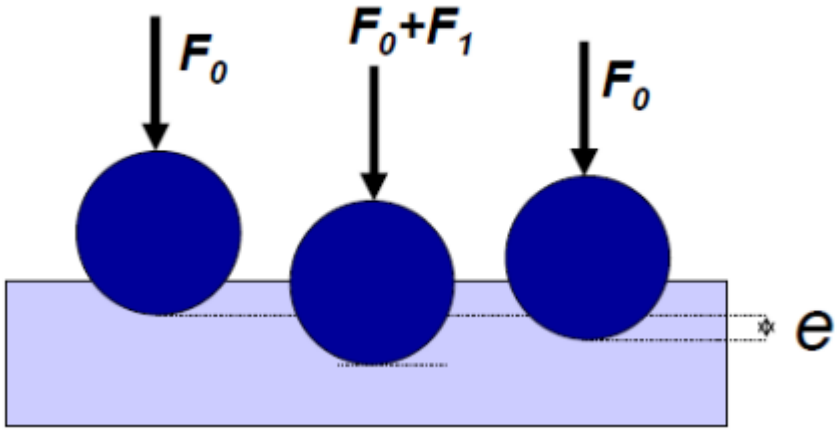



**Figure II. 30: principe de la dureté Rockwell. [54]**

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

$$HR=130-\pi \quad \text{..... (8)}$$

**II.20.3. Essai de dureté Vickers :**

**II.20.3.1. Principe :**

Le principe de l'essai Vickers est le même que celui de l'essai Brinell, seule la forme du pénétrateur change. L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme

de pyramide droite en diamant, à base carrée, d'angle au sommet égal à 136°, sous une charge F bien déterminée, et à mesurer sur l'empreinte, laissée sur la surface après enlèvement de la charge, deux diagonales d1 et d2. La mesure est effectuée à l'aide d'un système optique approprié. **[61]**

$$HV=\frac{1.485*F}{d^2} \quad \text{..... (9)}$$

d = $(d_1+d_2)/2$

F : Charge appliquée (Kgf)

d : La diamètre moyenne de l'empreinte

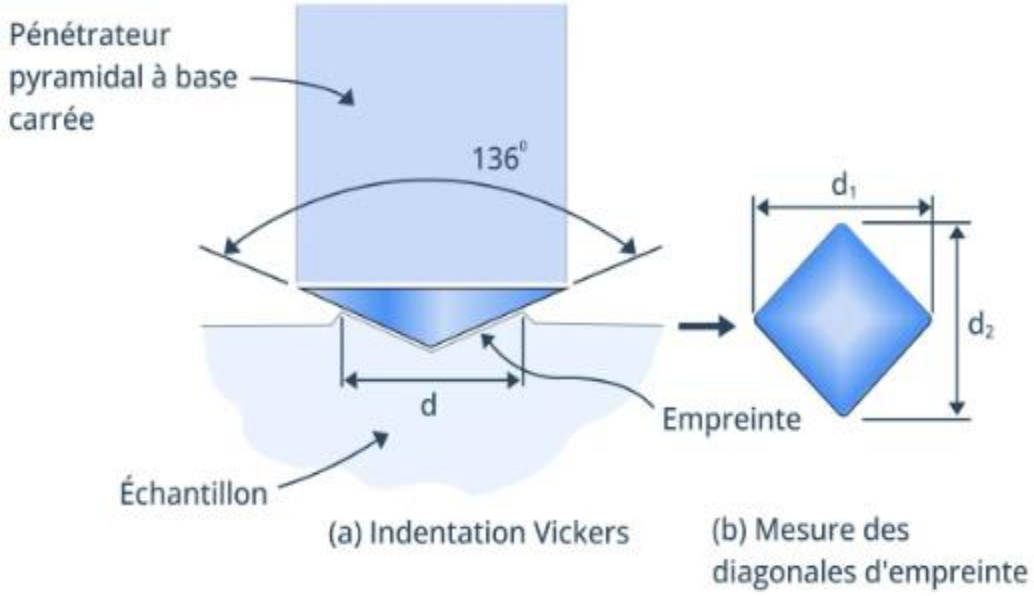



**Figure II. 31: principe de la dureté Vickers. [62]**

**II.20.3.2. Conditions d'essai :**

Cet essai est décrit dans une norme propre aux aciers. Pour les alliages d'Aluminium et de Cuivre, il faut se reporter à une autre norme.

• L'essai est normalement effectué à température ambiante,

• La charge est appliquée progressivement de façon à atteindre au bout d'un temps déterminé (≅15 secondes) la charge fixée, sans chocs ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.

• On préparera la surface pour éviter toute altération.

• L’épaisseur minimale de la pièce doit être suffisante afin que la pénétration de la pyramide droite ne déforme pas la pièce sinon la mesure ne sera pas fiable. Elle est choisie de telle sorte qu’elle soit supérieure ou égale à 1,5 fois la diagonale d de l’empreinte.

• Pour des essais successifs sur la même pièce, des conditions de positionnement sont fixées pour assurer la conformité de ces essais. **[61]**

### II.21. L’essai de pliage :

L’essai de pliage est une méthode classique utilisée dans le domaine de la métallurgie et du contrôle qualité pour évaluer le comportement d’un matériau, notamment sa ductilité et sa résistance à la fissuration, lorsqu’il est soumis à une déformation plastique. Cet essai consiste à plier une éprouvette métallique selon un angle déterminé (généralement 90° ou 180°) autour d’un mandrin ou entre deux appuis, afin de simuler les contraintes que le matériau pourrait subir en service. L’objectif principal est de détecter la présence de défauts internes ou de fissures qui pourraient compromettre la performance mécanique du matériau. L'essai est particulièrement utilisé pour le contrôle des soudures, car il permet de vérifier la qualité de la zone fondue ainsi que les zones affectées thermiquement. Plusieurs paramètres influencent les résultats de l’essai, tels que le rayon de pliage, l’épaisseur de l’éprouvette, l’angle de pliage, et la direction du pliage par rapport au sens de laminage. L’interprétation des résultats se fait principalement par observation visuelle, la présence de fissures, de délaminage ou de tout autre défaut visible est considérée comme une non-conformité. L’essai de pliage est normé par différentes institutions telles que l’ISO, garantissant une méthode d’essai reproductible et fiable dans divers contextes industriels. **[63]**

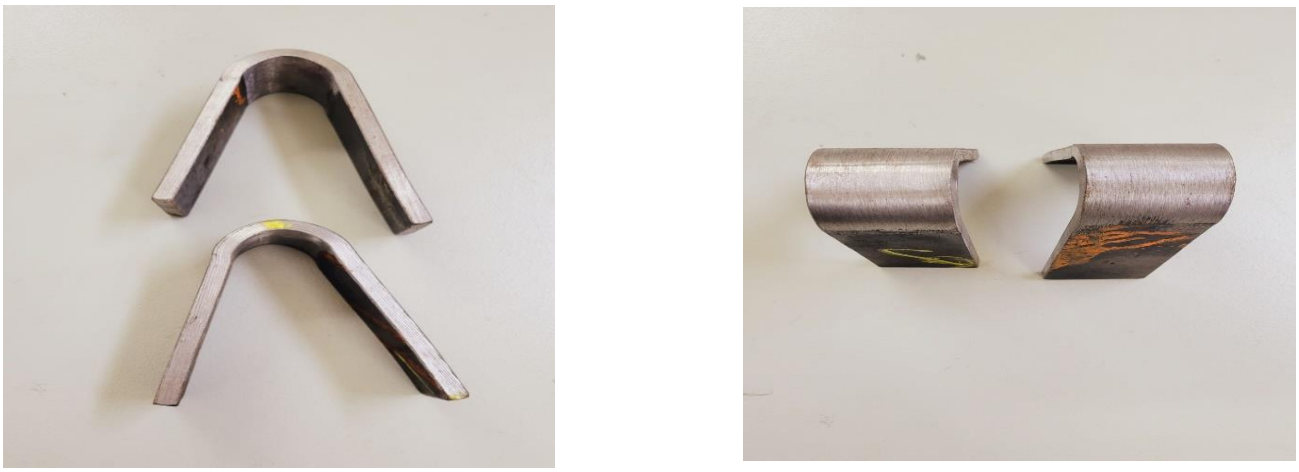


**Figure II. 32: Éprouvettes d’essai de pliage**




**Figure II. 33: Machine d'essai de pliage.**

## II.22. Revêtement des tubes :

Le revêtement des tubes soudés en spirale est une étape cruciale dans la construction des pipelines. Il s'agit d'appliquer une couche protectrice sur la surface des tubes afin de prévenir la corrosion et d'assurer la durabilité du pipeline. Le revêtement des tubes en spirale peut être réalisé en utilisant différentes méthodes, avec l'une des approches les plus courantes étant l'utilisation de revêtements à base d'époxy. Ces revêtements offrent une excellente résistance à la corrosion et sont largement utilisés dans l'industrie des pipelines. **[52]**

## II.23. Types du revêtement :

Une fois les tubes soudés en spirale sont préparés, il est courant d'appliquer deux types de revêtements : le revêtement externe et le revêtement interne. **[52]**

### II.23.1. Revêtement extérieur :

Les domaines d'application sont principalement : les canalisations enterrées ou posée en surface, et les canalisations émergées en eau douce ou salée. Le revêtement est constitué de :

- Une couche de résine époxydique appliquée par pulvérisation électrostatique de 50 à 80 microns d'épaisseur.
- Une deuxième couche en copolymère destiné à assurer l'adhérence polyéthylène.
- Une couche de polyéthylène extrudé.

