



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1 FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Ingénierie des matériaux et des surfaces

**Thème**

**ETUDE ET CONCEPTION D'UN JOINT SOUDE RÉALISER  
PAR UN PROCÉDE HYBRID (Récipient sous pression)**

Proposé et encadré par :

Dr. A. ABDERRAHMANE

Réalisé par :

Mr. YAHIAOUI ABDELMOUMEN

Mr. HELLALI FETHI

**Année universitaire : 2023/2024**

# REMERCIEMENTS

❖ Je remercie tout d'abord Allah pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour terminer mon travail.,

À Mes chers parents qui m'ont tout donné, qui m'ont soutenu, et encourager durant toute ma formation et éclairer mon chemin avec leurs bénédictions Je leur souhaite une longue vie.

❖ À mes chers frères et chères sœurs.

Je tenais à remercier, mon promoteur Dr. A, ABDERRAHMANE et mon co-promoteur de mémoire, Mr Mehdi le directeur technique de la EPE Magi Rouïba ainsi tous les ingénieurs d'étude a la société MAGI sur tout MR. ADEL j'adresse l'expression de ma gratitude et respect pour m'avoir encadré et dirigé ce travail, pour avoir pris le temps de guider et accompagner mes recherches,

Je tiens ensuite à remercier toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tous les responsables de la société EPE MAGI et sur le soudeur MR ABDERRAHMANE DELAA.

Avec toute notre gratitude.

À mes amis du département génie de mécanique des matériaux, surtout mes collègues de la spécialité (IMS).

Et enfin à tous mes professeurs

, et à toute notre famille du département de génie mécanique

Avec toute ma gratitude, HELLALI FETHI

# REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Allah pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour terminer mon travail.,

A ma mère, je vous remercie du fond du cœur pour votre amour inconditionnel et votre soutien constant. Je suis reconnaissant d'avoir toujours été à mes côtés. D'atteindre mes objectifs  
Je tiens à remercier sincèrement Monsieur A, ABDERRAHMANE mon promoteur, et j'adresse l'expression de ma gratitude et respect pour m'avoir encadré et dirigé ce travail, pour ses louables contributions inlassables et pour ses précieux conseils et son perpétuel dévouement.

Je tenais ensuite à remercier monco-promoteur de mémoire, Mr Mehdi le directeur technique de la EPE Magi Rouïba ainsi tout les , ingénieur d'étude a la société sur tout MR . ADEL , pour avoir pris le temps de guider et accompagner mes recherches,

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tous les responsables de la société EPE MAGI et sur le soudeur MR ABDERRAHMANE DELAA .

Avec toute mon gratitude, YAHIAOUI ABDELMOUMEN

# DÉDICACE

Je dédie ce travail :

- A ma chère mère

-A mes cher frère et sœurs

-A notre promoteur Mr : A, ABDERRAHMANE

-toute ma famille et tous mes amis et camarades

-Sans oublier tous mes professeurs

-A mes chers parents Pour leur patience, leur amour, leur soutien et Leurs encouragements.

-A toute ma famille et tous mes amis et camarades

- Sans oublier tous mes professeurs

## Résumé

Cette étude vise à qualifier les joints soudés des récipients sous pression, essentiels pour garantir leur intégrité en service et prévenir des ruptures catastrophiques. Des joints soudés ont été réalisés à partir de deux tôles d'acier A516GR70, en utilisant les procédés SMAW (Shielded Metal Arc Welding) et SAW (Submerged Arc Welding). Les analyses microstructurales et macrostructurales, ainsi que les tests de dureté des joints soudés, ont été effectués. Les résultats des contrôles non destructifs, tels que le contrôle visuel, le ressuage et la radiographie, ont confirmé l'absence de défauts majeurs, assurant ainsi la qualité des soudures. Les observations macro et micrographiques ont révélé des distinctions significatives entre les différentes zones de soudure, influencées par les cycles thermiques et les transformations de phase. La comparaison entre le SMAW et la combinaison SMAW+SAW démontre que la méthode combinée peut offrir des avantages significatifs en termes de stabilité thermique et de propriétés mécaniques. Les conclusions soulignent l'importance des bonnes pratiques de soudage, des contrôles rigoureux pour assurer la qualité et la durabilité des soudures dans des applications critiques.

### Abstract :

This study aims to qualify the welded joints of pressure vessels, which are essential for ensuring their integrity in service and preventing catastrophic failures. Welded joints were created from two A516GR70 steel plates using the SMAW (Shielded Metal Arc Welding) and SAW (Submerged Arc Welding) processes. Microstructural and macrostructural analyses, as well as hardness tests of the welded joints, were performed. The results of non-destructive testing, such as visual inspection, dye penetrant testing, and radiography, confirmed the absence of major defects, thus ensuring the quality of the welds. Macro and micrographic observations revealed significant distinctions between the different weld zones, influenced by thermal cycles and phase transformations. The comparison between SMAW and the combination of SMAW+SAW demonstrates that the combined method can offer significant advantages in terms of thermal stability and mechanical properties. The conclusions highlight the importance of good welding practices and rigorous controls to ensure the quality and durability of welds in critical applications.

### ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تأهيل الوصلات الملحومة لأوعية الضغط، والتي تعتبر ضرورية لضمان سلامتها أثناء الخدمة ومنع حدوث فشل واللحام (SMAW) باستخدام عمليات اللحام بالقوس المعدني المحمي A516GR70، تم إنشاء وصلات ملحومة من صفائح فولاذية أجريت تحليلات مجهرية ومجهرية كبيرة، بالإضافة إلى اختبارات الصلابة للوصلات الملحومة. أكدت نتائج (SAW) بالقوس المغمور الاختبارات غير المدمرة، مثل الفحص البصري واختبار السائل المخترق والأشعة السينية، عدم وجود عيوب كبيرة، مما يضمن جودة اللحامات. كشفت الملاحظات المجهرية والمجهرية الكبيرة عن تباينات كبيرة بين المناطق المختلفة للحام، متأثرة بالدورات الحرارية أن الطريقة المدمجة يمكن أن توفر مزايا كبيرة من SMAW و SAW والجمع بين SMAW والتحويلات التطورية. تبيّن أن المقارنة بين حيث الاستقرار الحراري والخصائص الميكانيكية. تبرز الاستنتاجات أهمية ممارسات اللحام الجيدة والرقابة الصارمة لضمان جودة اللحامات ومثانتها في التطبيقات الحرجة.

## Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
DÉDICACE .....	4
Résumé .....	5
Introduction générale.....	9
Chapitre 01.....	11
Soudage et contrôle .....	11
CHAPITRE II Conception et réalisation d'un réservoir sous pression .....	29
<b>II.7.1. Code de conception ASME :</b> .....	32
Chapitre 3 Méthodologies expérimentales.....	45
III.1. Introduction :.....	45
III.2. Matériaux :.....	45
<b>III.2.3 Fil de soudage EM12K :</b> .....	47
<b>III.3.1. Découpage et préparation des éprouvettes à souder</b> .....	48
<b>III.3.2. Préparation du joint à souder :</b> .....	49
<b>III.3.7.3. Enrobage :</b> .....	55
<b>III.3.7.6. Examen micrographique :</b> .....	57
Chapitre 4 Résultats des discussions.....	60
IV.1. Introduction :.....	60
IV.2. Contrôles non destructifs : .....	60
IV.3 Observations macrographiques :.....	62
IV.4. Observations microscopiques : .....	63
IV.5. Microdureté :.....	67
<b>Conclusion générale</b> .....	70
Référence chapitre 1 .....	71
Référence chapitre 2 .....	72
Référence chapitre 3 .....	73

# Historique de l'entreprise

L'Entreprise Publique Economique a été créée en 1932 sous le nom de « L'Entreprise de Construction Mécanique PONS Raphael », Elle a été Intégrée au patrimoine de l'État le 21 Août 1963.

De 1963 au 1972, elle a été érigée en Entreprise autogérée, avant qu'elle soit rattachée à la « SONACOME » en 1973 sous la dénomination « Unité Ben Badais ».En 1982, elle a été Intégrée à « l'ENPMA », puis, restructurée en « EPE EURL MAGI » en 1997.

Le 15 Avril 2014 l'EPE MAGI est devenue une société par action, rattachée au Groupe Mécanique. En 2015, un transfert d'activité a été effectué depuis l'ancien site de Rouïba vers le nouveau site sis à la Zone Industrielle de Reghaia.

En 2017, suite au redéploiement des activités de l'entreprise vers d'autres secteurs d'activités, la dénomination de l'entreprise a été changé à «Manufacture d'Activités Générales Industrielles » Abréviation «MAGI SPA» au lieu et place de « Matériels Agricoles et Industriels» Abréviation «MAGI».



# **Introduction générale**

# Introduction générale

Les récipients sous pression sont essentiels dans divers secteurs industriels tels que le pétrole, le gaz, la pétrochimie et l'énergie, offrant une solution critique pour le stockage et le transport sécurisé de liquides et de gaz sous des pressions supérieures à la normale. Leur rôle principal est de maintenir la sécurité et l'efficacité des processus en permettant le stockage efficace de substances comme les gaz liquéfiés, les produits chimiques et autres fluides nécessitant des conditions spécifiques de pression et de température. Dans l'industrie pétrolière, par exemple, ils facilitent le transport du gaz naturel liquéfié (GNL) et du gaz de pétrole liquéfié (GPL).

L'intégrité des récipients sous pression repose fondamentalement sur la qualité et la fiabilité de leurs joints soudés. Ces derniers jouent un rôle crucial dans la prévention de ruptures catastrophiques en service, ce qui souligne l'importance capitale de leur caractérisation et qualification.

Cette étude se concentre spécifiquement sur la qualification des joints soudés de récipients sous pression, en utilisant comme matériau modèle l'acier A516GR70. Les procédés de soudage SMAW (Shielded Metal Arc Welding) et SAW (Submerged Arc Welding) ont été sélectionnés pour réaliser ces joints, permettant ainsi une comparaison approfondie de leurs performances.

Les contrôles non destructifs, tels que le contrôle visuel, le ressuage et la radiographie, ont été appliqués pour évaluer l'intégrité des soudures. En parallèle, des analyses microstructurales et macrostructurales, ainsi que des tests de dureté, ont été menés pour comprendre les propriétés mécaniques et les caractéristiques des zones fondue et affectées par la chaleur.

Enfin, cette étude compare les résultats obtenus avec les deux techniques de soudage, SMAW et SAW, mettant en lumière leurs avantages respectifs en termes de stabilité thermique, de propriétés mécaniques et de qualité des soudures. Une telle analyse est cruciale pour orienter les choix de procédés de soudage dans la fabrication et l'entretien de récipients sous pression, assurant ainsi leur durabilité et leur sécurité à long terme.

Notre mémoire est structuré en 4 chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux procédés de soudage et au contrôle.
- Le deuxième chapitre détaille la méthodologie utilisée dans la conception et la réalisation des cuves sous pression, en respectant les normes ASTM et ASME.
- Le chapitre 3 présente la partie expérimentale de notre étude.
- Le chapitre 4 expose les principaux résultats obtenus.
- Le mémoire se conclut par une conclusion générale

# **Chapitre 01**

## **Soudage et contrôle**

# Chapitre 01

## Soudage et contrôle

### I.1. Introduction

Soudage, procédé suivant lequel deux ou plusieurs pièces de métal ou de plastique sont assemblées par chauffage, par pression, ou par une combinaison des deux. Le soudage par chauffage est la méthode la plus courante de nos jours. Rappelons grâce au développement de nouvelles techniques au XXe siècle, le monde industriel entra dans une phase de changement d'assemblage des métaux. C'est ainsi que le soudage remplaça progressivement le rivetage, l'agrafage et le boulonnage dans beaucoup de constructions comme les ponts, les bâtiments, les bateaux, les charpentes métalliques, les moules etc. C'est aussi un procédé de base dans l'industrie automobile, l'aviation, la fabrication de machines-outils. Lorsqu'on assemble deux pièces de métal, on doit tenir compte de leurs propriétés physiques, de l'usage auquel le produit final est destiné et des installations de production disponibles. C'est pourquoi il existe plusieurs méthodes de soudage par fusion ou par pression, adaptées à chaque cas de figure. Parmi les procédés de soudage les plus employés aujourd'hui, on peut mentionner le soudage aux gaz, le soudage aluminothermique, le soudage à l'arc, le soudage par résistance, le soudage laser et le soudage par faisceau d'électrons [1].

### I.2. Définition de soudage :

Le soudage (ou la soudure) est une opération consistant à assembler deux (ou plus) éléments de manière permanente, tout en assurant la continuité entre ces éléments. L'assemblage se fait soit par chauffage, soit par pression, soit par les deux combinés, et avec ou sans produit d'apport soudage (ou la soudure) est une opération consistant à assembler deux (ou plus) éléments de manière permanente, tout en assurant la continuité entre ces éléments. L'assemblage se fait soit par chauffage, soit par pression, soit par les deux combinés, et avec ou sans produit d'apport [1].



Figure 1.1. Soudure à l'arc

### I.3. Principe de soudage :

La soudure est caractérisée par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler, ces derniers étant portés à la température de fusion et nécessitant le plus souvent l'introduction dans le joint, d'un complément de métal nommé « métal d'apport » déposé en une ou plusieurs passes. Si ce métal d'apport est différent de celui de base avec point de fusion plus bas c'est la « soudure hétérogène », s'il n'y a pas d'apport de métal ou apport de métal identique avec même point de fusion c'est « la soudure autogène »

Une soudure idéale est celle qui assure une continuité parfaite au point de vue des propriétés mécaniques, métallurgiques, et physique entre les pièces assemblés, de telle sorte qu'on ne puisse pas distinguer le joint du métal qui l'entoure [2].

### I.4. Caractéristique d'un joint de soudure :

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas des métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 04 zones principales [3].

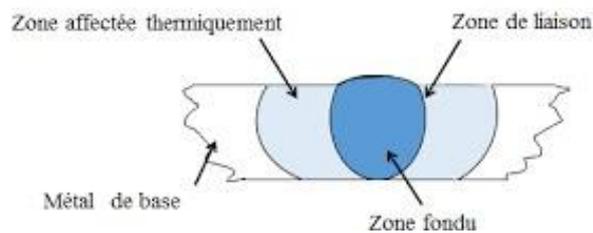


Figure.1.2. Les différentes zones d'un joint de soudure

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

**Zone affectée thermiquement (ZAT) :** La zone affectée thermiquement est la zone où la température atteinte est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide modifiant la structure du métal de base.

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

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

### I.5. Les différents procédés de soudage :

La soudure peut être réalisée avec différentes méthodes. Ces différentes méthodes sont appelées procédé de soudage. Chaque procédé de soudage se spécifie avec son propre matériel et paramètres bien précises. Ce chapitre vise à faire connaître les procédés de soudage les plus répandus. Procédé de soudage, selon la norme ISO 857, implique un ensemble de matériel et paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage à effectuer [4].

**Tableaux 1.1.** Recensement des divers types de procédés de soudage [5]

Procédé	Numéro de référence
Soudage à l'arc électrode enrobée	111
Soudage à l'arc avec fil fourré sans gaz de protection	114
Soudage à l'arc submergé	12
Soudage MIG	131
Soudage MAG	135
Soudage MAG avec fil fourré	136
Soudage TIG	14
Soudage à l'arc plasma	15
Soudage oxygaz	311

#### I.5.1. Définition du procédé de Soudage SMAW :

Ce procédé a été inventé en 1904 par Kjelberg (Suède), il est souvent appelé " Soudage à l'arc" ou " Manuel Métal Arc Welding (MMAW) pour les anglais " ou encore " Schield Métal arc Welding (SMAW) pour les américains ". C'est d'ailleurs cette dernière désignation qui est la plus répandue.



Figure.1.3. Schéma d'installation pour soudage manuel SMAW

Le Matériel du soudage comprend [6] :

1. Un générateur CA ou CC.
2. Une soudeuse (ou poste à souder).
3. Câble de masse reliée à une prise de masse.
4. Electrodes.

5. Porte-électrode.
6. Câble de l'électrode.

### I.5.1.1 Principe du Soudage SMAW :

Ce procédé utilise des baguettes, constituées d'une âme métallique et un enrobage, comme métal d'apport. Il consiste à mettre en fusion le métal des pièces à souder et les assembler grâce à cet apport. Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur reliant, le poste de soudage (Figure.1.3) qui est un générateur de courant électrique alternatif ou continu. Au contact de l'électrode avec la pièce à souder, il se forme un arc électrique (gaz ionisé dans lequel circule le courant électrique) en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, qui est une sorte d'étincelle de très forte puissance dégageant à la fois une lumière et une chaleur intenses de l'ordre de 3200 – 3500°C, ce qui permet d'obtenir la fusion du métal de base et du métal d'apport en créant le bain de fusion. L'enrobage de l'électrode permet de protéger ce bain de fusion des impuretés de l'air durant le soudage et de sa solidification. Après refroidissement, le laitier doit être enlevé du cordon de métal déposé et il faudra brosser ou meuler celui-ci avant le passage de la prochaine électrode [1].

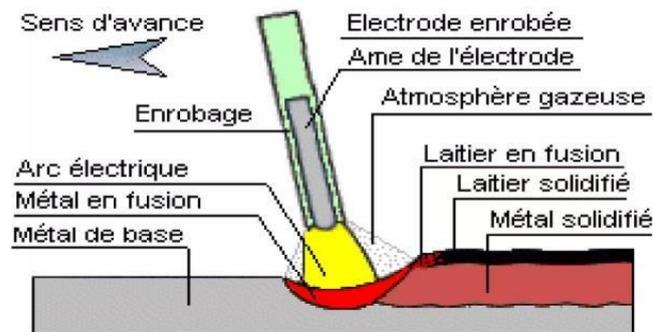


Figure.1.4. Schéma du soudage à l'arc électrode enrobée

Ce procédé est principalement utilisé pour les alliages ferreux, en charpente métallique, assemblages en tôlerie, chaudronnerie, tuyauteries, réparation d'équipement industriel et rechargement de pièces pour le secteur des travaux publics par exemples. Notons encore, que ce type de soudage exige une vitesse et un angle de soudure constants (Fig.1.4). La pointe de l'électrode doit rester à la même distance de la pièce [1].

### I.5.1.2. Métal d'apport :

Le métal d'apport pour le SMAW est une électrode enrobée. L'électrode enrobée est constituée d'une tige métallique ronde (âme) recouverte d'un enrobage. Il est disponible sous différentes diamètres, longueurs et couleurs [5].



Figure.1.5. Electrode enrobée

L'âme métallique permet de produire l'arc électrique est fournir le métal à déposer. L'enrobage génère un gaz de protection lors de soudage pour protégé le bain de fusion contre la contamination atmosphérique. IL augmente la conductibilité électrique de l'arc, l'enrobage contient des produits qui en se désintégrant augmentent la quantité d'ions entre l'électrode et le métal de base. Ci-dessous quelques autres fonctions de l'enrobage [5] :

- Permettre d'améliorer les propriétés physiques mécaniques et chimiques des soudures
- Eliminer le collage de l'électrode
- Rendre l'amorçage facile
- Augmenter la vitesse de soudage
- Améliorer la conductivité de l'arc
- Permettre d'utiliser une intensité de courant plus élevée

### I.5.1.3. Avantages Et Inconvénients De SMAW

Les avantages et les inconvénients de processus de soudage SMAW sont donnés dans la section ci-dessous :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le coût de l'équipement est inférieur à celui des autres méthodes de soudage conventionnelles.</li> <li>• Passer d'un matériau à un autre est facile.</li> <li>• Les taux de dépôt sont plus rapides dans SMAW</li> <li>• L'appareil est facile à déplacer d'un endroit à un autre.</li> <li>• Il n'y a pas besoin de gaz de protection.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le taux de dépôt est toujours inférieur à GMAW</li> <li>• Le coût du métal d'apport par longueur est plus élevé</li> <li>• Il a besoin de plus de coordination œil-main</li> <li>• La limace doit être retirée</li> <li>• La vitesse de production est inférieure</li> </ul>

### I.5.2. Procédé de soudage TIG (GTAW) :

Le procédé TIG *Tungstène Inerte Gas* selon la désignation française, ou GTAW *Gas Tungstène Arc Welding*) selon la désignation américaine, a vu le jour aux États-Unis d'Amérique. Il est issu de l'expérimentation de la protection d'un arc électrique par un gaz inerte puis, peu après, de l'utilisation d'une électrode en tungstène permettant l'amorçage de l'arc électrique sans fusion de l'électrode. [5].



Figure.1.6. Schéma d'installation manuel pour soudage

### I.5.2.1. Principe de soudage TIG :

Il s'agit d'un procédé de soudage par fusion dont la source de chaleur est un arc électrique qui est établi entre une électrode de tungstène non fusible et les pièces à souder. Un gaz inerte (argon, hélium ou un mélange Ar-He) protège de l'oxydation l'électrode, le bain de fusion et ses abords. Le gaz de protection est délivré par la buse équipant la torche. Il doit être présent en amont de l'amorçage de l'arc électrique (pré gaz) et au-delà de la solidification complète du bain de fusion (post gaz) [6].

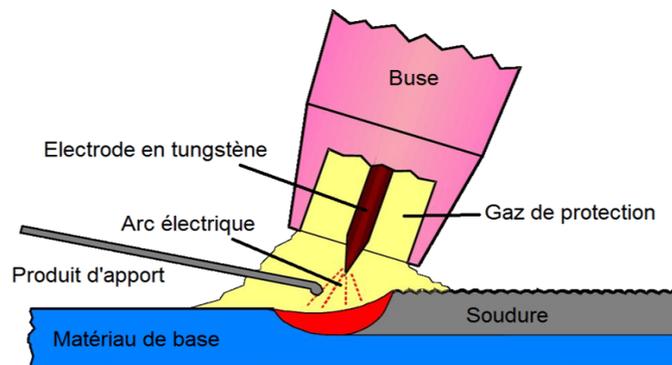


Figure.1.7. Principe de soudage TIG

### I.5.2.2. Matériel du soudage TIG :

Le matériel nécessaire au soudage TIG inclut :

- Un pistolet à souder.
- Un générateur HF (haut fréquence) pour l'amorçage de l'arc.
- Une alimentation électrique.
- Un gaz de protection.
- Un équipement de contrôle.
- Un flexible à double fonction bien séparé :
  - Alimentation électrique.
  - Canalisation de refroidissement par fluide, par l'eau.

Le soudage TIG se fait en courant continu(CC). L'électrode de soudage est reliée au pôle négatif du générateur de soudage CC et la chaleur est essentiellement générée dans la pièce à souder. Lorsque l'on soude de l'aluminium, la couche d'oxyde qui se forme ne peut être éliminée qu'en reliant l'électrode au pôle positif du générateur. En procédé TIG en courant alternatif (onde sinusoïdale), le générateur HF doit envoyer sans arrêt des impulsions afin d'éviter que l'arc s'éteigne lors du passage à zéro.

### **I.5.2.3. Gaz de protection :**

Le choix des gaz de protection utiliser pour le procédé TIG se fait selon les matériaux des pièces à souder.

**Tableaux 1.2.** Gaz de protection selon les matériaux des pièces à souder.

<b>Matériau</b>	<b>Gaz de protection</b>
Acier	Argon-Azote ou Argon – Hélium
Aluminium et ses alliages	Argon ou Argon – Hélium
Cuivre et ses alliages	Argon
Titane	Hélium ou Argon

### **I.5.2.4 Avantages du procédé TIG :**

Les avantages du soudage peuvent être résumés ci-dessous :

- Température de l'arc élevée et concentrée, d'où une grande vitesse d'exécution et une réduction des déformations.
- Soudage possible en toutes positions.
- Contrôle aisé de la pénétration.
- Bel aspect des soudures.
- Le soudage peut être très facilement automatisé.
- Possibilité de souder la plupart des métaux et alliages.
- Aucun dégagement de fumées ou de vapeurs nocives.

### **I.5.3. Soudage à l'arc sous flux solide :**

#### **I.5.3.1. Soudage à l'arc submergé (SAW)**

C'est un procédé de soudage à haut rendement. Il est surtout utilisé en mode automatique, il permet de mettre en œuvre une à trois électrodes continues consommables. Le soudage peut se faire en courant continue ou en courant alternatif. Le soudage à l'arc submergé convient surtout au soudage de pièces importantes (soudage de plaques sur les chantiers navals, soudage longitudinal de canalisations ou de poutrelles, soudage de cuves cylindriques). Il s'utilise indifféremment pour soudage bout à bout et les soudures d'angle. Il convient aussi pour les soudures de placage (application d'une couche d'acier inoxydable sur de l'acier au carbone ordinaire, ou d'un matériau résistant à l'usure). Ces procédés utilisant souvent des bandes des fil- électrodes (feuillard).



Figure.1.8. Principe de soudage à l'arc submergé.

### **I.5.3.2. Source d'alimentation :**

Les sources d'alimentation peuvent avoir une caractéristique horizontale ou une caractéristique plongeante. La caractéristique horizontale permet une bonne autorégulation de la longueur d'arc. Pour maintenir une longueur d'arc optimale, une autre solution consiste à ajuster la vitesse de dévidage de fil en fonction de la tension d'arc détectée. En utilisant des électrodes épaisses et des générateurs à caractéristique plongeante, on peut ainsi limiter la variation de courant de soudage. Il peut s'effectuer en courant alternatif ou en courant continu [7].

### **I.5.3.2. Matériel du soudage SAW :**

**Le matériel du soudage SAW comprend :**

- Un générateur
- Une soudeuse (ou poste à souder)
- Un dévidoir.
- Une goulotte achemine le flux depuis le bac à flux vers le point de soudage.
- Buse d'injection
- Bobine de fil-électrode.

### **I.5.3.3. Domaines d'applications :**

Essentiellement utilisé en automatique, le procédé SAW est employé pour des pièces ayant des épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 200/300 mm et apporte, à la fois en usine et sur chantier, une grande vitesse de soudage et des taux de dépôt élevés. On rencontre ce procédé, avec un ou plusieurs fils dans beaucoup d'industries, notamment en charpente métallique, chantier naval, chaudronnerie (appareils sous pression), tuyauteries industrielles, off-shore, industrie chimique/pétrochimique, rechargement cylindres de laminoirs, etc.

**Tableaux 1.3.** Avantages Et Inconvénients De (SAW) [8]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le processus facilement automatisé le rend adapté aux applications automatisées</li> <li>• Haut dépôt-il est plus économique de reconstruire de grandes pièces usées.</li> <li>• Nécessite moins de compétences de l'opérateur et une formation minimale</li> <li>• Dépôt</li> <li>• Produire des dépôts de soudure lisses, propres et sains.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La disponibilité des alliages est limitée à certains alliages couramment utilisés pour la reconstruction de l'arc submergé</li> <li>• La position de soudage est limitée à une position plate en raison du blindage de flux, généralement limité aux pièces cylindriques</li> <li>• Nécessite de multiples couches de dilution extrêmement élevée pour obtenir des performances d'usure maximales</li> <li>• apport de chaleur élevé-déformera les pièces</li> </ul>

**I.6. Différentes types de soudures et forme de joint [9] :**

Selon l'épaisseur et la position des pièces à soudés différents type de joints peuvent être adoptés, ils sont résumés ci-dessous :

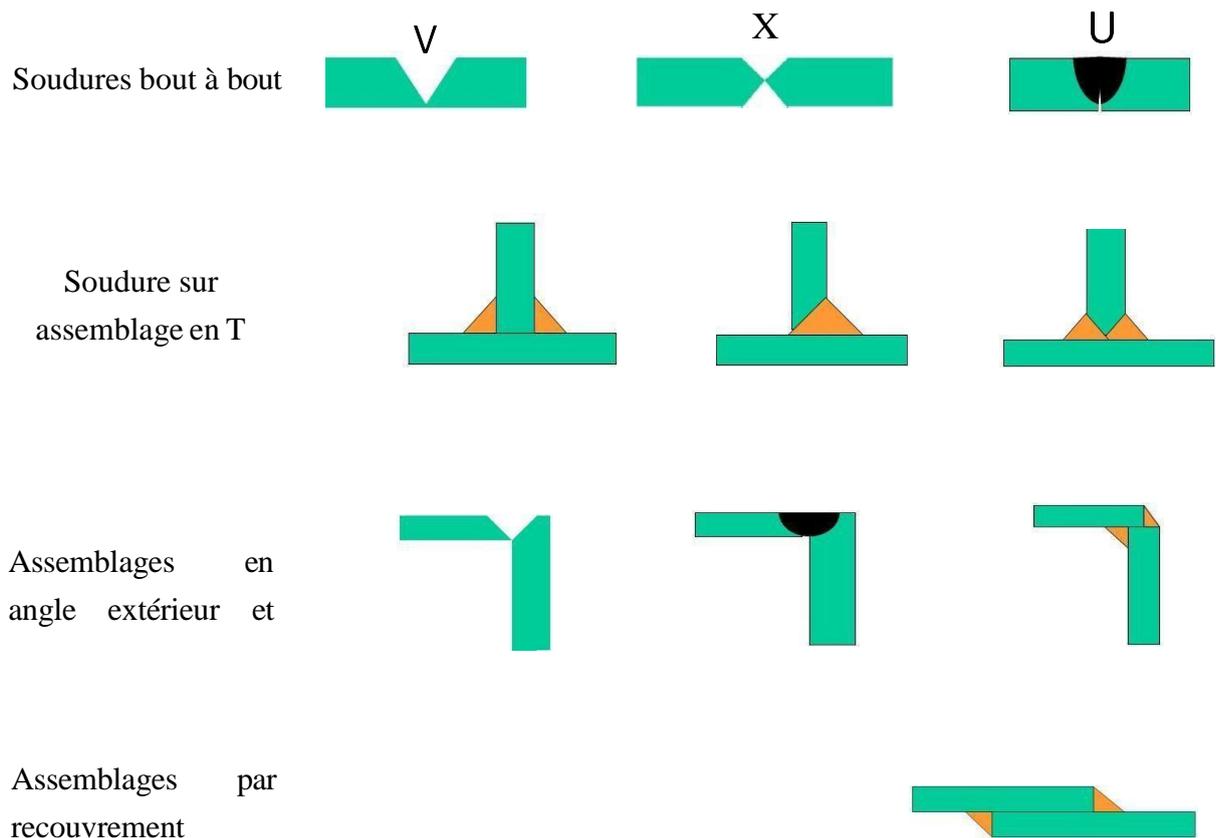


Figure.1.9. Technologie des différents types de joint de soudure selon les normes ISO.

## I.7. Déformations et défauts de soudage

### I.7.1 Déformations des soudures

Lors du soudage des déformations peuvent apparaître, donc il faut alterner les soudures pour éviter les déformations dû à un chauffage non uniforme, mais on peut aussi brider la pièce ou le pré déformer. Il faut aussi tenir compte du retrait de soudage lorsqu'il y a un jeu. On peut aussi brider la pièce (clame, pontet, boulonnage).