Les avantages de revêtement extérieur en polyéthylène se caractérisent par une grande inertie chimique, une excellente adhérence de revêtement sur l'acier, un apport au réseau d'une résistance fiable vis-à-vis des sols agressifs et des courants vagabonds. **[46]**

### II.23.1.1. Les étapes du revêtement :

**1er étape** : échauffement de la pipe jusqu'à 170°c, 180°c

**2eme étape** : bouchement de la pipe par des joints en mousse

**3eme étape** : le pipe est entraîné dans un machine de grenaillage appelé grenailleuse. Puis, la machine bombarde la surface externe par des grains solides pour l'arrachement de la couche corrodé

**4eme étape** : réchauffé la pipe jusqu'à la température de 170°c

**5eme étape** : le pipe est rentré dans une machine pour une 1ère couche de revêtement externe par une résine d'époxyde qui est anti corrosion. Puis, par une bobine support une résine d'adhésive, en même temps, il existe autre bobine ou rouleau de polythélène pour former une ''sleeve'' douille sur les deux premières couches, cette sleeve là est utilisé pour résister aux effets externe de l'environnement.

**6eme étape** : refroidissement de l'ensemble pipe revêtement pour la solidification des douilles

**7eme étape** : incliné la pipe puis injecté de l'aire chaud pour qu'il sèche

**8eme étape** : brosser les bornes de la pipe pour crée une zone de soudure entre deux pipes. **[47]**

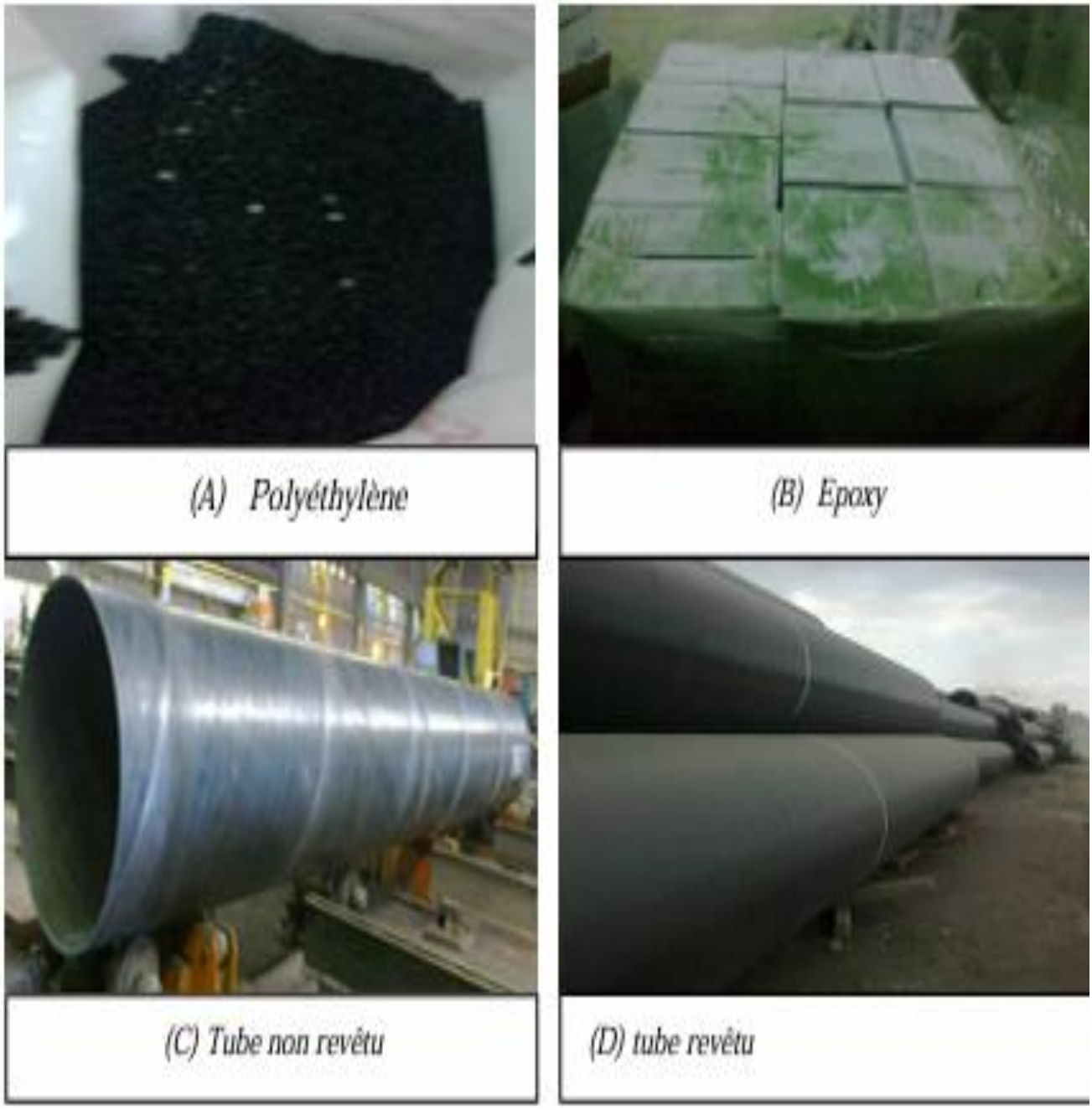



**Figure II. 34: revêtement extérieur. [46]**

### II.23.2. Revêtement intérieur :

Le revêtement intérieur en résine époxyde s'applique sur les tubes destinés au :

• Transport et à la distribution du gaz sec.

• Transport du gaz humide, d'eau potable brute et industrielle.

L'aspect du revêtement est brillant, lisse et répond aux exigences de la norme API RP 51 et au standard AWWC210. **[64]**

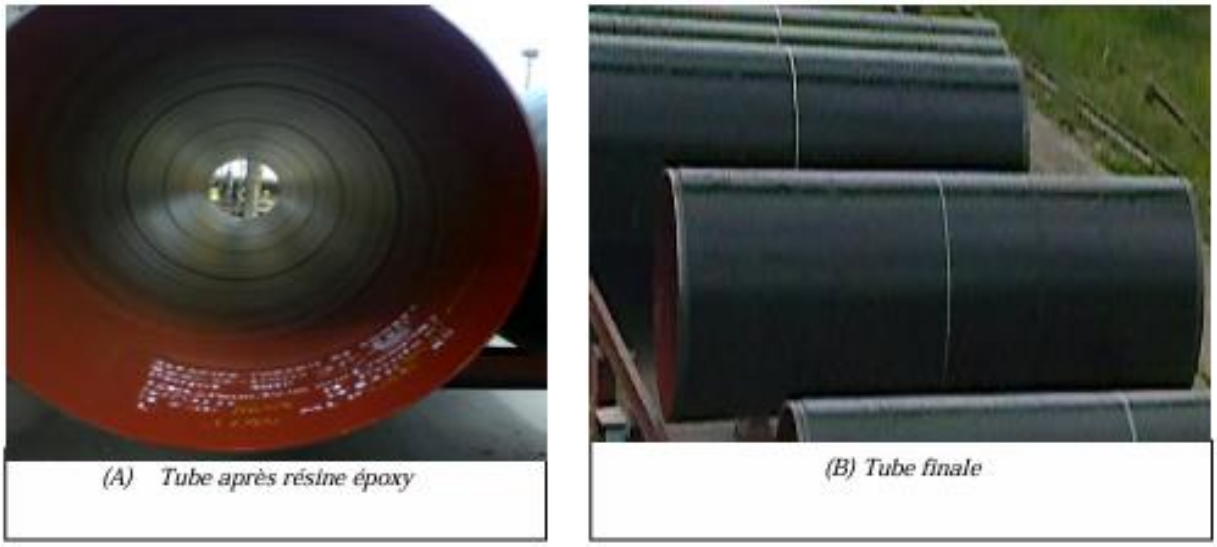



**Figure II. 35: Tube revêtu. [46]**

## II.24. Conclusion :

L'étude menée dans ce chapitre a permis de mettre en lumière les différentes étapes de fabrication des tubes soudés en spirale au sein de l'unité ALFAPIPE, un acteur majeur dans le domaine de la fabrication de conduites pour le transport des hydrocarbures et de l'eau. Depuis la réception des bobines d'acier jusqu'aux contrôles finaux, en passant par le formage, le soudage et les revêtements, chaque étape est rigoureusement encadrée et conforme aux normes internationales, notamment l'API5L.

Les procédés de soudage SAW et SMAW, largement utilisés dans l'unité, ont été étudiés pour démontrer leur efficacité et leur capacité à garantir une soudure solide et fiable. En parallèle, les différentes méthodes de contrôle, destructives et non destructives, jouent un rôle fondamental dans l'assurance qualité et la sécurité des produits finis. Le revêtement interne et externe contribue également à la protection des tubes contre la corrosion, prolongeant ainsi leur durée de vie en conditions extrêmes.