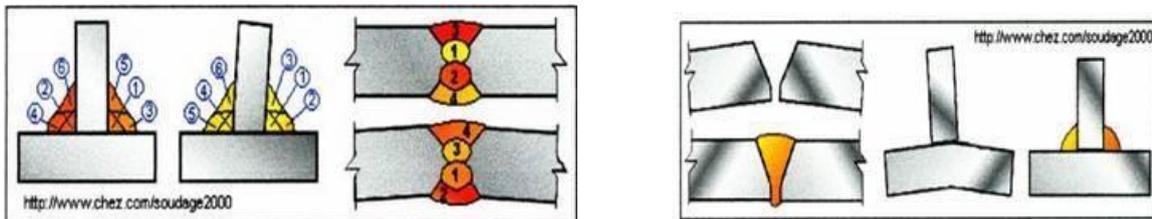
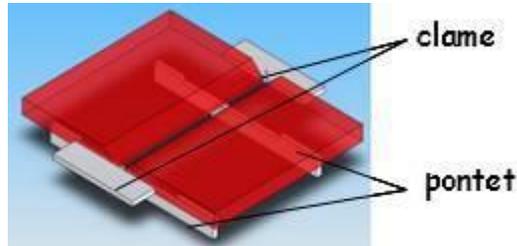
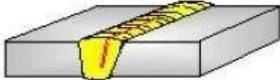
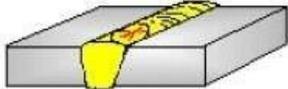
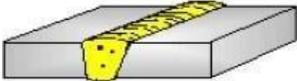
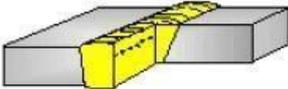
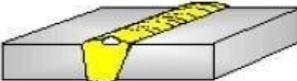
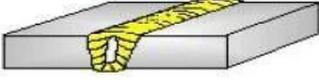


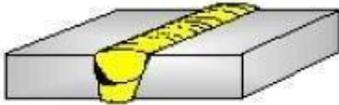
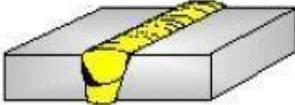
Figure.1.10. Déformations du au soudage inadéquat

### I.7.2 Défauts de soudage :

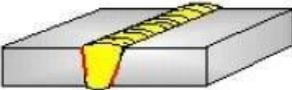
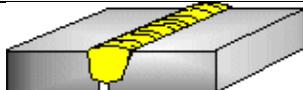
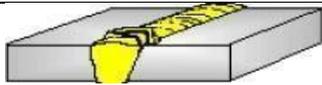
Les défauts de soudage sont cruciaux à identifier et corriger car ils affectent directement la résistance, la durabilité et la sécurité des structures soudées. Leur présence peut entraîner des défaillances prématurées sous charge, des fissures ou des ruptures soudaines. Les causes de ces défauts sont variées, incluant des paramètres de soudage mal réglés, des matériaux contaminés, un contrôle thermique inadéquat, ou des techniques de soudage incorrectes. Ces défauts peuvent compromettre l'intégrité des soudures, nécessitant souvent des réparations coûteuses et des retards dans les projets. Une compréhension approfondie des causes et des effets des défauts de soudage est essentielle pour garantir la qualité et la fiabilité des soudures. Ci-dessous un présentation détaillée des différents défauts de soudages.

Tableaux 1.4. Les Défauts de soudage [12]

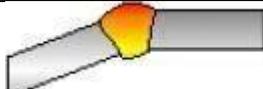
TABLEAU DES DEFAUTS DE SOUDURE			
Numéro	Désignation	Illustration	Term in English
<b>GROUPE N°1-FISSURES</b>			
101	FISSURE LONGITUDINALE		LONGITUDINAL CRACK
102	FISSURE TRANSVERSALE		TRANSVERSE CRACK
104	FISSURE DE CRATERE		CRATER CRACK
<b>GROUPE N°2- CAVITES</b>			
2011	SOUFFLURE SPHEROIDALE		GAS PORE
2014	SOUFFLURE ALIGNEES		LINEAR POROSITY
2017	PIQURE		SURFACE PORE
2021	RETASSURE INTERDENTRIQUE		INTERDENDRITIC SHRINKAGE
2024	SRETASSURE CRATERE DE		CRATERE PIPE
<b>GROUPE N°3- INCLUSIONS SOLIDES</b>			

301	INCLUSION DE LAITIER		SLAG INCLUSION
302	INCLUSION DE FLUX		FLUX INCLUSION

**GROUPE N°4 MANQUE DE FUSION ET PENETRATION**

401	MANQUE DE FUSION DES BORDS OU COLLAGE		LACK FUSION
402	MANQUE DE PÉNÉTRATION		LACK OF PENETRATION
517	MAUVAISE REPRISE		POOR RESTART

**GROUPE N°5 – DEFAUTS DE FORME**

5011	MANQUE DE PENETRATION		UNDERCUT
5012	MANQUE D'INTERPENETRATION		UNDERCUT
502	SUREPAISSEURE EXCESSIVE		EXCES WELD METAL
506	DEBORDEMENT		OVERLAP
508	DEFORMATION ANGULAIRE (distorsion)		ANGULAR MISALIGNMENT
509	EFFONDREMENT		SAGGING
511	MANQUE D'ÉPAISSEUR		INCOMPLETE FILLED GROOVE
516	ROCHAGE		POROSITY DUE TO CARBONE MONOXIDE

## **I.8. Contrôle non destructif :**

### **Définition :**

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances, contrairement à un contrôle destructif. On parle aussi d'un essai non destructif (END) ou d'un examen non destructif[7]

### **I.8.1 Contrôle visuel :**

Principe du contrôle visuel Ce type de contrôle non destructif se met en œuvre avant toute autre technique CND. Son mode opératoire est établi en référence à la norme de principe général de la méthode : NF EN 13018/A1. Cette technique de contrôle est effectuée à l'œil nu et permet de déceler toute anomalie de surface. Elle peut être classée dans la famille des contrôles CND. Toutefois, ce contrôle est le seul qui ne fasse pas appel à une technique particulière. Il est basé sur l'observation : il convient donc de définir des conditions d'observations et de les optimiser [7].



Figure.1.11. Contrôle visuel

### **I.8.2 Contrôle dimensionnel :**

Des mesures précises sont prises pour vérifier les dimensions de la cuve, y compris l'épaisseur des parois et la conformité aux spécifications de conception. Des appareils de mesure tels que des pieds à coulisse, des jauges d'épaisseur et des instruments de mesure sont utilisés pour effectuer ces contrôles.



Figure.1.12. Contrôle dimensionnel

### I.8.3 Contrôle par ressuage

Contrôle par ressuage (Pénétrant Setting en anglais, d'où son abréviation officielle : PT) est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à appliquer un liquide pour mettre en évidence des discontinuités ou des défauts débouchants comme les fissures, les criques, etc. Il est applicable sur tous métaux, de nombreuses céramiques et de nombreuses pièces composites. Elle est très utilisée dans l'aéronautique, l'industrie de production d'énergie, les forges et les transports. [10]



Figure.1.13. Méthodologie de contrôle par ressuage

Le ressuage est une technique particulièrement adaptée aux assemblages soudés, aux produits de forge, aux produits de fonderie et aux pièces mécaniques.

### I.8.4 Contrôle radiographique :

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou gamma) est utilisé pour détecter des discontinuités et des défauts internes dans les matériaux métalliques, tels que des fissures, des soufflures, des inclusions, et des manques de liaison ou de fusion. Ce contrôle est effectué à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou une source radioactive gamma émettant des rayonnements ionisants et des films radiographiques ou une caméra pour l'acquisition numérique de l'image. Les films ou la caméra sont placés sur la face opposée au rayonnement. Les rayons de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du matériau, permettant ainsi la détection des défauts internes lorsqu'ils traversent la paroi du matériau irradié [11].



Figure.1.14. Films radiographiques ou une caméra

### I.8.5 Contrôle par ultrasons :

Tout d'abord, le principe du contrôle par ultrason est de générer des ondes en partant d'un élément électrique. Premièrement, la technique du contrôle est liée à une onde ultrasonore est émise par un dispositif convertissant un signal physique.



Figure.1.15. Contrôle par ultrasons

En fait il est placé sur la surface des pièces à contrôler. D'autant plus, dans les métiers de l'industrie il est important d'avoir la possibilité de contrôler tous type de production, ou encore des matériaux composites voire multi matériaux [12]. Les défauts qui peuvent être détectés par les différentes techniques CND sont résumés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau. I.10.** Récapitulatif des intérêts des principaux contrôles non destructifs en soudures [13]

Procède	Défauts détectables	Avantages	Limites
Examen visuel	-Défauts de surface (manque de pénétration, caniveaux). -Forme de cordon incorrect.	-Contrôle permanent pendant le soudage. -Peu couteux.	-Défauts surface -Pas de documents
Ressuage	-Défauts de surface invisible à l'œil (fissures dédoublées).	Peu couteux Simple d'emploi.	-Défaut de surface Pas de documents d'archive -Interprétation délicate -Non utilisable sur matériaux poreux.
Magnétoscopie	-Défauts de surface (fissures, manque de pénétration,).	- Méthode sensible et simple. -Peu couteux.	-Défauts de surface. Interprétation délicate. - Utilisable que sur matériaux ferromagnétiques
Radiographie	compacité (internes) souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion	- Facilités de détection des défauts internes des pièces - Bonne sensibilité de détection des défauts	-Les défauts fins, les réseaux de microfissures, les fissures et manques de pénétration comprimés, les manques de fusion sur chanfrein ouvert peuvent ne pas être détectés

### I.9. Métallurgie du soudage :

Lors d'une opération de soudage, en terme métallurgique, tout est remis en question ; les structures des pièces au voisinage de cordon tendent à évoluer lors du soudage. En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage, les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique local. De plus il s'agit de soudage par fusion, d'une part, les matériaux assemblés peuvent changer leurs compositions chimiques s'ils sont mélangés à une nouvelle composition différente (métal d'apport). D'autre part, ils quittent la structure du métal de

base pour passer (ou moins dans un premier temps) par une structure brute de solidification, de type produit moulé (dans la zone où ils sont fondus puis à nouveau solidifiés). Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau soudé dans les zones où elle est modifiée par le soudage (région soudées), et ce dans le but de maîtriser les propriétés d'une soudure, par l'optimisation de l'effet thermique [7].

#### **I.11. La norme API 1104 :**

Est une norme essentielle pour les professionnels de la soudure. Elle établit des exigences détaillées en matière de qualification des soudeurs, de procédures de soudage, de contrôle et d'assurance qualité. Cette norme joue un rôle crucial pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures soudées. La qualification des soudeurs est basée sur les connaissances théoriques et compétences pratiques. Leur compétences est évaluée et certifiées par des organismes agréés, conformément aux exigences de l'API 1104 [7]. La qualification des procédures de soudage conformes à l'API 1104 englobe la Préparation de surface, les paramètres de soudage et méthodes d'exécution des soudures.

Le contrôle et l'assurance qualité selon l'API 1104 se composent de plusieurs étapes essentielles pour garantir la fiabilité des soudures. L'inspection visuelle permet de vérifier l'aspect, la forme et l'absence de défauts apparents. Les essais non destructifs, tels que la radiographie, les ultrasons ou la magnétoscopie, sont utilisés pour détecter les défauts internes. En cas de non-conformité, les soudures défectueuses sont réparées ou remplacées. Les critères d'acceptation des soudures incluent le respect des dimensions et de la forme spécifiée, l'absence de défauts tels que les fissures, les pores, et le manque de fusion ou de pénétration, ainsi que la conformité de la résistance mécanique et de l'intégrité structurelle aux exigences. Enfin, l'apparence des cordons de soudure doit être lisse et régulière.

#### **I.12. Sécurité lors du soudage [7] :**

Le soudeur va intervenir sur des lieux différents et avoir recours à des procédés à risques. Qu'il travaille en atelier ou sur un chantier, le soudeur sera exposé à de multiples risques. Ces risques sont de natures diverses. Les missions du soudeur l'amènent souvent à utiliser des outils qui peuvent rapidement le mettre en danger s'il n'est pas équipé correctement.



Figure.1.16. Elément de protection individuel pour le soudeur

Les principaux risques de ce métier sont le risque thermique, lié à la chaleur qui résulte du procédé, le risque chimique dû aux fumées et le risque oculaire, à cause du rayonnement émis par l'activité. Le risque auditif est également présent dans certaines conditions. Les EPI choisis devront être réglementés et suivre les normes en vigueur, afin de garantir une protection maximale aux utilisateurs.

### 1.13. Conclusion :

Le soudage joue un rôle crucial dans l'intégrité des structures, car des soudures défectueuses peuvent compromettre la sécurité et la durabilité des projets. Une soudure bien exécutée assure la solidité et la fiabilité des assemblages, ce qui est essentiel pour prévenir les défaillances structurelles et garantir la longévité des constructions. Sur les chantiers de construction (naval, aéronautique, pétrolier, etc.), avant d'entamer le soudage, il est important et obligatoire de qualifier le procédé de soudage selon des normes spécialisées. Connaître et maîtriser un procédé de soudage permet d'exploiter pleinement ses avantages et d'optimiser ses inconvénients, tels que la réduction du temps d'exécution et des coûts d'exploitation, tout en minimisant les défauts de soudage.

# **CHAPITRE 02**

**Conception est réalisation  
d'un réservoir sous pression**

# CHAPITRE02

## Conception est réalisation d'un réservoir sous pression

### II.1 Introduction :

Un réservoir sous pression GPL, également connu sous le nom de réservoir de gaz propane liquéfié, est un dispositif utilisé pour stocker et transporter du GPL de manière sûre et efficace. Le GPL est un mélange de gaz principalement composé de propane et de butane, qui est utilisé comme source d'énergie dans de nombreux domaines, tels que le chauffage, la cuisson et les véhicules.

Les réservoirs sous pression GPL sont conçus pour résister à la pression élevée du gaz liquéfié et sont fabriqués à partir de matériaux résistants tels que l'acier. Ils sont également dotés de dispositifs de sécurité, tels que des soupapes de décharge de pression, pour éviter toute surpression et garantir la sécurité de l'utilisateur. Ces réservoirs sont disponibles dans différentes tailles et capacités, en fonction des besoins spécifiques de l'utilisateur. Ils peuvent être utilisés pour le stockage à domicile, dans les installations industrielles ou commerciales, ainsi que dans les véhicules fonctionnant au GPL.

L'utilisation d'un réservoir sous pression GPL présente de nombreux avantages. Tout d'abord, il permet une utilisation plus efficace du GPL, car il maintient le gaz à une pression constante, ce qui facilite son utilisation et sa combustion. De plus, il offre une solution de stockage sûre, car il est conçu pour résister aux conditions environnementales et aux chocs mécaniques.

En conclusion, les réservoirs sous pression GPL sont des dispositifs essentiels pour le stockage et le transport du GPL. Ils offrent une solution sûre et efficace pour l'utilisation de cette source d'énergie polyvalente. Que ce soit pour un usage domestique, industriel ou automobile, les réservoirs sous pression GPL sont un choix fiable et pratique.

### II.2 Historique :

La première conception documentée de réservoir sous pression a été décrite en 1495 dans le livre de Léonard de Vinci, le Codex Madrid I. Les navires ressemblant à ceux utilisés aujourd'hui ne sont apparus que dans les années 1800, lorsque la vapeur a été générée dans des chaudières contribuant à stimuler la révolution industrielle. Il y a eu un grand nombre d'explosions dommageables et souvent mortelles associées à ces chaudières et récipients sous pression, avec un décès survenant presque quotidiennement aux États-Unis. Le premier code des récipients sous pression a été élaboré à partir de 1911 et publié en 1914. Le besoin de récipients à haute pression et à haute température pour les raffineries de pétrole et les usines chimiques a donné naissance à des récipients joints avec soudage, qui sont aujourd'hui le principal moyen d'assembler des récipients métalliques. Il y a eu progrès dans le domaine de l'ingénierie des récipients sous pression, tels que l'examen non destructif avancé, les essais ultrasonores multiéléments et la radiographie, des nouvelles qualités de matériaux avec une résistance accrue à la corrosion et des matériaux plus résistants, et des nouvelles façons d'assembler des matériaux [1].



**Figure 2.1.** Réservoir sous pression en 1948

### **II.3. Définition :**

Un réservoir sous pression est un réservoir conçu pour contenir des gaz ou des liquides à une pression sensiblement différente de la pression ambiante. Les méthodes et les matériaux de construction peuvent être choisis en fonction de l'application de pression et dépendent de la taille du récipient, du contenu, de la pression de service, des contraintes de masse et du nombre d'articles requis. Les appareils sous pression peuvent être dangereux et sont réglementés par des autorités d'ingénierie soutenues par la législation. La conception implique des paramètres tels que la pression et la température de fonctionnement maximal sûr et le facteur de sécurité. [2]

### **II.4. Les formes d'un récipient sous pression :**

Les récipients sous pression sont généralement formés de sections de sphères, cylindres et cônes. Une conception commune est un cylindre avec des embouts appelés têtes. Les formes plus compliquées sont toujours plus difficiles à analyser et construire.