L'historique d'ALFAPIPE, marqué par des évolutions continues et des investissements stratégiques, témoigne de son engagement à répondre aux exigences croissantes du secteur énergétique national. Son savoir-faire technique et sa capacité d'innovation en font un pilier Essentiel de l'infrastructure industrielle algérienne.

En définitive, cette unité incarne une réussite technologique et industrielle, démontrant que la maîtrise des procédés de fabrication, associée à un contrôle qualité rigoureux, est la clé pour produire des équipements fiables et performants au service du développement national.

# CHAPITRE III.

# Resultats Experimentaux et Discussion

### III.1. Résultats expérimentaux :

## But du travail :

L'objectif principal de ce travail est d'étudier de manière approfondie l'évolution des propriétés mécaniques, chimiques et métallographiques d'un acier faiblement allié de grade X70, spécifiquement utilisé dans la fabrication de tuyaux destinés au transport des hydrocarbures. Cet acier, conforme aux exigences de la norme API 5L, est reconnu pour sa combinaison optimale de résistance mécanique et de bonne soudabilité, ce qui en fait un matériau de choix pour les applications dans les industries pétrolières et gazières.

L'étude porte à la fois sur le métal de base (MB) et sur le matériau comportant un joint soudé, en mettant l'accent sur les zones affectées par le procédé de soudage, à savoir la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF). Ces zones présentent souvent des modifications microstructurales susceptibles d'influencer les performances globales du matériau en service.

Ainsi, ce travail vise à caractériser et comparer le comportement du matériau dans ses deux états (brut et soudé), à travers une série d'analyses mécaniques (essais de traction, dureté), chimiques (composition élémentaire) et métallographiques (examen microstructural). Cette démarche permettra de mieux comprendre l'impact du soudage sur les propriétés de l'acier X70, et d'évaluer sa fiabilité et sa durabilité dans les conditions d'exploitation réelles des pipelines.

### III.1. Résultats expérimentaux de Contrôle visuelle :

Le premier contrôle des soudures est visuel pendant et après l'exécution de chaque cordon. En général, c'est le soudeur lui-même qui l'effectue.

Le but de cette fiche est de donner quelques informations succinctes sur ce moyen de contrôle.

**Tableau III. 1: résultats du contrôle visuelle et dimensionnel du tube.**

| | | DEBUT | MILLIEU | FIN | MINI | MAX |
|---|---|---|---|---|---|---|
| EPAISSEUR | | 12,7 | 12,9 | 12,8 | 12,0 | 13,2 |
| DIAMETRE EXTREMITE | | 1016,0 | | 1016,5 | 1015 | 1018,2 |
| DIAMETRE CORPS DU TUBE | | | 1016,4 | | 1012,6 | 1018,6 |
| OVALISATION EN EXTREMITE | | 00 | | 1 | 0 | 3 |
| ANGLE CHANFRIEN | | 35º | | 35º | 30º | 35º |
| MEULAE CORDON DE SOUDURE EXT | | 150 | | 160 | 150 | 180 |
| MEULAE CORDON DE SOUDURE INT | | 120 | | 118 | 100 | 120 |
| LONGUEUR | | 10000 | | | 8000 | 12300 |
| LARGEUR DU CORDON DE SOUDURE | EXT | 18 | | 19 | 10 | 20 |
| | INT | 15 | | 16 | 10 | 20 |
| HAUTEUR DU CORDON DE SOUDURE | EXT | 2 | | 2,2 | 0 | 3 |
| | INT | 0,5 | | 0,8 | 0 | 3 |

(Toutes les mesures en mm)

## III.2 : Résultats de la Composition chimique :

L'analyse chimique constitue une étape essentielle dans la caractérisation des matériaux métalliques, notamment pour les aciers utilisés dans des applications critiques telles que le transport d'hydrocarbures. Dans le cadre de ce travail, une attention particulière a été portée à la composition chimique de l'acier employé pour la fabrication des tubes de grade X70, conformément aux exigences de la norme API 5L (4e édition).

Cette norme définit des spécifications précises en termes de teneurs maximales et minimales des éléments d'alliage présents dans l'acier, dans le but d'assurer un bon équilibre entre la résistance mécanique, la soudabilité et la résistance à la corrosion. Les principaux éléments pris en compte dans cette analyse sont : le carbone (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le soufre (S), le phosphore (P), ainsi que d'autres éléments d'alliage présents en faible quantité (microalliages) tels que le niobium (Nb), le vanadium (V) et le titane (Ti).

Comme présenté dans le tableau III.2, les résultats montrent que la composition de l'acier étudié respecte les limites imposées par la norme API 5L. L'acier peut donc être classé comme un acier faiblement allié, c'est-à-dire qu'il contient de faibles proportions d'éléments d'alliage, généralement inférieures à 5 %, ce qui lui confère une bonne soudabilité tout en maintenant des propriétés mécaniques adaptées aux contraintes d'exploitation dans les pipelines.

**Tableau III. 2: Résultats de l'analyse chimique.**

| Éléments | L'indice % | Tube A1589 |
|---|---|---|
| Carbone | **C** | **0 ,064** |
| Soufre | **S** | **0,001** |
| Phosphor | **P** | **0,007** |
| Silicium | **Si** | **0,326** |
| Manganèse | **Mn** | **1,660** |
| Aluminium | **Al** | **0,033** |
| Nibium | **Nb** | **0,052** |
| Vanadium | **V** | **0,004** |
| Titane | **Ti** | **0,018** |
| Nickel | **Ni** | **0,040** |
| Cuivre | **Cu** | **0,023** |
| Chrome | **Cr** | **0,050** |
| Molybdène | **Mo** | **0,014** |
| Fer | **Fe** | **97 ,725** |

### III.3: Résultats expérimentaux de l'essai dureté Vickers (HV10) :

Dans le cadre de la caractérisation mécanique de l'acier de nuance X70, des essais de dureté Vickers ont été réalisés afin d'évaluer la résistance locale du matériau à la pénétration. Ces essais ont été conduits au sein du laboratoire ALFA PIPE, à l'aide d'une machine ZWICK spécialement conçue pour ce type de test, selon la norme standard HV10.



**Figure III. 1: Machine de l'essai de dureté HV10.**

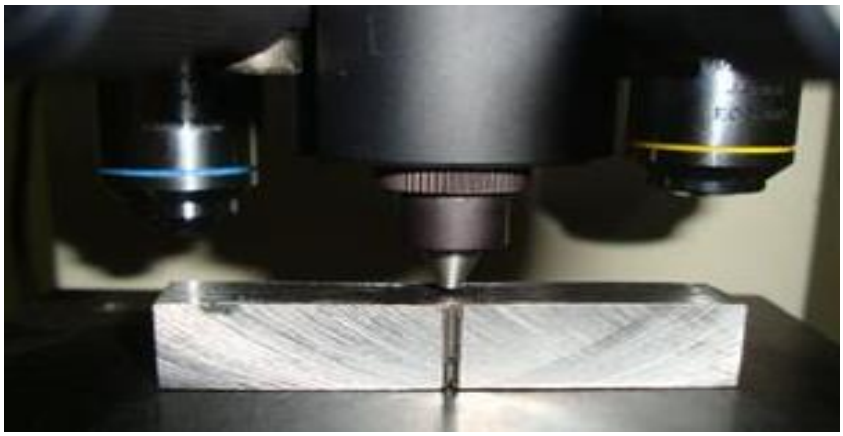


**Figure III. 2: Pénétrateur de la machine de dureté HV10 en contact avec l'éprouvette.**

La machine utilisée est certifiée et régulièrement étalonnée, garantissant ainsi la fiabilité des mesures. De plus, elle est pilotée par ordinateur, ce qui permet un contrôle précis des

paramètres d'essai et une représentation automatisée des courbes de dureté. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes préparées selon les normes, comme illustré dans la figure III.3.

L'essai HV10 (dureté Vickers sous une charge de 10 kg) consiste à appliquer une force constante à l'aide d'un pénétrateur pyramidal en diamant, puis à mesurer la diagonale de l'empreinte laissée sur la surface du matériau. Cette méthode permet d'obtenir une valeur locale de dureté en différents points du matériau, ce qui est particulièrement utile dans l'étude des zones soudées (métal de base, zone fondue et zone affectée thermiquement).

Les valeurs obtenues permettent de comparer la dureté du métal de base avec celle des zones affectées par le soudage (ZF et ZAT), et d'identifier d'éventuelles discontinuités ou pertes de dureté pouvant affecter la performance mécanique globale du matériau en service.

Les points (1, 2, 3, 14, 15,16) sont appliqués sur le métal de base (MB).

Les points (7, 8, 9,10) sont appliqués sur la soudure ou bien sur la zone fondue (ZF).

Les points (4, 5, 6, 11, 12,13) sont appliqués sur la zone de transition ou bien sur la zone affectée thermiquement (ZAT), figure III.3.

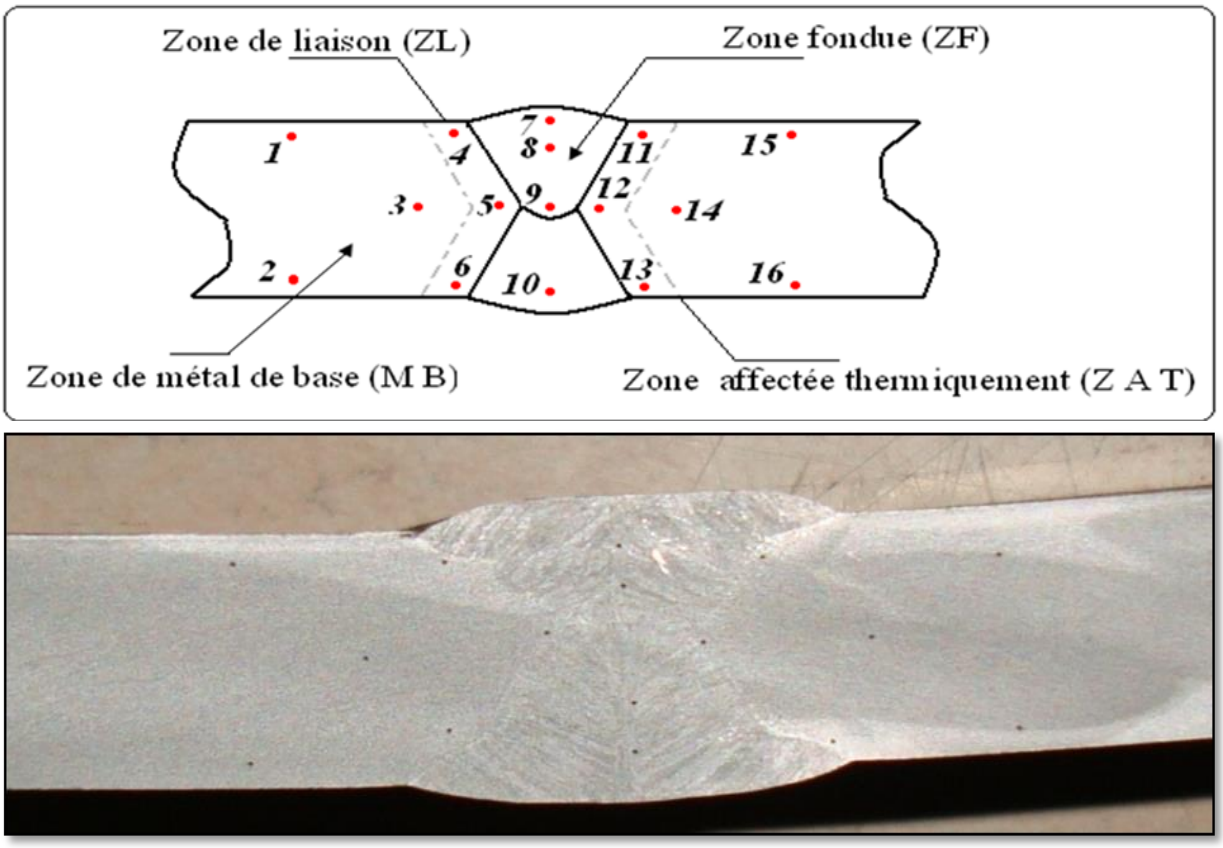



**figure III. 3: Eprouvettes avec joint de soudure pour mesurer la dureté Vickers. [49]**

**Tableau III. 3: Résultats d'essai HV10.**

| Nr | $d_h$ (mm) | $d_v$ (mm) | D (mm) | HV10 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 213 |
| 2 | 0,29 | 0,30 | 0,29 | 214 |
| 3 | 0,28 | 0,29 | 0,28 | 211 |
| 4 | 0,30 | 0,28 | 0,29 | 223 |
| 5 | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 225 |
| 6 | 0,28 | 0,29 | 0,29 | 233 |
| 7 | 0,30 | 0,30 | 0,28 | 225 |
| 8 | 0,28 | 0,30 | 0,29 | 223 |
| 9 | 0,30 | 0,28 | 0,29 | 221 |
| 10 | 0,30 | 0,29 | 0,30 | 226 |
| 11 | 0,29 | 0,29 | 0,30 | 223 |
| 12 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 221 |
| 13 | 0,29 | 0,30 | 0,29 | 230 |
| 14 | 0,29 | 0,30 | 0,28 | 214 |
| 15 | 0,30 | 0,28 | 0,29 | 212 |
| 16 | 0,30 | 0,30 | 0,29 | 211 |

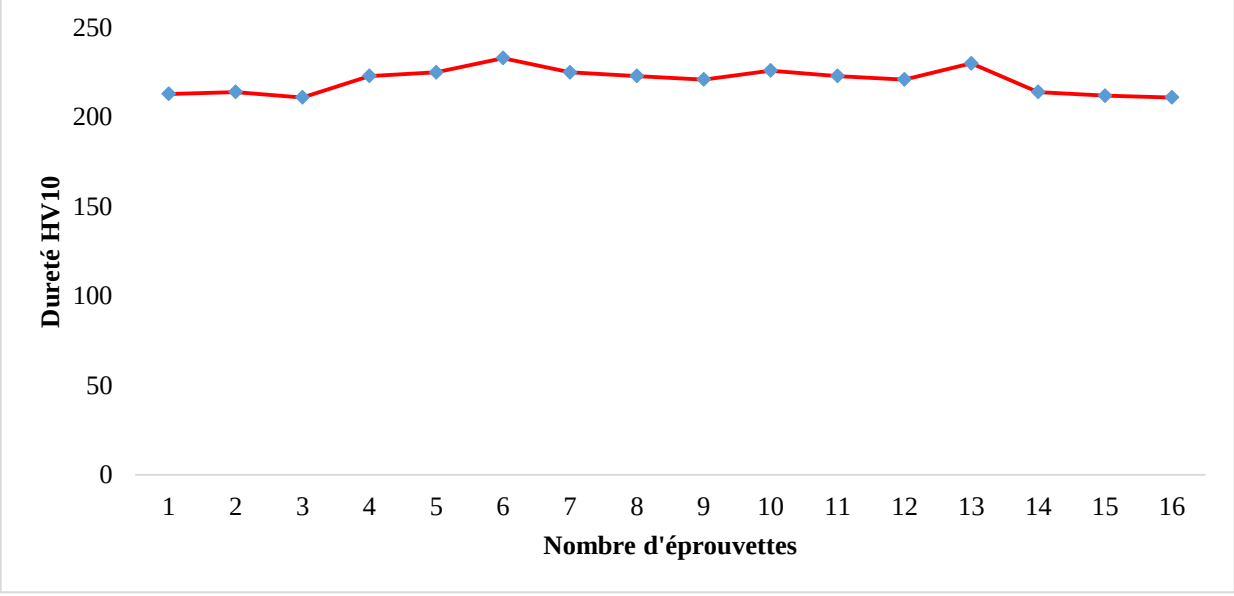



**Figure III. 4: Résultats d'essai dureté Vickers HV10.**

### III. 4: Résultats expérimentaux de l'essai de traction :

Dans le cadre de notre étude, des essais de traction ont été réalisés sur une machine Zwick/Roell, au laboratoire ALFA PIPE, un établissement spécialisé dans l'analyse des matériaux et des structures. Ces essais ont été menés sur des éprouvettes plates, dont les caractéristiques sont précisées dans les figures III.5.



**Figure III. 5: Machine de l'essai de traction.**

La machine utilisée pour les essais est assistée par un système informatique hautement sophistiqué, permettant une automatisation et un contrôle précis des paramètres d'essai. Grâce à cette configuration, le système informatique a facilité la tracée des courbes de traction en temps

réel, et la génération automatique des tableaux de données nécessaires à l'interprétation des résultats.

L'échantillon testé est un tube de diamètre 40'' et d'une épaisseur de paroi de 12.7 mm, fabriqué à partir du matériau Nuance X70, conforme à la norme API 5L, 4ème édition. Cette norme internationale est utilisée pour les tuyaux destinés au transport de gaz et de pétrole, et assure que les matériaux respectent des exigences strictes en termes de résistance mécanique et de performance dans des environnements de pression élevés.

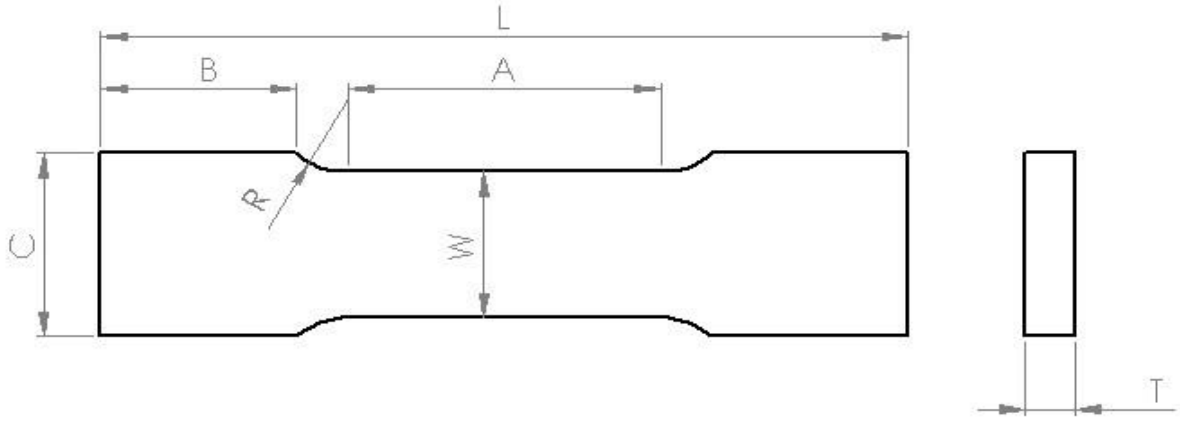



**Figure III. 6 :Éprouvette normalisée de l'essai de traction.**



**Figure III. 7: Éprouvettes de traction avec soudure après la rupture.**



**Figure III. 8: Éprouvettes de traction sans soudure après la rupture.**

Les résultats des essais, notamment les courbes de traction et les données tabulées, ont permis d'évaluer la résistance à la traction, la ductilité et les autres propriétés mécaniques essentielles de ce matériau dans ses conditions réelles d'utilisation.