**Figure 2.2.** Réservoir de gaz sphérique

Un réservoir sous pression sphérique est la forme idéale pour maintenir la pression interne. Cependant, une forme sphérique est difficile à fabriquer et plus coûteuse, So la plupart des récipients sous pression sont cylindriques avec têtes semi-elliptiques 2: 1 ou embouts à chaque extrémité. Les récipients sous pression plus petits sont assemblés à partir d'un tuyau et de deux couvercles. Un inconvénient de ces récipients est que les grands diamètres sont plus chers, de sorte que la forme la plus économique d'un récipient sous pression de 1 000 litres (35 pieds cubes) peut

être un diamètre de 91,44 centimètres (36 po) et une longueur de 1,7018 mètre (67 po).[3]



**Figure 2.3.** Réservoir de gaz cylindrique

### **II.5. Utilité d'un réservoir sous pression :**

Les réservoirs sous pression sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels pour diverses applications. Ils sont notamment utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière pour le stockage de produits chimiques, dans l'industrie alimentaire pour la conservation des aliments, dans l'industrie pharmaceutique pour la fabrication de médicaments ou encore dans le secteur de l'énergie pour le stockage de l'énergie thermique ou hydraulique [4].

### **II.6. Généralités sur le GPL :**

GPL est l'abréviation de gaz de pétrole liquéfié. Lorsqu'il est utilisé comme carburant pour des véhicules. Le GPL est un mélange d'hydrocarbures butane et propane. On obtient alors des GPL butane et propane à l'état liquide sont tous les deux des gaz à température ambiante normale et à la pression atmosphérique mais sous une pression moyenne ils deviennent liquides. Ceci permet un transport et un stockage faciles du GPL sous sa forme liquide concentrée.

Le GPL provient du raffinage du pétrole brut (40%) ou est extrait du gaz naturel ou du pétrole brut provenant de gisements souterrains (60%). Le GPL sous sa forme pure est inodore mais est rendu odorant pour aider à la détection des fuites. Le gaz est légèrement plus lourd que l'air et s'introduira dans les points bas et cavités en cas de fuite. Lorsqu'on supprime la pression le GPL se dilate et 1 litre de liquide génère 250 litres de vapeur. Le GPL sous sa forme liquide augmente de volume de 2% par 10 degrés d'augmentation de la température (°C). Pour cette raison, les réservoirs de GPL ne doivent jamais être remplis à plus de 85%.

Si le GPL doit servir de carburant pour véhicule, le butane et le propane sont mélangés dans des proportions optimales pour obtenir une combustion complète du produit. Le GPL donne moins de pollution due aux gaz d'échappement. Peut souvent être beaucoup plus économique que les autres carburants (essence...etc.) et ses performances sont comparables à celles de l'essence et du diesel. Le GPL est légèrement moins sujet à l'inflammation que l'essence. Environ entre 2% et 9% de vapeurs de GPL dans l'air créent une atmosphère inflammable. Un déversement de GPL liquide s'évaporerait rapidement mais en contact avec la peau il peut provoquer des brûlures froides [5].

## II.7. Conception du récipient sous pression :

### II.7.1. Code de conception ASME : (American Society of Mechanical Engineers (ASME) :

Norme de premier plan pour les équipements et les composants sous pression dans le monde entier, le code ASME pour les chaudières et les appareils à pression (code ASME) fournit des exigences pour la certification des fabricants et l'assurance qualité. L'utilisation des codes de conception est d'éviter les catastrophes qui peuvent affecter humains. Par conséquent, ils comprennent un éventail d'expériences et de bonnes pratiques. Bien qu'il existe plusieurs règles qui s'appliquent, développées par les pays avec une expertise technique reconnue en la matière, le code qui est le plus internationalement reconnu et le plus utilisé est la section VIII "réservoir sous pression » partie du Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) du American Society of Mechanical Engineers (ASME) [11].

### II.7.2. BPVC Sections :

Le code ASME BPVC est un ensemble de normes, de spécifications et de conception règles basées sur de nombreuses années d'expérience, toutes appliquées à la conception, fabrication, installation, inspection et certification des appareils sous pression. Il a été créé aux États-Unis d'Amérique ; plusieurs compagnies d'assurance ont exigé un code de conception afin de réduire les pertes. Le code ASME concernant les appareils sous pression est divisé en plusieurs sections comme représenté dans le diagramme suivant [6].

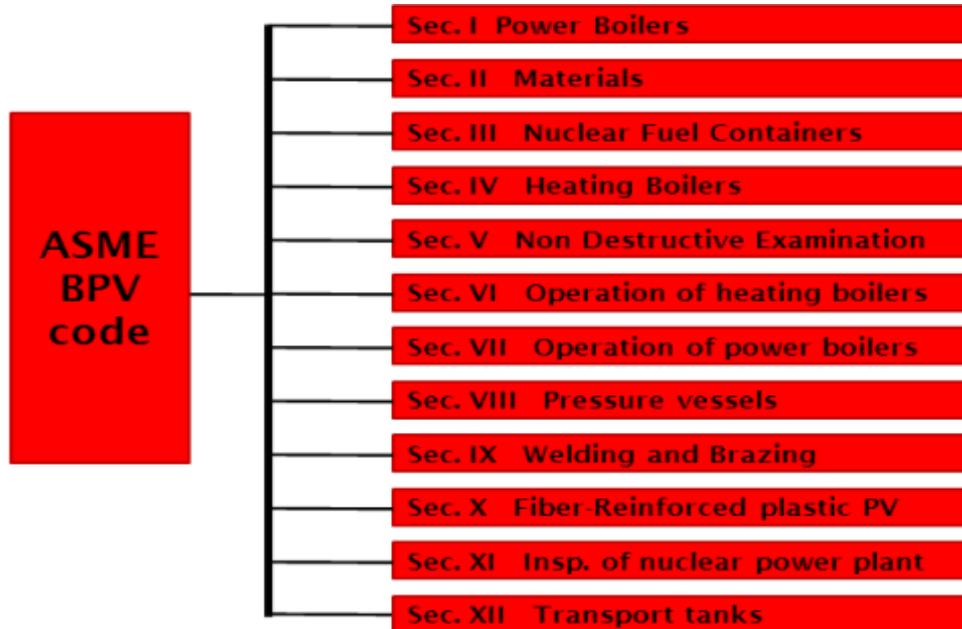


Figure 2.4. Sections BPVC du Code ASME

Pour concevoir correctement un appareil sous pression, il est nécessaire de comprendre la section VIII du code. En outre, le concepteur devra se familiariser avec les sections II, V et IX. Selon la portée de chaque section, les 12 parties peuvent être regroupées comme suit :

Codes de construction : Sections I, III, IV, VIII, X et XII.

Codes de référence : sections II, V, IX.

La section du code des réservoirs sous pression ASME, ainsi que la section VIII, exigent un bout longitudinal et circonférentiel articulations à examiner par radiographie complète. Lorsque la conception de la cuve est requise, joint longitudinal soudé bout à bout, la coque cylindrique aura un facteur d'efficacité conjoint ( $E = 1,0$ ). Ce facteur correspond à un facteur de sécurité (ou qualité du matériau) facteur de 3,5 dans le métal-mère.

### **II.7.3. Critères de sélection des matériaux :**

Les principaux critères de choix d'un matériau sont :

- La capacité du matériau de subir les sollicitations de service sans détérioration notable.
- La fiabilité de mise en œuvre.
- La disponibilité sur le marché.
- Exigences réglementaires, main d'ouvrage et le cout.
- Epaisseur des tôles.

Basant sur ces critères de choix et la norme ASME, l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs sous pression (GPL) est de grade A516 GR70.[7].

### **II.7.4. Identification du matériau :**

#### **a) Choix du métal de base :**

Masteel fournit des plaques en acier au carbone de haute qualité pour la fabrication de chaudières et de réservoirs sous pression, parfaitement adaptées aux normes élevées fixées par l'industrie pétrolière, gazière et pétrochimique - c'est pourquoi nous stockons une vaste gamme de plaques de carbone selon ASTM A516 Grade 70 et ASME SA516 Grade 70 [10].

#### **b) Définition de l'acier a516 grade 70 :**

C'est un acier conçu pour des récipients sous pression résistants à la chaleur. Les aciers de qualité A/SA 516 Gr.70 présentent une bonne soudabilité. On les utilise surtout pour fabriquer des chaudières, des récipients à pression et des tubes de transport de liquides chauds. Ils offrent également de bonnes propriétés à basses et hautes températures. L'état de fourniture du produit est en général en laminage contrôlé [13].

#### **ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70 – Spécifications et normes [8]**

Les spécifications et normes des tôles d'acier au carbone ASTM A516 Grade 70 et ASME SA516 Grade 70 sont décrites dans le tableau 1.

**Tableau II.1.** Spécifications et normes équivalentes de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70

Norme	Description
ASTM/ASME	A/SA516-GRADE70
Norme DIN	-
Standard britannique	BS1501-224-490A/B
Norme européenne	EN10028 P355GH

**a) Soudabilité d'acier**

Le soudage de A516-70/SA516-70 doit être effectué conformément aux codes de soudage applicables. Des consommables de soudage spéciaux, Les pratiques à faible teneur en hydrogène sont fortement recommandées, y compris l'élimination de l'humidité de surface [9].

**II.8. Conception et réalisation d'un récipient sous pression :**

La réalisation d'un réservoir sous pression pour le GPL (gaz de pétrole liquéfié) est un processus complexe et spécialisé qui nécessite une expertise et une connaissance approfondie des normes de sécurité et des réglementations en vigueur. Voici les étapes générales impliquées dans la réalisation d'un réservoir sous pression pour le GPL : Tout d'abord, le réservoir est conçu en tenant compte des spécifications et des exigences du client, ainsi que des réglementations locales et des codes de sécurité applicables. [10]

**II.8.1. Conception**

La conception comprend le dimensionnement du réservoir, le choix des matériaux, les connexions et les accessoires nécessaires.

**Tableau II.2.** Fiche technique d'un réservoir sous pression GPL de capacité 100 m<sup>3</sup> [11].

Fluid	Propane / Butane
Code de calcul	ASME II Section VIII Division 1 (Edition 2019 )
Diameter exterior	1984 mm
Capacité	40 m <sup>3</sup>
Type	Reservoir cylindrique horizontal
Pression de service	19,3 bars
Pression de calcul	20 bars
Temperature de calcul	- 10° C / + 50° C
Temperature de service	- 10° C / + 50° C
Densité propane / Butane	502 / 577 à 15° C
Fond bombé	Elliptique

Surépaisseur de corrosion	4 mm
Coefficient de joint	0,95
Radiographie	100%
Traitement thermique	Oui (Détente)

**Tableau II.3.** Caractéristiques des matériaux de construction [16].

Fonds et viroles	:P295 GH
Résistance à la rupture	$R_m = 480 \text{ N/mm}^2$
Résistance à l'élasticité	$R_{p0.2} = 290 \text{ N/mm}^2$
Tubulures	SA 106 Gr. B
Brides de tubulures	SA 105
Berceaux : Berce	P295 GH
Support (Embase et Ame)	E 24
Boulonnerie	SA 193 Gr. B7 / SA 194 Gr. 2H

a) **Calcul de la contrainte admissible (S)[12] :**

S = la plus faible des deux valeurs suivantes :

$$R_m/4 = 480/4 = 120 \text{ N/mm}^2 = 12 \text{ daN/mm}^2$$

$$R_{p0.2}/1,5 = 290/1,5 = 193,33 \text{ N/mm}^2 = 19,33 \text{ daN/mm}^2$$

D'où la contrainte admissible :

$$\boxed{S = 12 \text{ daN/mm}^2 = 120 \text{ MPa} = 1223,66 \text{ kg/cm}^2}$$

b) **Calcul de l'épaisseur du fond bombé :**

**Tableau II.4.** Fiche technique de l'épaisseur du fond bombé

Pression de calcul	$P = 20,39 \text{ kg/cm}^2$
Diamètre intérieur	$D_e = 1950 \text{ mm}$
Contrainte admissible	$S = 1223,34 \text{ kg/cm}^2$
Coefficient de joint	$E = 1$

t = Epaisseur recommandée après formage Fond bombé elliptique sans soudure

c) **Epaisseur nominale recommandée du fond bombé :**

$$t = P \times D_e / (2SE - 0,2 \times P)$$

$$t = 20,39 \times 1950 / (2 \times 1223,34 \times 1 - 0,2 \times 20,39) t = 16,28 \text{ mm}$$

Epaisseur adoptée (après formage) est :

$$\boxed{t = 16,3}$$

## II.8.2. Etapes de réalisation :

### II.8.2.1. formage des fond bombé :

la fabrication des fond bombé est faite par par la technique de repoussage. Le repoussage est une autre technique de formage des fonds bombés qui permet d'obtenir des pièces difficilement réalisables en emboutissage. C'est le procédé de déformation d'une tôle de forme circulaire. Il existe le repoussage manuel réalisé sur un tour manuel et le repoussage numérique réalisé sur un tour à commande numérique. Une fois la tôle déformée, que ce soit en emboutissage ou en repoussage, il suit le bordage qui consiste à former l'arrondi du fond. Celui-ci est réalisé suivant des normes spécifiques. Ensuite l'usinage du bord est réalisé suivant un profil bien défini [13].



Repoussage fond bombé



fond bombé finis

**Figure.2.5.** Formage des fond bombé par repoussage

### II.8.2.2. Cintrage de tôle :

C'est une technique de transformation d'une surface plane en surface cylindrique ou conique fermée (roulage fermé : virole, voir ci-contre) ou roulage ouvert. Le roulage est obtenu par un effort de flexion provoqué soit par pression ou par choc [18]. Les coques du réservoir sont généralement fabriquées à partir de tôles d'acier au carbone de haute qualité, conformément aux normes spécifiées telles que la norme ASTM A516/A516M.



Tôles d'acier a516 gr 70

cintrage des tôles

**Figure.2.6.** Cintrage des tôles d'acier a516 gr 70

Le cintrage peut être réalisé aussi par rouleuse de type pyramidale possède 3 rouleaux. Le rouleau supérieur est amovible, pivote et permet la sortie du cylindre fini. Il reste fixe pendant le cycle du roulage. L'entrée de la tôle peut se faire des deux côtés [14].



**Figure 2.7.** Rouleuse pyramidale

### II.8.2.3. Assemblage :

Le réservoir est constitué d'une coque cylindrique soudé bout à bout longitudinal, fermé par deux fonds bombé soudés bout à bout sur bord. L'assemblage des fonds à la virole est exécuté par soudage (SMAW+SAW). Une ouverture est prévue sur virole pour le remplissage et l'entretien.



**Figure 2.8.** Soudage d'un réservoir sous pression par soudage SMAW

d) Première étape :

Assemblé la virole avec le fond bombé par soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobé (SMAW) en plusieurs passes. Les passes de pénétration sont réalisés par du Métal d'apport E 6010 et les passes de bourrage en électrode enrobé E7018.

e) Deuxième étape :

La passe de finition par le procédés de soudage à l'arc submergé (SAW) ou soudage sous flux solide (EM12k et flux) pour assurer des joints solides et étanches. Les contrôles de qualité sont effectués tout au long de l'assemblage pour garantir la conformité aux spécifications.



**Figure 2.9.**Soudage de passe finition par soudage automatique SAW

#### **II.8.2.4. Contrôles de qualité des joints du cordon de soudure :**

##### **a. Contrôle non destructif :**

Le but principal d'un contrôle non destructif dans ce domaine est de déterminer la qualité ou l'état de la soudure, avec l'intention de l'accepter ou de la rejeter en fonction de normes ou de cahiers

des charges.

- **Contrôle visuel :**

Le contrôle visuel est la première technique utilisée lors de tout contrôle non destructif. Il permet de déterminer la technique non destructive la plus adaptée pour des examens plus approfondis. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci. Des défauts évidents comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion, des fissures ouvertes ou des fuites peuvent rapidement être repérés. L'examen visuel doit être effectué dans de bonnes conditions et ce, entre autres, grâce à un éclairage suffisant. Lorsque qu'une pièce à contrôler n'est pas accessible pour un examen visuel direct, on utilise alors une technique indirecte en s'aidant d'un miroir ou d'un appareil muni d'une caméra [15].