### III.4.1. Caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques précises des éprouvettes sont répertoriées dans le tableau III.4.

**Tableau III. 4: Dimensions de l'éprouvette d'essai de traction selon la norme API 5L.**

| Désignation | Dimension (mm) | Tolérance (mm) |
|---|---|---|
| Longueur totale min -L- | 200 | min 200 |
| Longueur min de la partie calibrée min -A- | 60 | min 60 |
| Longueur entre repère -G- | 50 | ±0.10 |
| Rayon min -R- | 13 | min 13 |
| Largeur de la partie calibrée -W- | 40 | -6 ; +3 |
| Largeur de la section de préhension -C- | 50 | min 50 |
| Largeur min de la section de préhension -B- | 50 | min 50 |
| épaisseur -T- | 12 .7 | ±0 .5 |

### III.4.2. L'analyse statique et les courbes d'essai de traction :

Dans le cadre de cette étude, une analyse statique ainsi que des essais de traction ont été effectués à une température contrôlée de 25,3 °C. Les essais ont été réalisés conformément à la norme internationale ISO 6892-1, qui spécifie les méthodes d'essai de traction sur matériaux métalliques. Les matériaux testés sont de grades L485 PSL2 et X70, reconnus pour leurs performances mécaniques élevées dans les applications industrielles. L'ensemble des essais a été mené en utilisant une machine d'essai Z1200E, équipée de grips hydrauliques pour assurer umaintien optimal des éprouvettes, et du système de mesure d'élongation MakroXtens, garantissant une précision élevée dans la mesure des déformations.

**Tableau III. 5: Résultats de l'essai de traction pour l'échantillon A1589.**

| Désignation séries | Sous série Nr | Désignation éprouvette | S0 mm2 | Rt 0.5 MPA | Rm | $Rt_{0,5}/Rm$ | A50 % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1589 | max | | | 635,0 | 760,0 | 0,90 | - |
| | min | | | 485,0 | 570,0 | - | 20,0 |
| | | TN | 490 ,0 | 584,4 | **736,2** | 0,79 | 31,0 |
| | | TS | 488,4 | - | **716,5** | - | - |

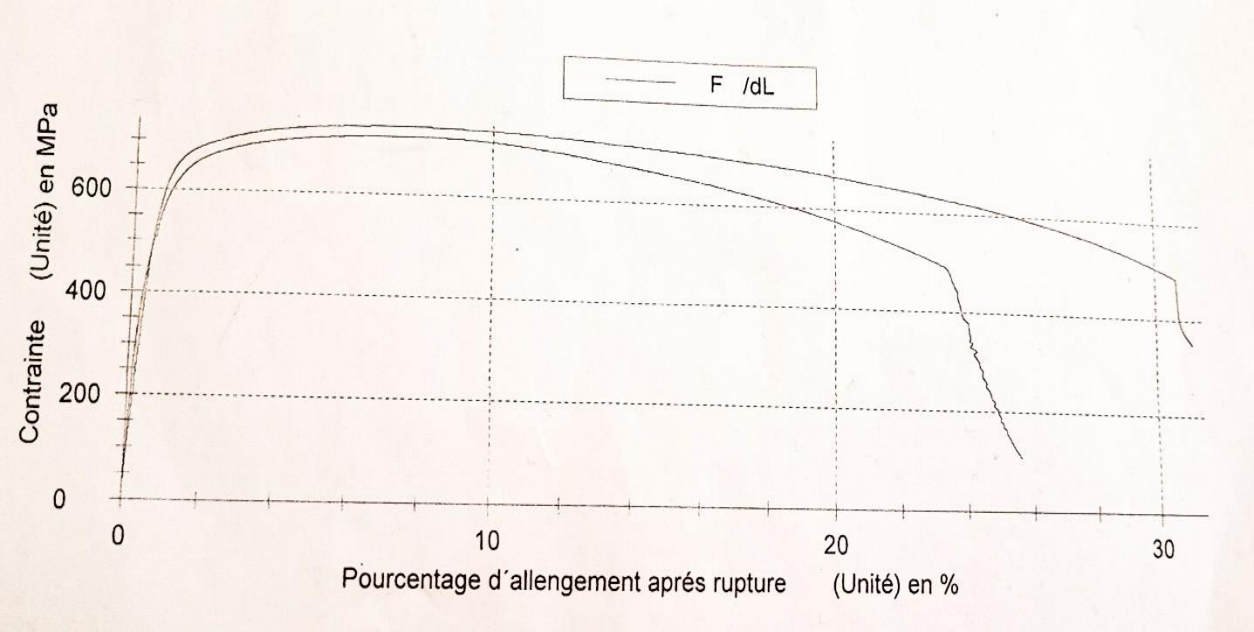



**Figure III. 9: Résultats de l'essai de traction Acier X70.**

Les résultats de l'essai de traction pour l'échantillon A1589 montrent une résistance maximale de 736,2 MPa, une limite d'élasticité de 584,4 MPa, et un allongement à la rupture de 31,0**%**, Tableau III.5. indiquant un matériau à la fois résistant et modérément ductile, adapté aux applications nécessitant à la fois une bonne tenue mécanique et une certaine capacité de déformation avant rupture.

Les essais de traction réalisés sur l'échantillon A1589 ont permis d'évaluer les propriétés mécaniques du matériau dans deux conditions : matériau de base (TN) et matériau avec joint soudé (TS).

Pour le matériau de base, les résultats montrent une résistance maximale élevée, associée à une limite d'élasticité importante et à un allongement significatif à la rupture. Ces résultats traduisent un comportement à la fois résistant et ductile, confirmant la bonne qualité du matériau brut pour des applications mécaniques exigeantes.

Concernant le matériau avec joint soudé, une résistance maximale similaire, voire légèrement inféreure, a été observée par rapport à certaines valeurs de l'état de base. Cela montre que le procédé de soudage a été bien maîtrisé, ne provoquant pas de dégradation significative des propriétés mécaniques. En effet, la résistance à la traction de l'échantillon soudé (736,2 MPa) reste proche de celle de l'échantillon non soudé (716,5 MPa), avec un allongement même supérieur (31,0 % contre 20,0 %), ce qui traduit une bonne ductilité. Ainsi, la soudure semble avoir été réalisée sans compromettre les performances globales du matériau.

En résumé, l'échantillon A1589 présente de très bonnes caractéristiques mécaniques dans les deux états, avec un léger affaiblissement au niveau du joint soudé, mais restant conforme aux exigences industrielles de résistance et de ductilité.

### III.4.3. Interprétation des résultats de l'essai de traction :

L'essai de traction réalisé sur le matériau de nuance X70 a permis d'identifier avec précision ses caractéristiques mécaniques fondamentales, conformément à la norme en vigueur. Les résultats obtenus sont cohérents avec les propriétés attendues pour ce type d'acier faiblement allié utilisé dans la fabrication de tubes destinés au transport d'hydrocarbures.

Les courbes de traction obtenues montrent clairement un comportement ductile, caractérisé par une large zone de déformation plastique homogène avant rupture. Ce comportement est un indicateur essentiel de la ductilité du matériau, c'est-à-dire sa capacité à se déformer de manière significative sans rupture brutale. Ce niveau élevé de ductilité est un atout majeur pour les procédés de mise en forme, tels que le formage de tubes en spirale, qui exigent une bonne aptitude à la déformation sans initiation de fissures.

Plusieurs grandeurs caractéristiques ont été déterminées à partir des courbes :

- **La limite d'élasticité conventionnelle (Re0,5)** : elle représente la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement de façon irréversible, ici déterminée à un taux de déformation de 0,5 %. Cette limite est cruciale pour déterminer les conditions d'exploitation en toute sécurité.
- **La résistance maximale à la traction (Rm)** : elle correspond à la contrainte nominale maximale que l'éprouvette peut supporter avant de commencer à se contracter localement (striction). Cette valeur est conforme aux exigences de la norme API 5L pour les aciers de grade X70.

- **La déformation à la rupture (εr)** : elle désigne le taux de déformation global au moment de la rupture. Elle reflète la capacité d'absorption d'énergie du matériau avant la rupture.
- **L'allongement à la rupture (A%)** : évalué à 40 %, il témoigne d'une excellente ductilité. Une telle valeur indique que le matériau peut subir une déformation significative sans perte d'intégrité, ce qui est essentiel pour les tubes soumis à des contraintes mécaniques importantes.

Au-delà des valeurs normalisées, cet essai fournit les données nécessaires à l'établissement d'une loi de comportement en traction uni-axiale, utilisée pour la modélisation du comportement du matériau dans des simulations numériques ou pour le dimensionnement de composants mécaniques.

Par ailleurs, les essais ont été étendus aux éprouvettes contenant un joint soudé. Il est important de noter que la rupture s'est produite à une distance de 28 mm du joint de soudure, ce qui indique que le joint n'est pas la zone la plus faible. Cela traduit une bonne qualité de la soudure, réalisée dans le respect des paramètres techniques adaptés. Le fait que la rupture ne se produise pas dans la zone fondue ou dans la ZAT est un signe clair d'un procédé de soudage maîtrisé, avec peu ou pas de fragilisation du matériau dans ces zones.

En conclusion, l'essai de traction réalisé sur l'acier X70 a mis en évidence un comportement mécanique conforme aux exigences de la norme API 5L. Le matériau présente une excellente ductilité, avec un allongement à la rupture de 40 %, et une bonne résistance mécanique, ce qui le rend apte au formage sans fissuration. L'étude du joint soudé a révélé une rupture en dehors de la zone soudée, confirmant ainsi la qualité du soudage**.** Ces résultats confirment la fiabilité du matériau X70 pour les applications de transport d'hydrocarbures sous haute pression.

## III. 5. Résultats expérimentaux de l'essai de résilience Charpy :

Dans le cadre de l'évaluation de la ténacité à la rupture de l'acier X70, des essais de résilience de type Charpy V ont été réalisés au laboratoire d'essais mécaniques ALFA PIPE**.** Ces essais permettent d'estimer la capacité du matériau à absorber de l'énergie lors d'un choc, particulièrement dans des conditions de température négative, ce qui est crucial pour les aciers utilisés dans les pipelines exposés à des environnements rigoureux.

Les tests ont été effectués à une température de –10 °C, afin de simuler des conditions de service potentiellement critiques, où les matériaux sont plus susceptibles de présenter une fragilité accrue. L'essai a été réalisé à l'aide d'une machine de choc Charpy dont la capacité maximale est de 750 J**,** ce qui est parfaitement adapté à ce type de matériau à haute ténacité.




**Figure III. 10: Machine de l'essai de résilience**

### III. 5.1. Éprouvettes utilisées :

Les éprouvettes utilisées pour cet essai répondent aux spécifications normalisées de l'essai Charpy avec entaille en V. Leur conception suit les recommandations internationales (par exemple, ISO 148 ou ASTM E23), garantissant ainsi la reproductibilité et la fiabilité des résultats.

Les éprouvettes peuvent être positionnées de différentes manières selon la direction de prélèvement (longitudinale, transversale ou dans la ZAT en cas de soudure). Dans notre étude, les éprouvettes standardisées, illustrées à la **figure III.12**, possèdent une entaille en V centrée, servant à localiser la rupture et à accentuer la concentration des contraintes pendant l'impact.

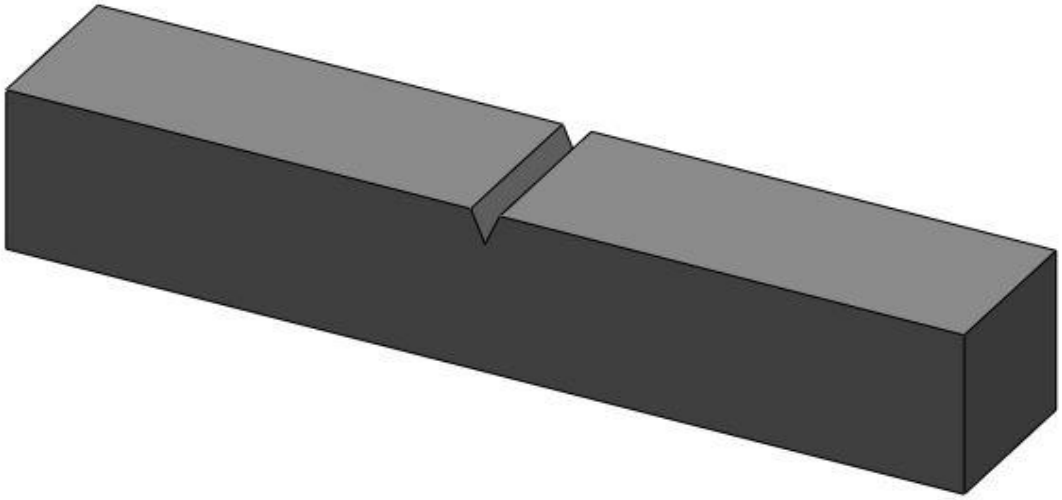
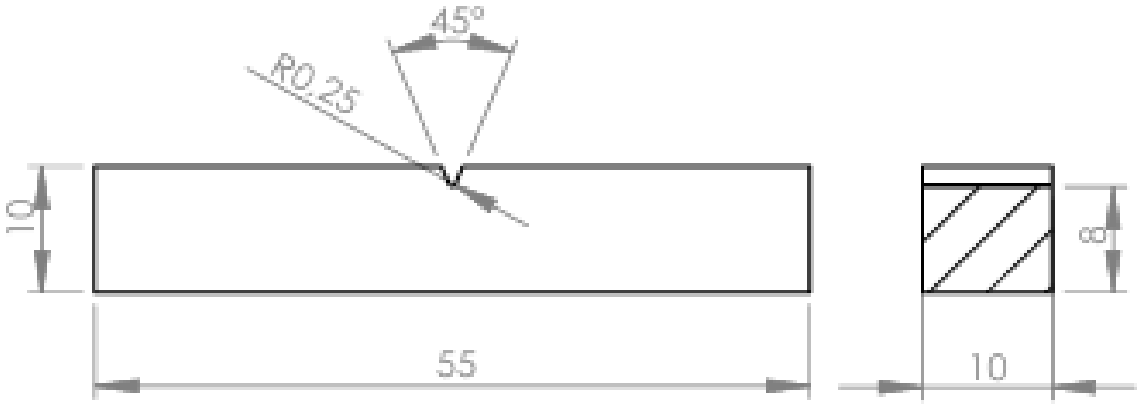


**Figure III.11:** Modélisation 3D d'une éprouvette de résilience.




**FigureIII. 11: Éprouvette normalisée de l'essai de Charpy.**



**Figure III. 12: Éprouvettes de résilience avant et après la rupture**

### III. 5.2. Caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques précises des éprouvettes sont répertoriées dans le tableau III.5, elles mesurent généralement 55 mm de long**,** 10 mm de hauteur, avec une entaille de 2 mm de profondeur ayant un rayon de 0,25 mm. Ces dimensions sont définies de manière stricte afin de permettre la comparaison directe entre différents matériaux ou conditions d'essai.

**Tableau III. 6: Caractéristiques géométriques.**

| **Longueur (l)** | **Largeur (b)** | **Épaisseur (h)** | **distance entre appuis (L)** |
|---|---|---|---|
| 55± 1mm | 10± 0.2mm | 10± 0.2mm | 45± 0.2mm |
| Type d'éprouvette | Rayon d'entaille | Angle d'entaille | profondeur |
| V | ρ | ψ | a |
| Charpy V | 0.25mm | $45^0$ | 2mm |

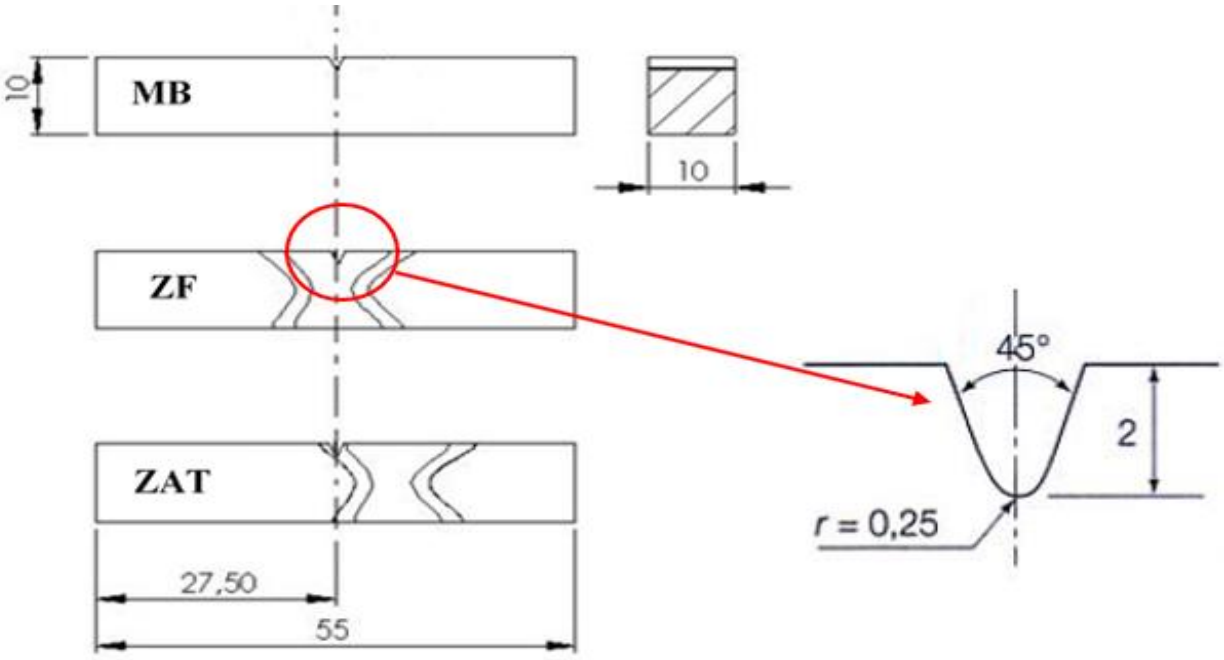



**Figure III. 13: Schéma des éprouvettes extraites du MB, de la ZF et de la ZAT.**

### III.5.3. L'analyse statique et les courbes d'essai de résilience :

**Tableau III. 7: Résultats de l'essai de résilience pour l'échantillon A1589.**

| Nr | Désignation séries | Désignation éprouvette | Température d'éssai | Kp J | KV8 J | KV8/KP % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | A1589 | MB1 | -10 | 750 | 302 | 40 |
| **2** | | MB2 | -10 | 750 | 307 | 41 |
| **3** | | MB3 | -10 | 750 | 272 | 36 |
| **4** | | S1 | -10 | 750 | 181 | 24 |
| **5** | | S2 | -10 | 750 | 173 | 23 |
| **6** | | S3 | -10 | 750 | 160 | 21 |
| **7** | | ZAT1 | -10 | 750 | 109 | 15 |
| **8** | | ZAT2 | -10 | 750 | 214 | 29 |
| **9** | | ZAT3 | -10 | 750 | 131 | 17 |