**Figure 2.10.** Contrôle visuel .

- **Contrôle par ressuage :**

Les produits de ressuage sont constitués par les pénétrants, les émulsifiants et les révélateurs. Le Contrôle par ressuage est fait par l'application du pénétrant suivie d'un temps pour humidifier, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. À la suite de quoi, l'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance [16].



**Figure 2.11.** Contrôle par ressuage

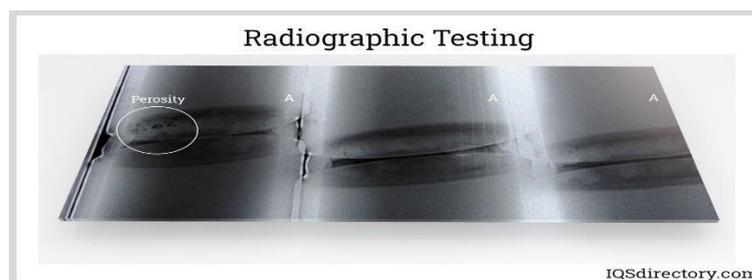
Il est à noter que la température de la substance de pénétration et de la surface de la pièce à examiner ne doit pas être inférieure à 10 ° C, ni supérieures à 52 ° C tout au long de la période d'examen. Le chauffage local ou le refroidissement est autorisée à condition que la température de la pièce reste dans la plage de 10 ° C à 52 ° C pendant l'examen. Où il n'est pas pratique de se conformer à ces limites de température, d'autres températures et les durées peuvent être utilisés, la procédure d'examen à la gamme proposée inférieure ou supérieure la température doit être nuancée selon code ASME, section V, article 6, par. T-653.

- **Contrôle radiographique :**

La radiographie est utilisée pour inspecter les soudures et détecter les défauts internes tels que les fissures ou les inclusions. Des rayons X ou des rayons gamma sont utilisés pour pénétrer la cuve et une plaque radiographique ou un détecteur est utilisé pour enregistrer l'image des soudures. Un radiologue qualifié examine ensuite les radiographies pour détecter les défauts.



**Figure 2.12.** Contrôle par radiographie



**Figure 2.13.** Clichy de cordon de soudure

### **II.8.3. Revêtement et finition :**

Un récipient sous pression peut être soumis à la corrosion et à l'érosion de l'extérieur, résultant des conditions environnementales, ou de l'intérieur, en raison des fluides utilisés, ainsi que des températures et des pressions de fonctionnement. Les surfaces intérieures et extérieures d'un réservoir sous pression peuvent avoir besoin d'un traitement pour se protéger contre la corrosion et l'érosion [17].

Par ailleurs, les réservoirs de stockage du gaz GPL doivent avoir une protection extrême contre les origines des fuites et notamment contre la corrosion.

Les étapes du revêtement peuvent être résumées comme suit [18] :

- Le système consiste à faire une préparation de surface par brossage avec un matériel anti déflagrant qui ne produit pas des étincelles. Après le brossage, on procède à l'application de la première couche de peinture anticorrosion, la couche primaire de peinture anticorrosion sert pour protéger la surface nue après le brossage.
- Le système de peinture est à la suite renforcé par une couche intermédiaire de peinture anticorrosion
- Le système de peinture anticorrosion est finalement fermé par une couche de peinture de finition idéale pour la finition de revêtements d'imperméabilisation et d'étanchéité (Résine Époxy) Fournit une protection décorative pour les sous-faces des réservoirs.



**Figure 2.13.** Revêtement du récipient sous pression

#### **II.8.4. Equipements est accessoires du réservoir sous pression :**

##### **a. Les brides :**

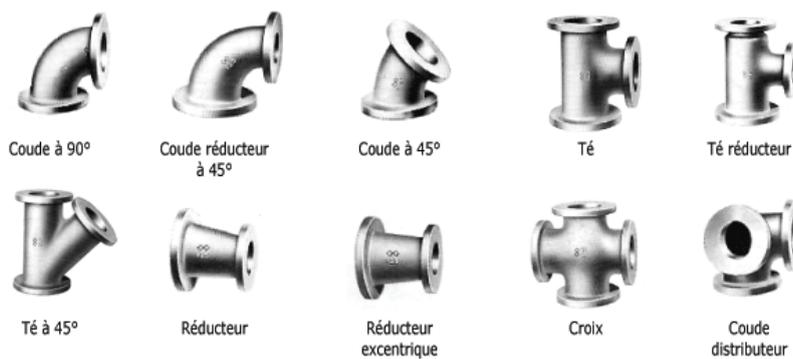
La bride est une partie importante du récipient à pression. Elle relie différentes pièces et peut être démontée à tout moment. C'est presque un élément essentiel pour les équipements qui doivent être ouverts fréquemment sont généralement fabriquées en acier conformément aux normes spécifiées telles que la norme ASTM A105/A105M pour les brides en acier forgé ou la norme ASTM A181/A181M pour les brides en acier forgé à faible teneur en carbone. De nombreuses normes de brides différentes sont trouvées dans le monde entier pour permettre une fonctionnalité et une interchangeabilité faciles. Les normes communes incluent ASA/ASTM(USA), PN/DIN (européen), BS10 (britannique/australien) et JIS/KS (japonais/coréen) [19]. Les brides en fonte sont aussi utilisées, ils sont solides, rentables et résistants aux températures moyennes à élevées.



**Figure. 2.14.** Bride en acier inoxydable

**b. Les raccords des brides est de canalisation :**

Les raccords à brides sont couramment utilisés dans les industrielle de gros diamètre. Le principal avantage de ce type de raccord est sa facilité de démontage et de remontage. De plus, il comporte un joint d'étanchéité annulaire plat, serré entre les brides [20].



**Figure 2.15.** Les différents raccords des brides

Les équipements sous pression (E.S.P) sont des appareils ou enveloppes, consacrés à la production ou la fabrication, contenant un fluide à une pression supérieure à 0,5 bar tels que les vannes, les jauges et peuvent être fabriqués en utilisant des machines d'usinage telles que des tours, des fraiseuses et des rectifieuses pour obtenir les dimensions et les spécifications précises. [21]



Vannes



Jauges d'une cuve

**Figure 2.16.** Les différents accessoires du réservoir sous pression

### **II.8.5. Installation des équipements, tests finaux et certification :**

Une fois le réservoir est fabriqué, les équipements tels que les vannes, les jauges, les dispositifs de sécurité et les systèmes de contrôle sont installés conformément aux exigences spécifiques du projet. Avant la mise en service, le réservoir est soumis à des tests finaux pour s'assurer de sa conformité aux normes et réglementations applicables. Une certification est délivrée pour attester que le réservoir est apte à être utilisé en toute sécurité.

### **II.9. Conclusion :**

Les réservoirs sous pression sont des équipements essentiels dans de nombreux secteurs industriels pour le stockage sécurisé des liquides ou des gaz à haute pression. Leur fonctionnement repose sur le principe de l'augmentation de la pression interne lors des tests pour garantir la sécurité des opérateurs et de l'environnement en service. Il est important de noter que les étapes et les détails spécifiques de la réalisation d'un réservoir sous pression pour le GPL peuvent varier en fonction des réglementations locales et des normes applicables, ainsi que des exigences spécifiques du projet. Donc, il est essentiel de se conformer aux codes de sécurité et aux réglementations en vigueur.

# **Chapitre 3**

## **Méthodologies expérimentales**

# Chapitre 3

## Méthodologies expérimentales

### III.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail dont une partie a été réalisée au niveau de (EPE MAGI SPA), l'autre partie a été effectuée dans notre laboratoire LTSM Blida. En premier lieu nous exposons les deux techniques ainsi que les moyens utilisés dans la réalisation des soudures des récipients sous pression, à savoir par SMAW et par soudage hybride SMAW plus SAW. En deuxième lieu, les techniques et les moyens utilisés dans le contrôle des soudures sont décrites. Enfin, les différents instruments utilisés dans la préparation métallographique, la caractérisation métallurgique et la caractérisation mécanique sont exposés.

### III.2. Matériaux :

#### III.2.1 Métal de base :

Le métal de base utilisé dans ce travail est un acier nuance A516 GR70 conformément à la norme ASME. Cet acier largement employé dans la fabrication des récipients sous pression, comme détaillé au chapitre 1, se présente sous forme de tôles d'une épaisseur de 17mm (Figure 3.1). La composition chimique est présentée dans le tableau 3.1. [1]



Figure III.1. Métal de base

**Tableau III.1.** Composition chimique typique de ASTM A516 Grade 70 / ASME SA516 Grade 70.

Élément	Composition chimique
Carbone (C)	0,27 % - 0,31 %
Manganèse (Mn)	0,79 % - 1,30 %
Phosphore (P)	0,035 % maximum
Soufre (S)	0,035 % maximum
Silicium (Si)	0,15 % - 0,40 %
Aluminium (Al)	0,02 % - 0,08 %

### III.2.3. Métaux d'apport SMAW :

Dans ce travail deux techniques ont été utilisées pour réaliser nos soudures des récipients sous pression, à savoir par SMAW uniquement (première méthode) et par soudage hybride SMAW plus SAW (deuxième méthode). Ainsi, des métaux d'apport différents ont été utilisés. E6010, E7018 (SMAW) et le 2M12K (SAW).

#### III.2.3.1. Electrode de soudage E6010 :

L'électrode enrobée E6010 est une électrode de soudage très utilisée pour le soudage à l'arc électrique, notamment pour les applications exigeant une pénétration profonde. Il a été utilisé pour réaliser les passes de pénétration. La composition chimique est donnée dans le tableau 3.2.



Figure.III.2. Electrode enrobée E6010

**Tableau III.2.**Composition chimique de l'électrode de soudage 6010 :

Elément	Composition [% ]
Carbone (C)	0.08 -0.15
Manganèse (Mn)	0.30-0.60
Silicium(Si)	0.30-0.60
Soufre (S)	$\leq 0.035$
Phosphore (P)	$\leq 0.035$
Nickel (Ni)	$\leq 0.030$
Chrome (Cr)	$\leq 0.20$
Molybdène (Mo)	$\leq 0.30$
Vanadium(V)	$\leq 0.08$

#### III.2.3.2 L'électrode de soudage E7018 :

L'électrode E7018 est une électrode de soudage à enrobage basique fréquemment utilisée pour le soudage à l'arc SMAW. La E7018 est une électrode basique produisant des joints soudés sans fissures avec de bonnes propriétés de résilience même sur acier avec une teneur en carbone allant jusqu'à 0,4 %. [3]. La E7018 a été utilisé pour réaliser les passes de bourrage et de finition dans la première méthode et dans les passes de bourrage uniquement dans la deuxième méthode.



Figure.III.3. Electrode enrobée E 7018

**Tableau. III.3.** Composition chimique typique du métal d'apport électrode E7018.

Elément	Composition [%]
Carbone (C)	≤ 0,15 %
Manganèse (Mn)	0,90 % - 1,60 %
Silicium (Si)	0,75 %
Soufre (S)	≤ 0,035 %
Phosphore (P)	≤ 0,035 %
Chrome (Cr)	≤ 0,20
Nickel (Ni)	: ≤ 0,30 %
Molybdène (Mo)	: ≤ 0,30 %
Vanadium (V)	≤ 0,08 %

### III.2.3 Fil de soudage EM12K :

Le fil de soudage Fil de soudage AWS EM12K est un fil nu sous forme de bobine utilisé principalement dans le soudage à l'arc submergé (SAW). AWS EM12K est une sorte de fil de soudage en acier au manganèse-silicium. Résistant à la rouille, il a une excellente capacité de moulage et de détachage des scories. Le fil peut être appliqué avec une alimentation simple ou double AC / DC. AWS EM12K a été utilisé pour exécuter les passes de finition de SAW (2 méthode).



Figure.III.4. Fil de soudage EM12K

**Tableau. III.4** Composition chimique typique du métal d'apport AWS EM12K [72] :

Elément	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
Composition [%]	≤0.10	0.80~1.10	≤0.07	≤0.030	≤0.030	≤0.20	≤0.030	≤0.35

### III.2.4. Flux solide de Soudage SAW F7a5 :

Le flux de soudage désigné par "F7A5" est une classification des flux utilisés dans les procédés de soudage selon la norme AWS (American Welding Society). Il a été utilisé pour protéger le bain de fusion dans les passes de finition réalisés par soudage sous flux SAW (Submerged Arc Welding).



Figure. III.5. Particules de flux solide

Une composition chimique typique est présentée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau.III.5.** Composition chimique typique du flux solide F7a5 [ 5 ] :

Composition chimique	C	Mn	Si	Ni	Mo
Valeur type en %	0.05	1.3	0.2	0.9	0.5

Les propriétés mécaniques du métal de base, métaux d'apport et du flux sont résumé dans le tableau ci-dessous :

**Tableau.III.6.** Propriétés mécaniques métal de base, métaux d'apport et du flux [2,4]

Matériau	Résistance à la traction (Rm) MPa	Limite d'élasticité (Re) MPa	Allongement à la rupture A (%)	Résilience 0°C	Température d'essai C°
MB	485 – 620	➤ 335	21%	20 J	-20
E6010	420	330	22%	40 J	-30
E7018	570	490	30%	20 J	-20
EM12K	550	330	22%	27%	-40
Flux SAW F7a5	550 MPA	455 MPA	27 %	-	-

## III.3. Soudage

### III.3.1. Découpage et préparation des éprouvettes à souder

La première partie consiste à la préparation des tôles à assembler. Le découpage a été réalisé à partir du métal de base A516 grade 70 à froid par une scie mécanique pour obtenir des tôles de 300 x 300x17 mm<sup>3</sup> (Figure. 3.5). Quatre éprouvettes ont été préparées afin de réaliser les deux types de soudures.

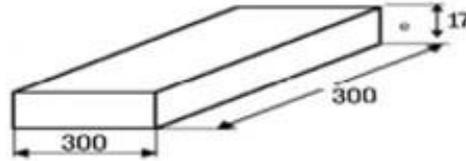


Figure. 3.5. Forme et dimensions des éprouvettes

### III.3.2. Préparation du joint à souder :

Pour avoir une soudure saine et de qualité, un chanfrein en V avec talon avec un angle de  $37^\circ$  a été usiné sur chaque bord du tube. Les paramètres du joint sont les suivants :



Joint désigné / Type de chanfrein : V  
 Angle /Angle :  $60$  à  $70^\circ$   
 Talon : 1,5 à 2 mm  
 Gap / Ecartement : 2 à 3 mm

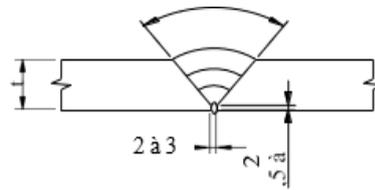


Figure. III.6. Préparation des bords avant soudage

Avant l'opération de soudage, les deux pièces à souder doivent ont été soigneusement nettoyé afin de se débarrasser de tout oxyde, rouille ou graisse. Une finition mécanique est faite par meulage.



Figure. III.7. Meulage du chanfrein des éprouvettes

Les dimensions de tôles préparées ont été vérifiées pour s'assurer qu'ils correspondent aux dimensions spécifiées, en tenant compte de l'épaisseur des tôles de 17 mm.