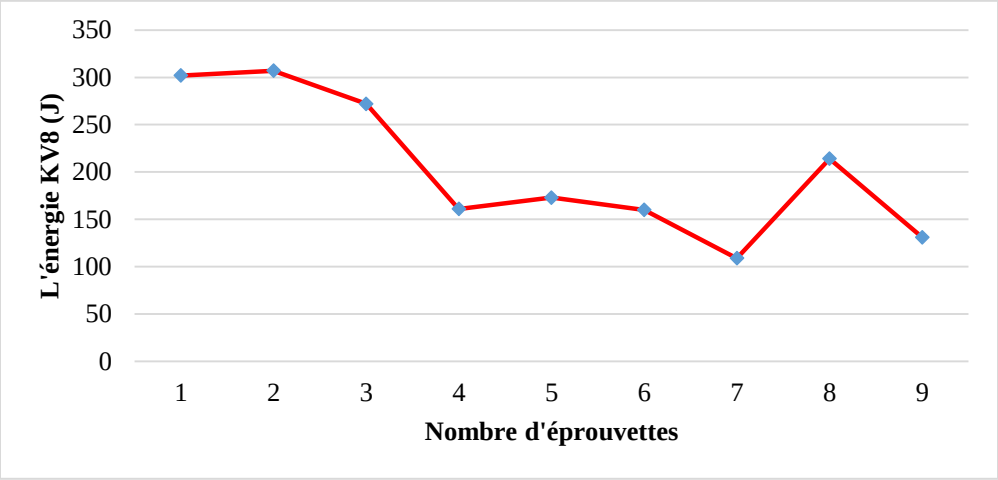



**figure III. 14: Courbe d'absorption d'énergie KV8 de l'échantillon A1589 à -10 C°.**

Le tableau III.7 présente les résultats de l'essai de choc selon la méthode Charpy pour l'échantillon d'acier portant le code A1589. Toutes les expériences ont été réalisées à une température basse de -10 °C afin d'évaluer la résistance du matériau et de ses différentes zones dans des conditions thermiques sévères. Les résultats montrent une stabilité de la valeur de l'énergie totale absorbée (Kp) à travers tous les échantillons, avec une valeur de 750 joules, ce qui reflète une homogénéité relative des échantillons en termes de dimensions et de conditions de chargement.

Cependant, les valeurs varient nettement en ce qui concerne l'énergie absorbée (KV8), avec une absorption maximale observée dans les échantillons du métal de base (MB1, MB2, MB3), dépassant 300 joules, tandis que les valeurs les plus faibles ont été enregistrées dans la zone affectée thermiquement (ZAT3, ZAT2), avec environ 131 à 214 joules seulement. Quant à la zone soudée (S1, S2, S3), représentant le joint de soudure, elle a montré une performance intermédiaire en termes d'énergie absorbée, avec des valeurs KV8 comprises entre 160 et 181 joules, ce qui reflète une baisse notable de la résistance du joint par rapport au métal de base, tout en restant supérieure à celle de la zone affectée thermiquement.

Le rapport KV8/KP, exprimant la proportion d'énergie transmise en profondeur dans le matériau, suit la même tendance : les valeurs les plus élevées sont celles du métal de base (40 % à 41 %), puis diminuent progressivement dans les zones soudées, pour atteindre les niveaux les plus bas dans les ZAT (15 % à 17 %).

# CONCLUSION GENERALE

**Conclusion générale.**

Suite à un long processus de recherche scientifique s'étendant sur plusieurs mois, ce mémoire nous a offert une expérience enrichissante combinant une étude théorique approfondie et une analyse pratique détaillée d'un sujet crucial dans le secteur industriel. Ce dernier concerne la production de tubes en acier soudés en spirale destinés aux réseaux de transport d'hydrocarbures, avec un intérêt spécifique pour les caractéristiques de l'acier X70 à haute résistance. Cette expérience nous a permis d'acquérir une connaissance poussée des complexités de ce secteur industriel crucial, qui est fondamental pour l'économie et l'énergie du pays, particulièrement dans un pays comme l'Algérie, dépendant largement de l'extraction et du transport des hydrocarbures.

D'un point de vue théorique, notre recherche a commencé par un aperçu de l'acier : sa composition, ses caractéristiques et son évolution à travers l'histoire. Par la suite, nous avons examiné sa classification basée sur sa composition et ses applications, en mettant l'accent sur l'acier à haute limite d'élasticité (HLE) de type X70. Ses remarquables caractéristiques physiques et mécaniques le rendent particulièrement approprié pour la production de tubes destinés au transport de fluides sous pression élevée, comme le gaz et le pétrole. On a constaté que la composition chimique de cet acier, en particulier sa faible quantité de carbone et la présence d'éléments d'alliage tels que le niobium et le vanadium, lui donne un remarquable équilibre entre dureté, ténacité et capacité à être soudé.

D'un point de vue pratique, nous avons eu la chance inestimable de relier les notions théoriques aux mises en œuvre industrielles concrètes grâce à notre stage sur le terrain dans l'unité ALFAPIPE, un acteur prépondérant dans la production de tubes soudés en Algérie. Cette société illustre parfaitement le succès de l'industrie nationale, capable de fabriquer, grâce à l'application des technologies et standards internationaux, des tubes efficaces dans des conditions d'exploitation extrêmes.

Au cours de ce stage, nous avons observé les différentes phases du processus de fabrication, depuis la réception des bobines d'acier jusqu'aux procédures de découpe, de formage hélicoïdal et de soudage intérieure et extérieure utilisant des procédés sophistiqués comme le SAW et le SMAW. Nous avons également participé aux contrôles qualité et inspections techniques, en incluant les tests non destructifs (END) tels que l'inspection visuelle, les ultrasons, les rayons X

et l'essai hydraulique. De plus, nous avons effectué des essais en laboratoire (CD) pour s'assurer du respect des standards internationaux (API 5L).

Notre recherche a aussi inclus des tests mécaniques et métallurgiques approfondis sur des échantillons de tubes, tels que les tests de traction, de dureté (Vickers), de résilience (impact), ainsi que l'analyse chimique. Les conclusions ont validé que les caractéristiques mécaniques et chimiques de l'acier X70 respectent les normes requises, ce qui témoigne de l'excellence du produit fini et de sa fiabilité en utilisation. Des variations dans les caractéristiques ont été notées au niveau de la zone de soudure et des zones affectées par la chaleur (ZAT/ZF), mais elles sont restées conformes aux normes grâce à une gestion efficace des paramètres de soudage et de production.

Ce projet nous a également éclairés sur l'importance des interventions complémentaires comme les revêtements internes et externes, qui sont essentiels pour la résistance à la corrosion et l'allongement de la longévité des tubes, notamment lorsqu'ils sont enfouis ou exposés à des conditions météorologiques extrêmes. Le revêtement époxy et polyéthylène offre une protection contre les agressions physiques et chimiques externes.

Une protection défensive contre les attaques chimiques et physiques externes.
On peut mentionner parmi les conclusions significatives de cette recherche :

• La nécessité de surveiller rigoureusement le soudage pour prévenir les défauts fréquents comme les fissures, l'insuffisance de pénétration ou les porosités ;

• Le contrôle non destructif joue un rôle primordial dans l'assurance qualité du produit avant sa mise en opération ;

• L'importance de mettre à jour fréquemment les équipements et de rester à l'affût des avancées technologiques mondiales pour maintenir la compétitivité de l'industrie locale

Sur la base de ce qui a été présenté, nous sommes en mesure de tirer les conclusions suivantes
La concrétisation de tout projet industriel, notamment dans les secteurs délicats tels que le transport des hydrocarbures, dépend de la combinaison harmonieuse de plusieurs facteurs liés entre eux : l'excellence de la matière première, le contrôle des procédures de production, l'adhésion aux standards techniques internationaux, l'habileté de la force de travail et la sévérité des vérifications techniques. Dans cette perspective, l'unité ALFAPIPE sert de modèle à suivre, disposant des infrastructures, des ressources humaines et des technologies actuelles requises pour satisfaire à ces besoins.

Pour conclure, ce mémoire est le résultat d'un effort collaboratif scientifique et pratique, reflétant notre désir de fusionner le savoir universitaire avec les vérités industrielles. Nous espérons qu'il servira de base solide dans notre trajectoire professionnelle et académique en ingénierie des matériaux et mécanique industrielle.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

## Références Bibliographiques


**[1]** API Specification 5L, Specification for Line Pipe, 45th Edition, American Petroleum Institute, 2013.

**[2]** Mohitpour, M., Golshan, H., & Murray, A. (2003). Pipeline Design & Construction: A Practical Approach. ASME Press.

**[3]** Bai, Y., & Bai, Q. (2014). Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation. Gulf Professional Publishing.

**[4]** Ghanbari, M., & Kermanpur, A. (2007). "Effect of Spiral Welding Process on Microstructure and Mechanical Properties of API X70 Line Pipes", Materials Science and Engineering: A, 454–455, 300–305.

**[5]** Lee, C., & Yoo, Y. S. (2007). "Microstructure and Mechanical Properties of X70 Line Pipe Steels Fabricated by Spiral Welding Process", Journal of Materials Processing Technology, 187–188, 291–294..

**[6]** Y. Boumelita, Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier API X70 en fonction de la succession des réparations Application dureté, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2017).

**[7]** A. Saker, Etude des causes de dégradation prématurée d'un marteau de concassage fabriqué en acier riche en chrome, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2018).

**[8]** AFNOR (1989). NF EN 10020 – Définition et classification des aciers. Association Française de Normalisation.

**[9]** Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.

**[10]** Verna, C. (2013). Les hommes du fer. Le travail du métal en Europe et au Moyen Âge. Springer.

**[11]** Tylecote, R. F. (1992). A History of Metallurgy. Routledge.

**[12]** Needham, J. (1958). Science and Civilization in China, Vol. 5: Chemistry and Chemical Technology. Cambridge University Press.

**[13]** Réaumur, R.-A. (1722). L'Art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu. Paris: Imprimerie Royale.

**[14]** Berthollet, C.-L., Monge, G., & Vandermonde, A. (1786). Mémoire sur le fer. Académie Royale des Sciences.

**[15]** S.Bensaada, Elaboration des Metaux Ferreux (Fontes et Aciers).

**[16]** Gordon, R. B. (1996). American Iron, 1607-1900. The MIT Press.

**[17]** E.Azazga, Etude et Caracterisations d'un Acier (S355J2) Rond Lamine A Chaud Utilise A Electro-Industries (E.I.Azazga) Mémoire de Fin d'etude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2022).

**[18]** Tchernov, D. (1868). Études sur la structure et les transformations de l'acier. Springer.

**[19]** Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.

**[20]** ASM International. (1992). Atlas of Microstructures of Industrial Alloys.

**[21]** Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. (2017). Steels: Microstructure and Properties. Springer.

**[22]** Totten, G. E. (2006). Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. CRC Press.

**[23]** S. Lucas, Évolution de la précipitation et des propriétés mécaniques d'aciers miro- alliés lors d'une opération de soudage,These de Doctorale, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2023).

**[24]** Ghosh, A., & Chatterjee, S. (2008). Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice. Taylor & Francis.
**[25]** Hansen, M. (2004). Constitution of Binary Alloys. Elsevier.
**[26]** Bain, E. C., & Griffiths, J. C. (1927). The nature of martensite. Springer.
**[27]** Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications, and Design. Elsevier.
**[28]** Davis, J. R. (1993). ASM Specialty Handbook: High-Strength Low-Alloy Steels.
**[29]** R. Bensemida, Contribution à la réalisation de galets modifiés pour le transfert de bandes pour la réalisation de pipes au sein d'ALFAPIPE Annaba, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2019).
**[30]** A. Saker, Etude des causes de dégradation prématurée d'un marteau de concassage fabriqué en acier riche en chrome, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2018).
**[31]** Documentation ALFAPIPE ANNABA
**[32]** A. Achouri, Caractérisation mécaniques et structurelles d'un acier de construction des pipelines (API EL X60), Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed khider de Biskra, (2017).
**[33]** I. Macha, Z. Chellali, Etude d'un processus de fabrication d'un tube pipeline, Mémoire de Master, Université Amar Thlidji-Laghouat, (2022).
**[34]** O. Djeddou, S. Balboul, Etude mécanique et microstructurale de structure En acier ordinaire E36 soudée par é types de soudage (MIG et électrode enrobée), Mémoire de Master, Université de M'sila, (2021).
**[35]** R. Bouchelga, Contrôle de qualité du revêtement intérieur de la pipe réalisé au niveau de l'entreprise ALFAPIPE (Ghardaïa) , Mémoire de Licence, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira-, (2023).
**[36]** A. Benhadj, A. Khefif, Étude Expérimentale du soudage semi-automatique des pipelines, Mémoire maître professionnelle, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2021).
**[37]** Y. Barkat, Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines ,Mémoire de Master, Université Mohamed khider de Biskra, (2016).
**[38]** Y. Laifa, Soudage sous flux en poudre (SAW) pomech Annaba, Mémoire de Master , Université Badji Mokhtar Annaba, (2021).
**[39]** A. Bougabrine, Etude des propriétés des tubes soudés en spirale utilisé pour la fabrication des pipelines, Mémoire de Master, Université Echahid Echikh Larbi Tébessi-Tébessa-, (2024).
**[40]** H. Rahmoune, H. Rekis, Etude pratique de soudage pipeline au niveau de l'entreprise nationale de canalisation (ENAC) ,Mémoire de Master, Université Mohamed khider de Biskra, (2022).
**[41]** A. Lachouiter, B. Ben terkia, Méthode ultrason pour le contrôle des joints de soudure des pipelines, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, (2022).
**[42]** B. Anglade, H. Horsin Molinaro, S. Lavernhe, Les principaux défauts et risques liés au soudage , École Normale Supérieurs Paris, Université Paris Saclay, (2017).
**[43]** http://perso.univ-leamns.fr
**[44]** H. Rahmoune, H. Rekhis, Etude pratique de soudage pipeline au niveau de l'entreprise nationale de canalisation (ENAC), Mémoire de Master, Université Mohamed khider de Biskra, (2022).
**[45]** M. Tlili, Evaluation propriétés mécaniques d'un acier X70 M lors de la fabrication d'un tube pour pipeline, Mémoire de Licence, Université Badji Mokhtar Annaba, (2019).
**[46]** F. Nouadria, Etude des effets de la réparation de la soudure sur les propriétés mécaniques des pipelines, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2016).
**[47]** Y. Guernoub, Soudage et caractérisation des tubes HLE de l'unité ALFAPIPE Annaba, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2019).
**[48]** B. Talali, Méthode de contrôle non destructif pour la détection des défauts dans les tubes sans

soudure, Mémoire de Master , Université Badji Mokhtar Annaba, (2018).

**[49]** A. Bounouara, M. Yousfi, Caractérisation et contrôle de la réalisation des pipelines en acier X70 Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2010).

**[50]** M. Belkhamgani, K. Bendehnoun, Evaluation de la réparation par composite d'une pipe soumise à un chargement de pression, Projet de Fin d'études, Université Badji Mokhtar Annaba, (2019).

**[51]** A.Souelmi, Etude de la conformité des pipelines destiné aux hydrocarbures, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2018).

**[52]** R. Bouchelga, Contrôle de qualité du revêtement intérieur de la pipe réalisé au niveau de l'entreprise ALFAPIPE (Ghardaïa) , Mémoire de Licence, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira-, (2023).

**[53]** A. Chakiche, Etude technologie d'un appareil d'essai de fluage en traction, Mémoire de master, Université Mohamed khider de Biskra, (2019).

**[54]** B. Ben kechroud, Etude comparative de quatre acier pour pipeline pour Sonatrach réalisés la TSS Arcelor Mittal-Annaba selon les paramètres physico chimique et choix de l'acier X52, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2014).

**[55]** M. Ati, A. Morkni, Etude Analytique des Essais mécaniques Investigation sur les essais de traction, Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2022).

**[56]** Y. Laifa, Soudage sous flux en poudre (SAW) pomech Annaba, Mémoire de Master , Université Badji Mokhtar Annaba, (2021).

**[57]** A. Chakiche, Etude technologique d'un appareil d'essai de fluage en traction ,Mémoire de Master, Université Mohamed khider de Biskra, (2019).

**[58]** H. Lazizi, Influence de la variation de la température de revenue sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage AI-4%Cu trempe dans un fluide à 70% $h_2o$ et 30% d'huile soluble ,Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2013).

**[59]** A. Bouri, Prédiction Des Propriétés De Traction De L'acier S355 JR Sous L'effet Du Brunissage, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, (2017).

**[60]** A.Brima , Étude et analyse de la micro-dureté après l'usinabilité de l'acier AISI 1060 par fraisage en utilisant la méthode de surface de réponse, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2019).

**[61]** B. Gharbi, Essai de dureté, Travaux pratiques, Université de Batna 2, (2022).

**[62]** https://images.app.goo.gl/qdpgWmsNbSJWi1wX9

**[63]** http://www.iso.org/standard/71982.html

**[64]** B. Issasfa, Etude de l'endommagement, entretien et réparations des tubes de transport des hydrocarbures en utilisant des matériaux composites, Mémoire de Magister, Université 08 Mai 45 de Guelma, (2010).