### III. 3.3. Fixation des tôles :

Avant de procéder au soudage, on réalise le pointage des tôles à assembler pour éviter d'éventuelles déformations dues au retrait :

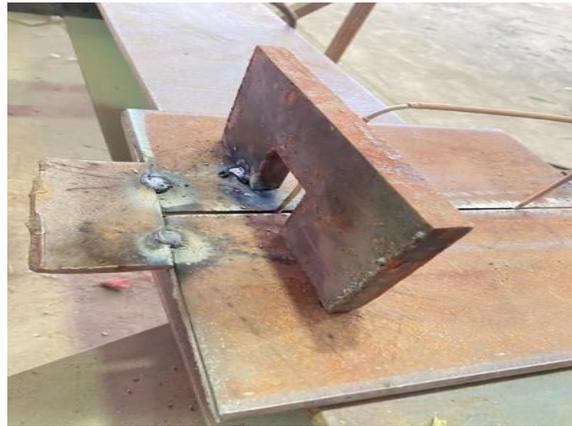


Figure. III.7. Fixation de l'éprouvette

### III.3.4. Exécution des joints soudés :

#### III.3.4.1. Soudage SMAW uniquement :

Afin d'assurer une bonne pénétration et une bonne ténacité, la première passe a été réalisée avec l'électrode enrobé E6010 de diamètre 2.5 mm et avec une polarité négative. Après l'exécution de cette passe le cordon a subi un bon nettoyage par une brosse métallique. Les autres passes ont été exécutées avec les mêmes conditions mais avec une polarité inversée (positive) afin de faciliter la fusion du métal d'apport. Le soudage a été exécuté selon les paramètres du tableau ci-dessous :

Tableau. III.7. Paramètres de soudage SMAW

Layer / passes	5RRW3pQ	Hot / Chaude	Fill / Bour	Cap / Finition
procédé de soudage	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW
position de soudage	1G	1G	1G	1G
courante & polarité	DC (-)	DC (+)	DC (+)	DC (+)
métal d'apport	E6010	E7018	E7018	E7018
Diamètre d'électrode	2,5 - 3,2	3,25 - 4	3,25 - 4	3.5-4
Gamme d'intensité (A)	75 - 90	90 - 140	90 - 140	400 - 500
Gamme de tension (V)	20 - 22	22 - 30	22 - 30	40 - 45

Le choix de la tension et de l'intensité du courant de soudage est suivant l'épaisseur de la pièce à souder. Il est à noter qu'un jeu de l'ordre de 1,5 à 2,5mm entre les deux tôles à assembler a été considéré. Ainsi, l'équipement de soudage a été configuré en fonction des paramètres recommandés pour l'électrode E6010 une passe de pénétration et pour l'électrode E7018 sept passe pour le bourrage est de finition

#### III.3.4.2. Soudage mixte SMAW plus SAW :

Pour la deuxième soudure, on garde les mêmes paramètres sauf la passe de finition qui est exécutée par le procédé SAW. L'équipement de soudage a été configuré en fonction des paramètres recommandés pour l'électrode 6010 une passe de pénétration , et l'électrode E7018 six passe de

bouillage et le fil EM12K une seule passe de finition (cap) .

**Tableau. III.8.** Paramètres de soudage SMAW plus SAW

Passes	5RRW3pQ	Hot / Chaude	Fill / Bour	Cap / Finition
Procédé de soudage	SMAW	SMAW	SMAW	SAW
Position de soudage	1G	1G	1G	1G
Courante & polarité	DC (-)	DC (+)	DC (+)	DC (+)
métal d'apport	E6010	E7018	E7018	EM12K
Diamètre d'électrode	2,5 - 3,2	3,25 - 4	3,25 - 4	
Diamètre de fil (mm)				3,2
Gamme d'intensité (A)	75 - 90	90 - 140	90 - 140	400 - 500
Gamme de tension (V)	20 - 22	22 - 30	22 - 30	40 - 45



Figure. III.8. Passe de pénétration (E6010)

Lors du soudage un refroidissement à l'air est assuré après la passe de pénétration et avant l'exécution de la deuxième passe. La température est contrôlée avec un thermomètre infrarouge, l'exécution de la deuxième passe est faite après que la température est inférieure à 200 C°.



Figure III.9. Thermomètre infrarouge

### III.3.5. Nettoyage de cordon de soudage :

Après chaque passe et après enlèvement du laitier, tout défaut apparent est enlevé par brossage et/ou meulage avant l'exécution de la passe suivante.



**Avant nettoyage de laitier**



**Après nettoyage laitier**

Figure III.10. Nettoyage entre passes



a) SMAW



b) SAW plus SAW

Figure III.11. Eprouvettes finis: a) SMAW      b) SMAW plus SAW

### III.3.6. Contrôle les tôles soudées [6]:

La détection des défauts de soudage et l'évaluation de leur gravité est indispensable. Les contrôles non destructifs « CND » sont utilisés à cette fin. Les CND contrôle visuel, contrôle par ressuage et contrôle par radiographie ont été afin d'examiner la qualité des soudures.

#### III.3.6.1. Contrôle visuel [6] :

Le type de joint et la manière de déposer le métal assureront une fusion complète avec continuer métallique avec le métal de base. Le joint soudé devra satisfaire à un examen visuel conforme aux exigences du cahier des charges, condition de contrôle visuel 500 lux mètre.

#### III.3.6.2. Contrôle par ressuage [6] :

Ci-après une description de différentes étapes utilisées lors du contrôle par ressuage :

##### a. Application du pénétrant [6] :

Le pénétrant a été est appliquée par pulvérisation. Le temps d'imprégnation minimum est de 5 minutes.



Figure III.12. Application du pénétrant

Suppression de l'excès du pénétrant :

- Après le temps d'imprégnation spécifié écoulé, l'excès de pénétrant restant sur la surface a été enlevé en utilisant un chiffon blanc propre sec non pelucheux et un papier absorbant.
- L'opération recommencée mais par un chiffon imbibé par du solvant avec une légère application afin de minimiser le retrait du pénétrant des discontinuités.

**b. Application du révélateur :**

Le révélateur est uniformément appliqué sur une surface de soudure par pulvérisation et à 25 cm de la surface examiner. Le temps de révélateur est de 10-15 minutes.



Figure III.13. Application du révélateur

**c. Nettoyage**

Après l'achèvement de l'opération, la soudure examinée a été bien nettoyée de tous résidus de produits du ressuage.

**III.3.6.3. Contrôle radiographique [6] :**

La radiographie a été utilisée pour inspecter les défauts internes des soudures tels que les porosités, les fissures ou les inclusions. Ci-dessous les paramètres utilisés.

**Tableau. III .9.** Paramètres de contrôle par radiographie

Technique	Paroi simple image
Code	API 1104
Source de rayonnement	rayon x 200kv
Numéro de série	MIRP 301 E 12941
Dsf (Distance sous film)	700 mm
Intensité	2 MA
Position IQI (indication qualité d'image)	coté source
Densité	2-4
Temps exposition :	5 min 12 sec
Instrument utilisé :	Densitomètre, Négatoscope

### **III.3.7. Préparation métallographiques :**

#### **III.3.7.1. Découpage des échantillons du métal de base est métaux d'apport :**

Des petits échantillons ont été découpés à partir du MB et métaux d'apport afin de les examiner par microscopie. Le découpage a été fait à l'aide d'une scie manuel à la main avec lubrification pour ne pas affecter la microstructure et les propriétés du matériau.



Figure III.14. Découpage par la scie manuel

#### **III.3.7.2. Découpage des échantillons soudés :**

Après le soudage et le contrôle non destructif deux échantillon de 5 cm de longueur est 2cm de largeur ont été découpés à partir des cordons de soudure pour examen métallographique et essai de micro-dureté. Cette découpe a été effectuée en veillant à prélever les trois zones du joint soudé le métal de base, la zone fondue ainsi que la zone affectée par la chaleur. Pour éviter d'affecter les échantillons avec une température élevée, une scie mécanique a été utilisée plutôt que d'autres procédés de coupe.



Figure III.15. Echantillon soudé après découpage

### III.3.7.3. Enrobage :

Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation des échantillons et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. Pour enrober nos échantillons on a utilisé une enrobeuse à chaud pour le métal de base est métaux d'apport. Pour les échantillons soudés, du aux contraintes de dimensions nous avons opté pour l'enrobage à froid.



Figure III.16. Machine d'enrobage à chaud



Métal de base enrobé



Métaux d'apporte enrobés

Figure III.17. Echantillons enrobés à chaud



Figure III.18. Echantillon soudé en coupe transversale enrobé froid

#### III.3.7.4. Polissage :

Après l'enrobage, les échantillons ont subi un polissage mécanique comportant trois stades afin d'éliminer les défauts de surface d'avoir un état miroir.

Le polissage a été effectué à l'aide d'une polisseuse sur des disques abrasifs avec de l'eau courant comme un lubrifiant. En commençant par le papier abrasifs numéro 80 passent par p180, p280, p400, p600 p800, p1200. La vitesse de rotation du disque est comprise entre 150 et 300 tours/minutes environ. Les échantillons ont subi une rotation à 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La figure 3.19 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire de SDM.

Après, un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine  $Al_2O_3$  ayant une granulométrie de  $0.3\mu m$ , en suspension sur un tissu en soie a été utilisé. Après polissage de finition, les échantillons ont subis un rinçage à l'eau et séchage à l'air.



Figure III.19. Polisseuse



Figure III.20. Échantillon soudé après polissage

### III.3.7.5. Attaque chimique:

Après polissage, les échantillons ont été soumis à une attaque chimique avec du Nital, un réactif fréquemment utilisé pour révéler les caractéristiques microstructurales des aciers. Cette attaque chimique permet une visualisation plus claire des grains, des phases et des éventuels défauts présents dans la zone soudée.



Figure III.21. Préparation du Nital à partir d'acide nitrique et l'éthanol

### III.3.7.6. Examen micrographique :

La micrographie optique est un examen d'observation réalisé par un microscope optique permettant de révéler la microstructure métallographique de l'échantillon examiné. Nous avons effectuée des observations microscopiques en utilisant un microscope optique disponible au laboratoire LTSM de notre département mécanique. Ce qui nous a permis de capturer et de transférer les images directement vers un ordinateur.



Figure III.22. Microscope optique utilisé

### III.3.7.7. Essai de micro-dureté Vickers :

L'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur sous une charge d'appui  $F$  donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions de l'empreinte du pénétrateur laissée sur la surface du matériau contrôlé. Les essais sont effectués au sein de laboratoire de génie mécanique Blida avec un microduromètre composé d'un appareil de mesure de dureté et un microscope, la micro-dureté est mesurée au niveau des différentes passes sous une charge de 200

g. La valeur de la dureté est directement affichée sur un écran le modèle INNOVATEST FLACON 400.



Figure III.23. D'uromètre INNOVATEST FLACON 400.

# **Chapitre 4**

## **Résultats des discussions**

# Chapitre 4

## Résultats des discussions

### IV.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux résultats obtenus dans le cadre de notre étude avec discussion et interprétation. Les résultats portent sur les contrôles non destructifs des joints soudés, l'observation macrographique, l'étude microstructurale et les tests de microdureté.

### IV.2. Contrôles non destructifs :

Dans cette section, nous présentons les résultats des trois contrôles non destructifs (CND) effectués. Contrôle visuel, ressuage et radiographie. Ces tests visent à évaluer l'intégrité et la qualité des matériaux sans les endommager, en identifiant les éventuels défauts ou anomalies.

#### IV.2.1. Observation Contrôle visuel :

Les résultats du contrôle visuel effectué sur les joints soudés sont présentés ci-dessous. L'inspection visuelle a permis de vérifier la qualité et l'intégrité des soudures selon la norme vigueur API-1104.



Cordon de soudure SMAW



Cordon de soudure (SMAW+SAW)

Figure IV.1. Contrôle visuel des joints soudés

Les résultats du contrôle visuel des joints soudés indiquent un cordon de soudure homogène conforme aux normes API-1104. Une bonne continuité métallique avec le métal de base a été observée dans les deux échantillons, avec une absence totale de défauts tels que le manque de pénétration ou les caniveaux. La visibilité des passes attribuée à l'effet de rotation de l'électrode de soudage, témoignant d'une technique de soudage appropriée et d'un soudeur qualifié. Bien qu'une légère différence d'épaisseur ait été constatée, elle reste dans les tolérances acceptables pour ces opérations.

#### IV.2.2. Contrôle par ressuage :

Comme illustré dans les figures ci-dessus, le contrôle par ressuage des joints soudés indique l'absence de défauts superficiels tels que les fissures, les caniveaux, les cratères, les pores ouverts, ou d'autres discontinuités superficielle, confirmant que les cordons de soudure sont sains et qualifiés selon les normes API-1104 pour les deux éprouvettes soudés.



Cordon de soudure SMAW

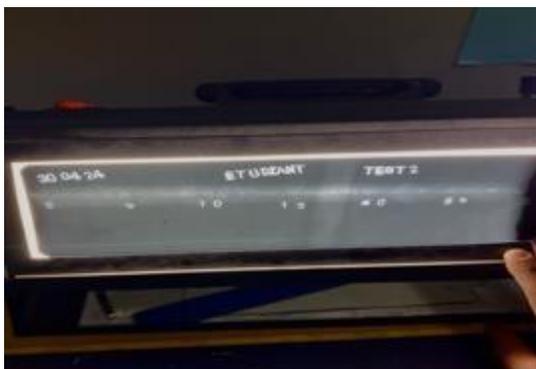


Cordon de soudure (SMAW+SAW)

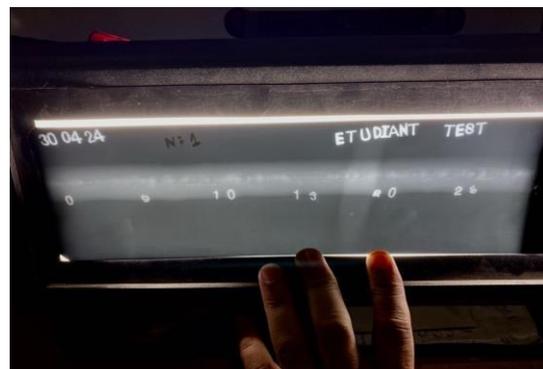
Figure IV.2 : Photos après contrôle par ressuage

#### IV.2.3 Radiographie :

Comme illustré dans les figures ci-dessus, le contrôle par radiographie des joints soudés indique l'absence de défauts internes significatifs tels que les manques de fusion, et de pénétration, les inclusions, les pores, les fissures ou autres anomalies sur les clichés des deux éprouvettes soudés, conformément aux exigences rigoureuses de la norme API 1104. Ces résultats ont permis de confirmer la bonne qualité des soudures exécutés.



Cordon de soudure SMAW



Cordon de soudure (SMAW+SAW)

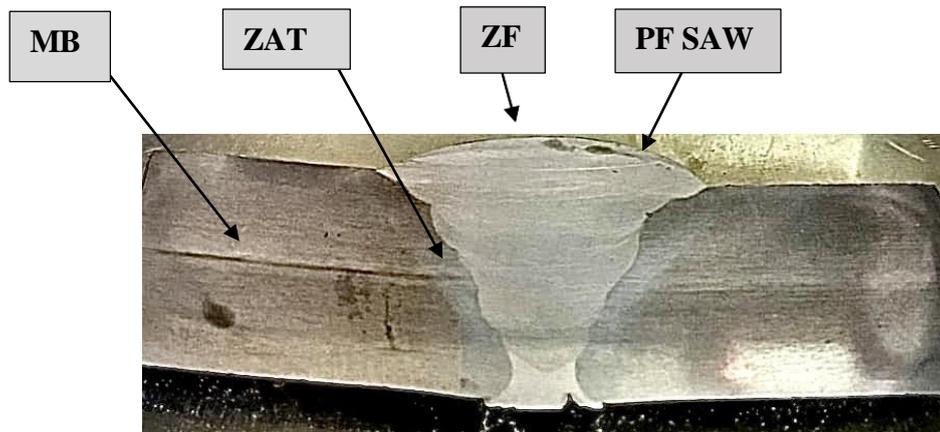
Figure IV.3. Clichés du contrôle par radiographie

Les résultats obtenus par radiographie soutiennent et complètent les résultats du contrôle visuel et par ressuage, renforçant ainsi la confiance dans l'intégrité structurelle et la fiabilité des joints soudés

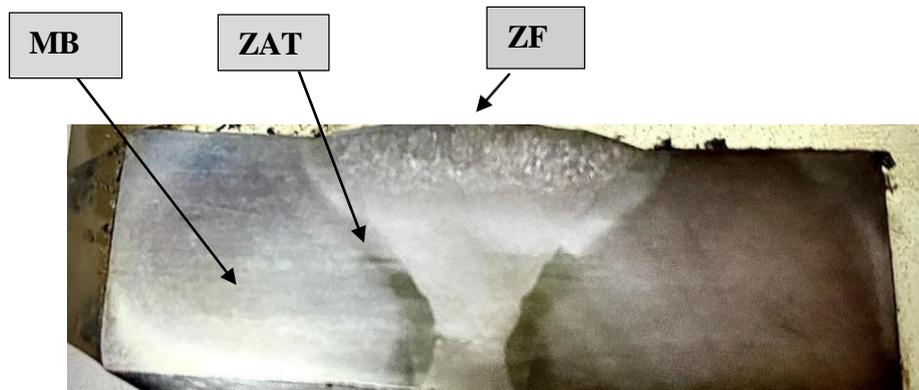
exécutés dans la réalisation des récipients sous pression GPL.

### IV.3 Observations macrographiques :

D'après l'examen macrographique du joint soudé sur une coupe transversale, les macrographies des échantillons soudés révèlent clairement trois zones distinctes. La première zone correspond au métal de base (MB), la deuxième zone notée ZAT représente la zone affectée thermiquement formée suite aux transformations structurales dues aux températures élevées atteintes lors du processus de soudage. La troisième zone notée ZF correspond à la zone fondue obtenue par la fusion du métal d'apport avec dilution d'une partie du métal de base.



Joint soudé par SMAW+SAW



Joint soudé par SMAW

Figure IV.3. Macrographie illustrant les différentes zones des joints soudés.

D'autre part on peut on peut noter que :

- Transversalement, les trois zones relatives aux passe de pénétration, passes de bourrage et de finition sont visibles et bien distinctes.
- Une bonne pénétration est obtenue et la continuité entre les passes est parfaite.
- La zone affectée thermiquement (ZAT) est presque régulière dans les différentes passes mais plus large dans le procédé SMAW+SAW.
- La dilution du métal de base est très suffisante, aucun défaut de collage ou de manque de

fusion n'a été décelé.

- Un petit défaut est visible à la racine du joint soudé par SMAW+SAW

#### IV.4. Observations microscopiques :

##### IV.4.1. Microstructure du métal de base :

L'observation au microscope optique du métal de base révèle une structure ferrito-perlitique. La microstructure est constituée principalement de bandes alternées de ferrite et de perlite, avec un taux de ferrite relativement plus élevé ce qui offre un équilibre entre la ductilité et résistance mécanique. Cette microstructure est une caractéristique du procédé de laminage utilisé dans la fabrication des tôles.

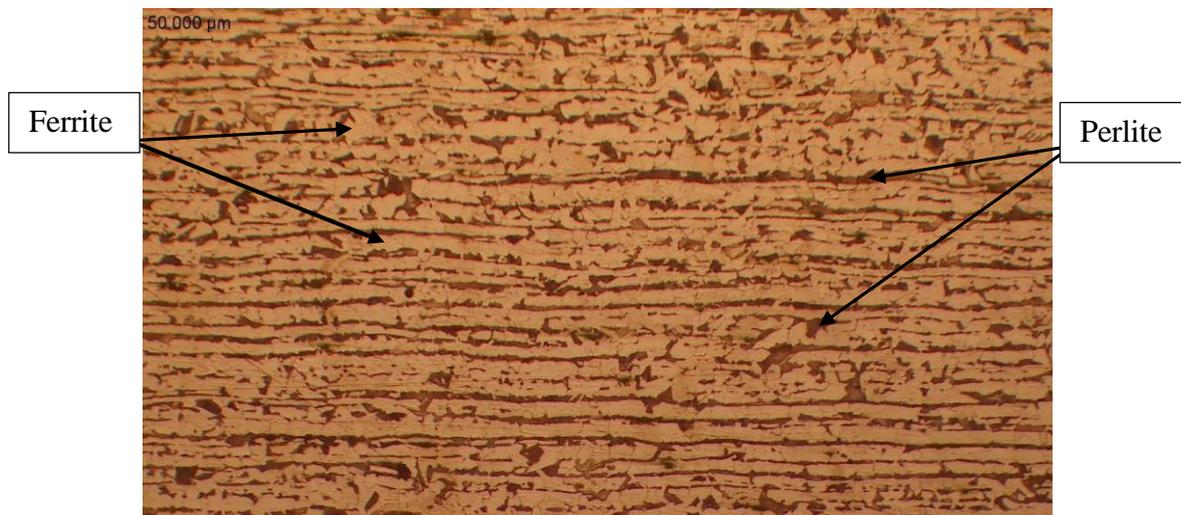


Figure IV.4. Micrographie optique du métal de base A516 GR 70

##### IV.4.2. Microstructure des joints soudés :

En analysant les microstructures (Figure IV.5-IV.6) prises dans les différentes zones observées dans la macrographie des deux joints soudés (MB, ZAT et ZF), on constate un changement continu de la microstructure allant du métal de base vers la zone fondue. Dans la zone affectée thermiquement (ZAT), la microstructure est plus fine, ce qui est dû principalement aux transformations de phase induites par les différents cycles thermiques du processus de soudage multipasses. De plus, les différentes zones de passes de soudage : pénétration, bourrage et finition révèlent une différence de taille et de morphologie des grains. Cette différence peut être attribuée au métal d'apport différent et aux cycles thermiques de soudage. Cette différence est remarquable dans les zones de finition. La passe de finition présente une structure dendritique brute de solidification, alors que les autres passes ont subi un traitement de revenu suite à l'échauffement dû aux passes subséquentes, donnant des grains plus ou moins homogénéisés qui s'affinent en allant vers l'intérieur (vers la pénétration). Ces variations de taille des grains dans les différentes zones de soudage sont importantes à considérer, car elles peuvent influencer les propriétés mécaniques et la résistance de la soudure.

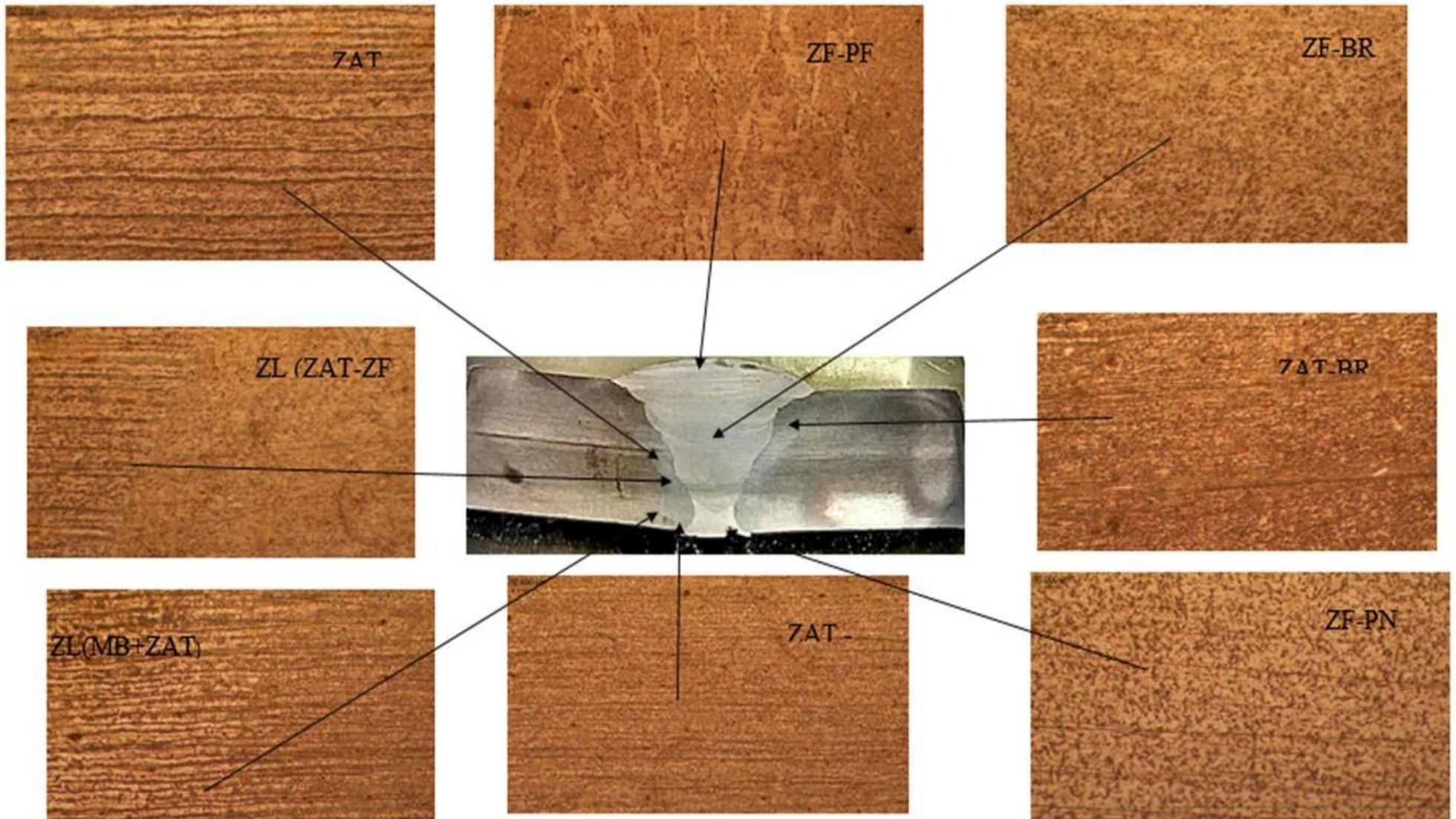


Figure IV.5. Micrographie optique de joint soudé par SMAW +SAW

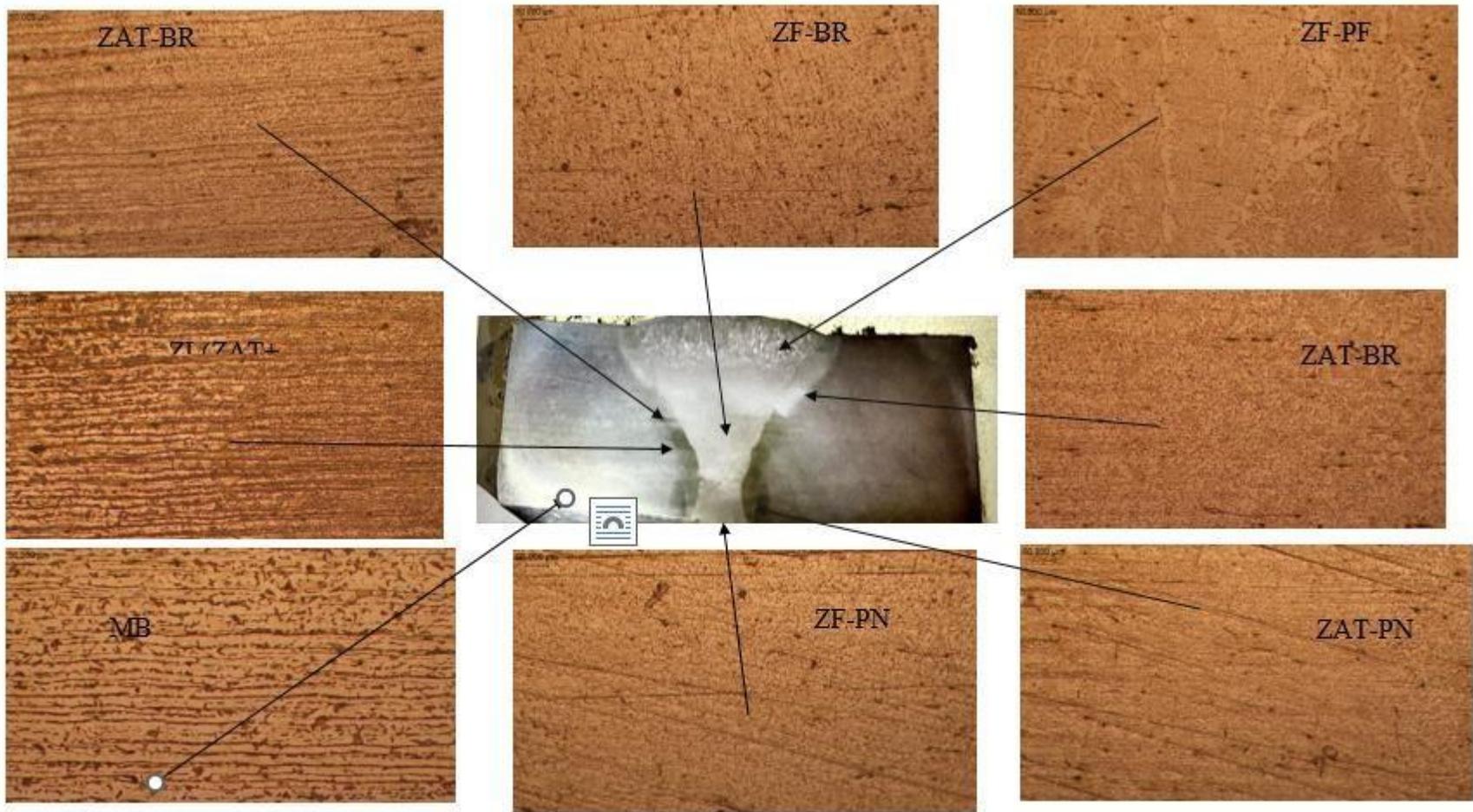


Figure IV.6. Micrographie optique du joint soudé par SMAW

Des détails de la microstructure sont illustrés sur les figures Figure IV.7.-VI.10.



Figure IV.7. Micrographie optique de zone de liaison ZL (ZAT+MB)

En se déplaçant du MB vers la zone affecté thermiquement on observe une bonne continuité métallique la taille des grains deviens très fine.

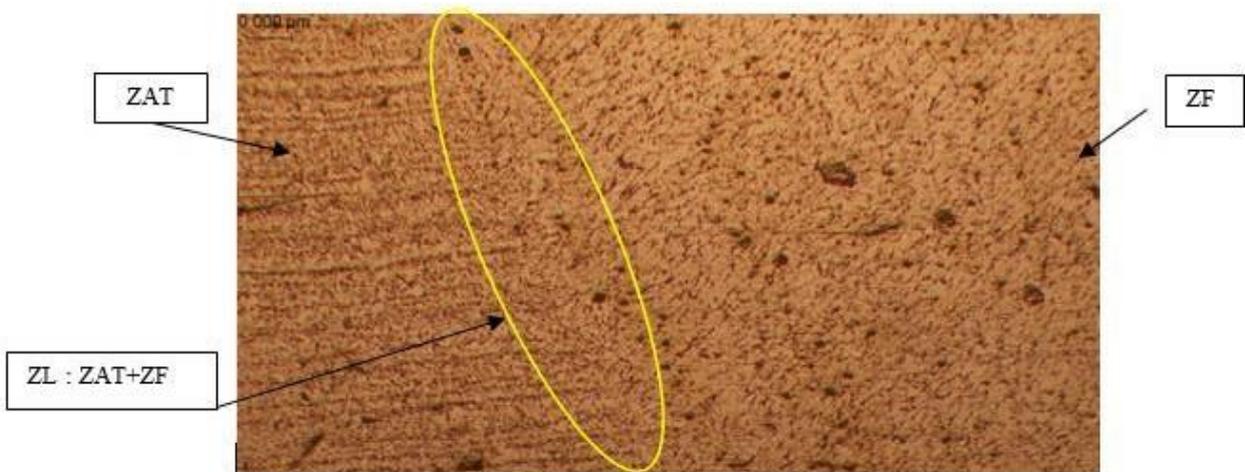


Figure IV.8. Micrographie optique de zone de liaison ZL (ZAT+ZF)

En se déplaçant vers la zone fondue les grains deviennent relativement plus gros que celle de la zone affectée thermiquement. Les points noirs peuvent être des défauts de microporosités, mais du à leurs faible taille ils n'ont pas été détectés par radiographie.

Par ailleurs, l'observation de la microstructure de la zone de finition (Figure IV.9-10) révèle des dendrites allongées et orientées vers l'extérieur, indiquant une solidification dirigée vers l'extérieur selon le sens de transfert de chaleur. Entre ces bandes dendritiques, on note des grains de ferrite aciculaire très fins se sont formés, résultant d'un refroidissement rapide. Cette microstructure contribue à améliorer les propriétés mécaniques de la soudure, telles que la résistance et la ténacité.

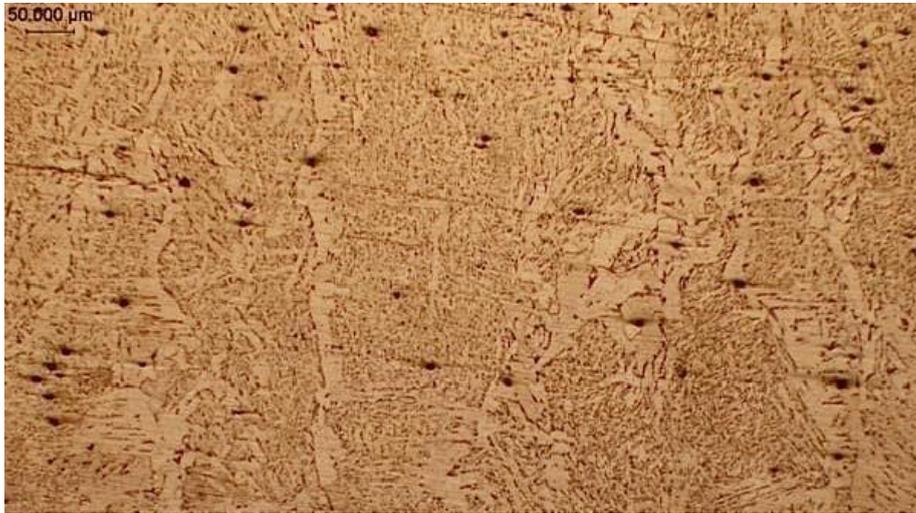


Figure IV.9. Micrographie optique de la passe de finition de la Z.F (SMAW)



Figure.IV.10. Micrographie optique de la passe de finition de la ZF (SMAW+SAW)

#### IV.5. Microdureté :

Les résultats des tests de microdureté des deux joints soudés, effectués au niveau des trois zones : pénétration, bourrage et finition (Figure IV.11), sont illustrés dans les Figures IV.12 et IV.13.

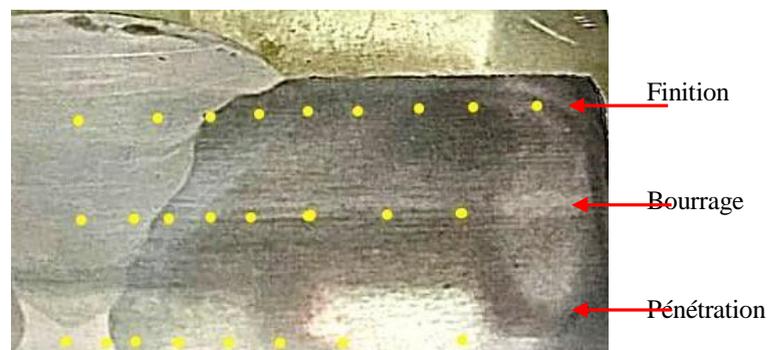


Figure IV.11. Filiations de profil de microdureté Hv 0.2

D'après la courbe des filiations du joint soudé réalisé par SMAW, on constate que la microdureté ou niveau de la pénétration et supérieure à celle de bourrage. Cela peut être dû à la microstructure la plus fine produite par l'électrode E6010. En revanche, les passes de bourrage réalisés par E7018 subissent des traitements thermiques successifs adoucissant la microstructure et grossissent la taille de grain, ce qui se traduit par une dureté plus au moins faible. La dureté élevée dans la passe de finition est due à la formation de structures dendritiques lors de la solidification rapide. Dans la zone affectée thermiquement (ZAT) la taille très fine des grains justifie la dureté la plus élevée.

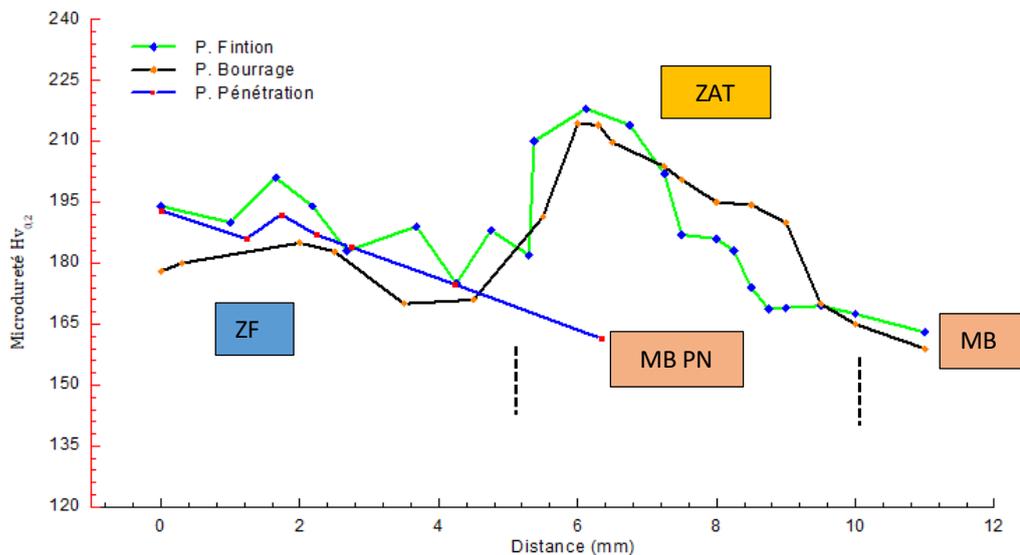


Figure IV. 12. Profile de dureté échantillon de SMAW

La dureté dans le procédé automatique à l'arc submergé (SMAW+SAW) suit généralement une tendance similaire à celle observée dans le soudage à l'arc manuel avec électrode enrobée (SMAW). Ainsi, la même interprétation peut être faite.

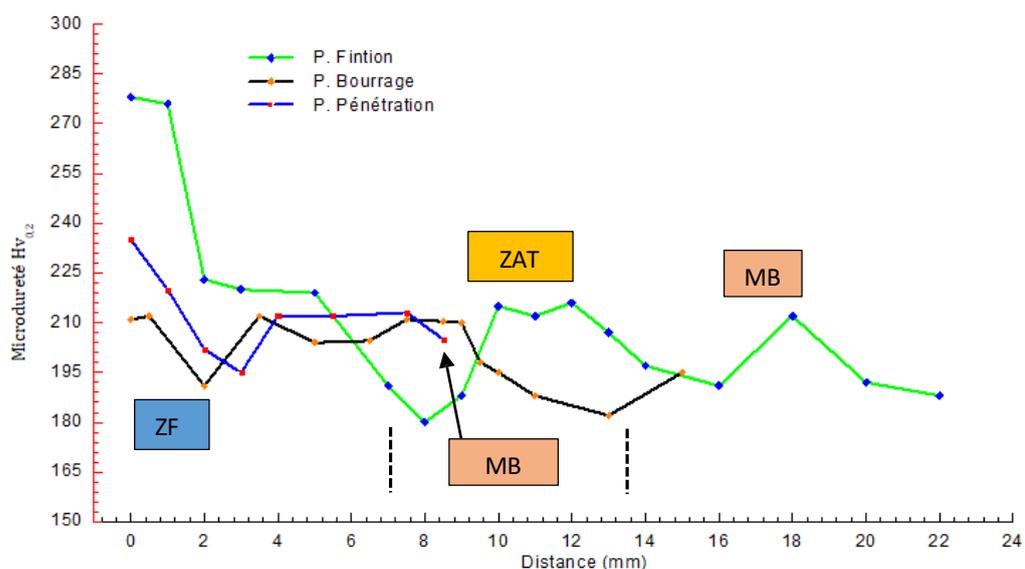


Figure IV. 13. Profile de dureté échantillon de SMAW

En faisant une comparaison entre le SMAW et le SMAW+ SAW et d'après la figure ci-dessous, il est clair que la dureté de la ZF du SAW est plus élevée que celle du SMAW dans la passe de finition ainsi que dans le bourrage. On pense que cela est dû principalement à la composition et les propriétés du métal d'apport du SAW fil électrode (AWS EM12K). Pour la ZAT qui plus large que dans le SMAW. Cela peut être dû à la nature de flux de protection utilisé dans le SAW qui maintient des températures élevées dans la ZAT plus longtemps.

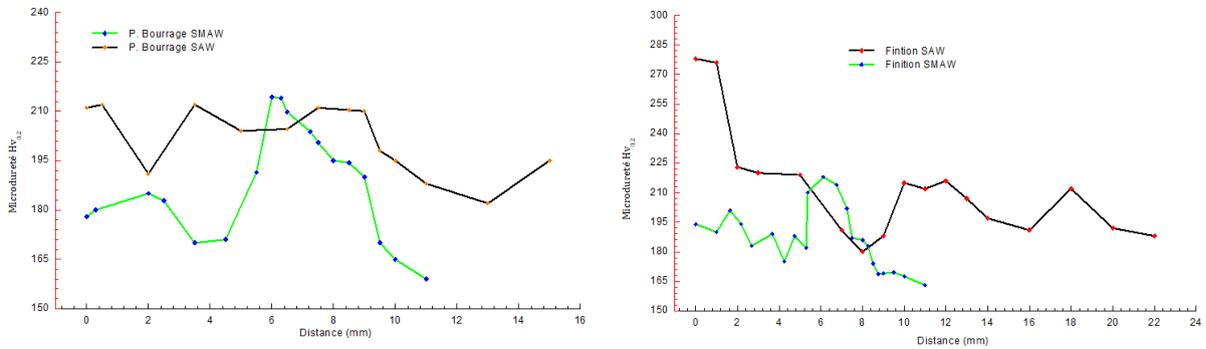


Figure IV. 14. Comparaison des profils de microdureté SMAW vs (SMAW+SAW)

En conclusion, La caractérisation des joints soudés de l'acier A516 GR70 ont permis une évaluation détaillée de leur qualité. Le contrôle visuel et par ressage n'a révélé aucun défaut superficiel, tandis que l'analyse radiographique n'a détecté aucun défaut interne. Les observations macro et microstructurales ont mis en évidence les différentes zones soudées et les variations de microstructure, avec des structures dendritiques dans les passes de finition. Les tests de microdureté ont montré des variations significatives entre les passes, influencées par les cycles thermiques et les électrodes utilisées.

## Conclusion générale

Cette étude vise à caractériser et à qualifier les joints soudés des récipients sous pression, une étape cruciale pour assurer leur intégrité en service et éviter toute rupture catastrophique. Dans cette étude une comparaison est faite entre deux méthodes de soudage, le SMAW et une combinaison de SMAW et SAW, afin de déterminer la méthode la plus efficace pour assurer la qualité des soudures. Après choix des matériaux appropriés et calcul d'épaisseur nécessaire, nous avons procédé à la réalisation des joints soudés en utilisant des paramètres de soudage appropriés.

L'analyse des résultats obtenus à travers les différents tests de contrôle et d'observation sur les joints soudés a permis de confirmer l'importance de chaque étape du processus de soudage. Le contrôle visuel a révélé une bonne continuité et homogénéité des soudures, sans défauts apparents, tandis que le test de ressuage a montré l'absence de défauts surfaciques majeurs, assurant ainsi l'intégrité des cordons de soudure selon les normes API-1104. La radiographie a confirmé l'absence de défauts internes, tels que les fissures et les inclusions, soulignant la qualité du travail effectué.

Les observations macro et microstructurales ont révélé des distinctions importantes entre les différentes zones de soudure, notamment la zone fondue, la zone affectée thermiquement et le métal de base. L'utilisation de différentes électrodes a également montré des impacts distincts sur la microstructure et les propriétés mécaniques des soudures. En particulier, la méthode SAW a montré une dureté plus élevée par rapport au SMAW.

La comparaison entre le SMAW et la combinaison SMAW+SAW démontre que la méthode combinée peut offrir des avantages significatifs en termes de stabilité thermique et de propriétés mécaniques.

Les résultats obtenus confirment la qualité du joint soudé, mettant en évidence le bon choix des paramètres de soudage et des métaux d'apports utilisés. Ces conclusions soulignent l'importance de l'application de bonnes pratiques de soudage pour garantir la fiabilité et la sécurité des récipients cuve sous pression.

Enfin, cette étude met en lumière la nécessité d'un contrôle strict des conditions de soudage, ces mesures sont essentielles pour garantir la qualité et la durabilité des soudures dans des applications critiques.

# Référence chapitre 1

- [1] <https://www.rocdacier.com/tout-le-soudage/>
- [2] FERKIOUT YACINE et ALLAG DHIRAR «Etude et conception d'un réservoir à toit fixe d'une capacité 50000 m<sup>3</sup> y compris raccords » PFE ing. Université Boumerdes 2020.
- [3] Mémoire de master En vue de l'obtention du diplôme de Master Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Mécanique Université Badji Mokhtare Annaba / Option : construction mécanique (THEME : Contrôle Non Destructif des joints de soudure) Promotion :2018/2019
- [4] <https://www.mabeo-industries.com/>
- [5] Wikipédia

www.promeca .com

## Références:

- [6]
- [7] fr.scribd.com
- [8] fr.leigongatiwear.com
- [9] [www.arccaptain.com](http://www.arccaptain.com)
- [10] [www.cofrend](http://www.cofrend)
- [11] <https://fr.soudage.COM>
- [12] [www.cofrend.com](http://www.cofrend.com)
- [13] www .laboratuar.com

# Référence chapitre 2

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_vessel](https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_vessel)
- [2] [www.studysmarter.fr](http://www.studysmarter.fr)
- [3] [https://www.heh.pt/fr/ervloire\\_aerien\\_jaune](https://www.heh.pt/fr/ervloire_aerien_jaune)
- [4] <https://umvie.com/tout-savoir-sur-le-reservoir-sous-pression-fonctionnement-et-utilite>
- [5] Gaz de pétrole liquéfiés, site web [www.naftal.dz](http://www.naftal.dz), (Mar 2010). Comité français du butane et du propane, le gaz butane propane, site web [www.cfbp.fr](http://www.cfbp.fr) (mai 2010).
- [6] PVI-STUDY-NOTES-ENGLISH-TRIAL
- [7] University Badji Mokhtar Annaba
- [8] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4787>
- [9] <https://www.ssab.com/en-us/brands-and-products/commercial-steel/pressure-vessel/astm-a516/grade-70>
- [10] [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org)
- [11] EPE MAGI Spa manufacture d'activités générales industrielles
- [12] Midoune raid, 2020, « évaluation des risques lie au stockage de gpl », Thèse de master. Université akli mohand oulhadj bouira.
- [13] <https://www.dvai.fr/blog/quelles-sont-les-techniques-de-formage-dun-fond-bombe/>
- [14] <https://www.rocdacier.com/cours-sur-le-roulage-mise-a-jour-2020/>
- [15] <https://apragaz.com/fr/entreprises-industries/controles-non-destructifs/visuel>
- [16] <https://www.techniques-ingenieur.fr/>
- [17] <https://vesscoengineering.co.uk/how-to-prevent-corrosion-erosion-in-industrial-pressure-vessels/>
- [18] [https://thi-revetement.com/thi\\_references/sablage-et-peinture-des-spheres-de-stockage-gaz-a-lusine-gpl-lpg-gabes-steg/](https://thi-revetement.com/thi_references/sablage-et-peinture-des-spheres-de-stockage-gaz-a-lusine-gpl-lpg-gabes-steg/)
- [19] 13 Different Types of Flanges and Their Applications [PDF] ([theengineerspost.com](http://theengineerspost.com))
- [20] <https://ealico.com/fr-fr/fiches-reglementaires/equipements-sous-pression/>

# Référence chapitre 3

[1] : [www.casider.fr](http://www.casider.fr)

[2] <https://www.sidastico.com/fr/prodotto/asme-sa516-gr-70/>

[4] [https://www.xiangind.com/aws\\_em12k\\_french](https://www.xiangind.com/aws_em12k_french)

[5] [https://www.xiangind.com/aws\\_em12k\\_french](https://www.xiangind.com/aws_em12k_french)

[6] Mémoire theme : contrôle non destructif /univercité ohmed doraya-adrar-

