

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

**Master**

**En Génie Mécanique**

**Option : Génie des Matériaux**

Présenté par :

**SACI CHARIF**

**Thème**

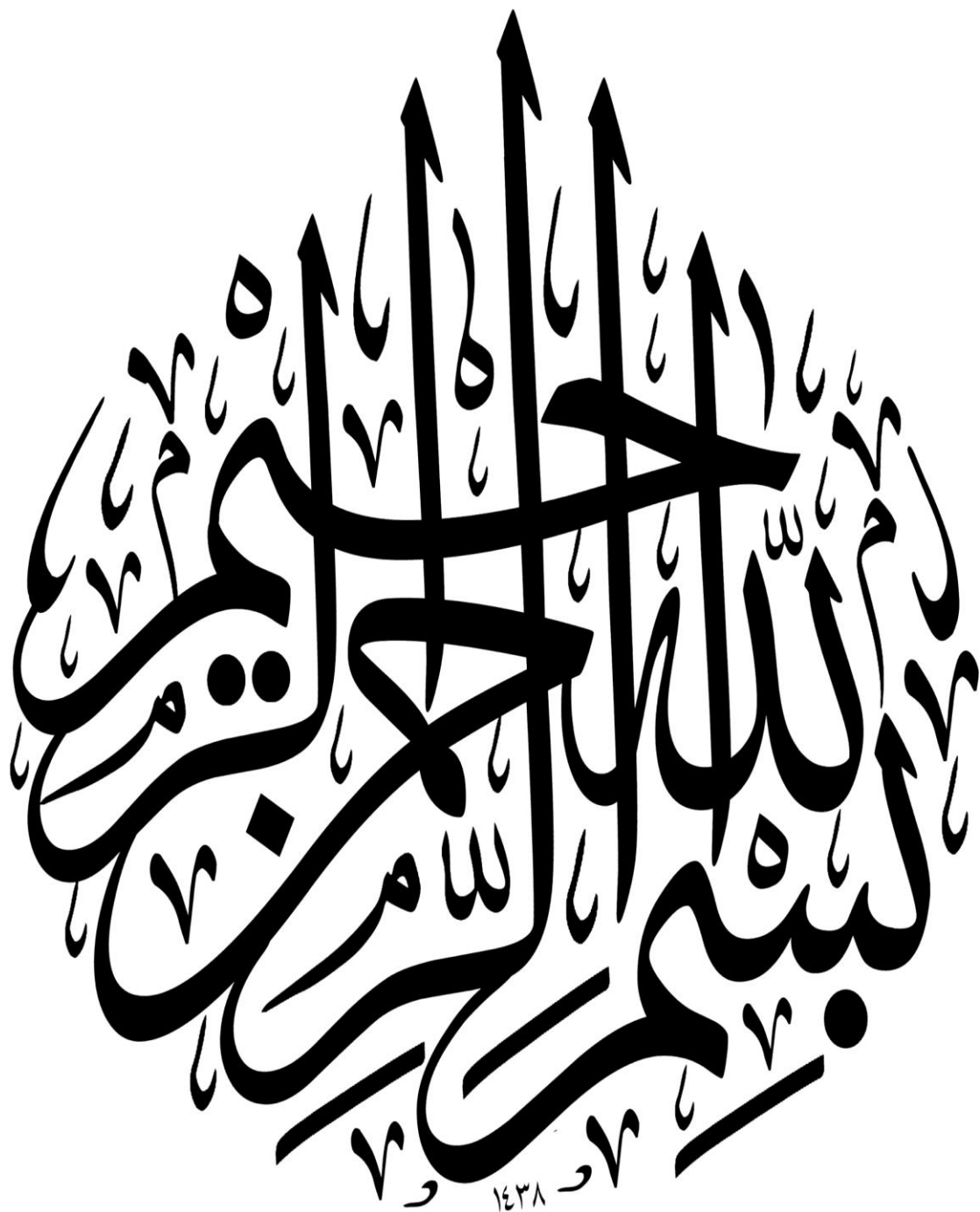
***INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA  
MICROSTRUCTURE DE LA SOUDURE D'ACIER INOXYDABLE***

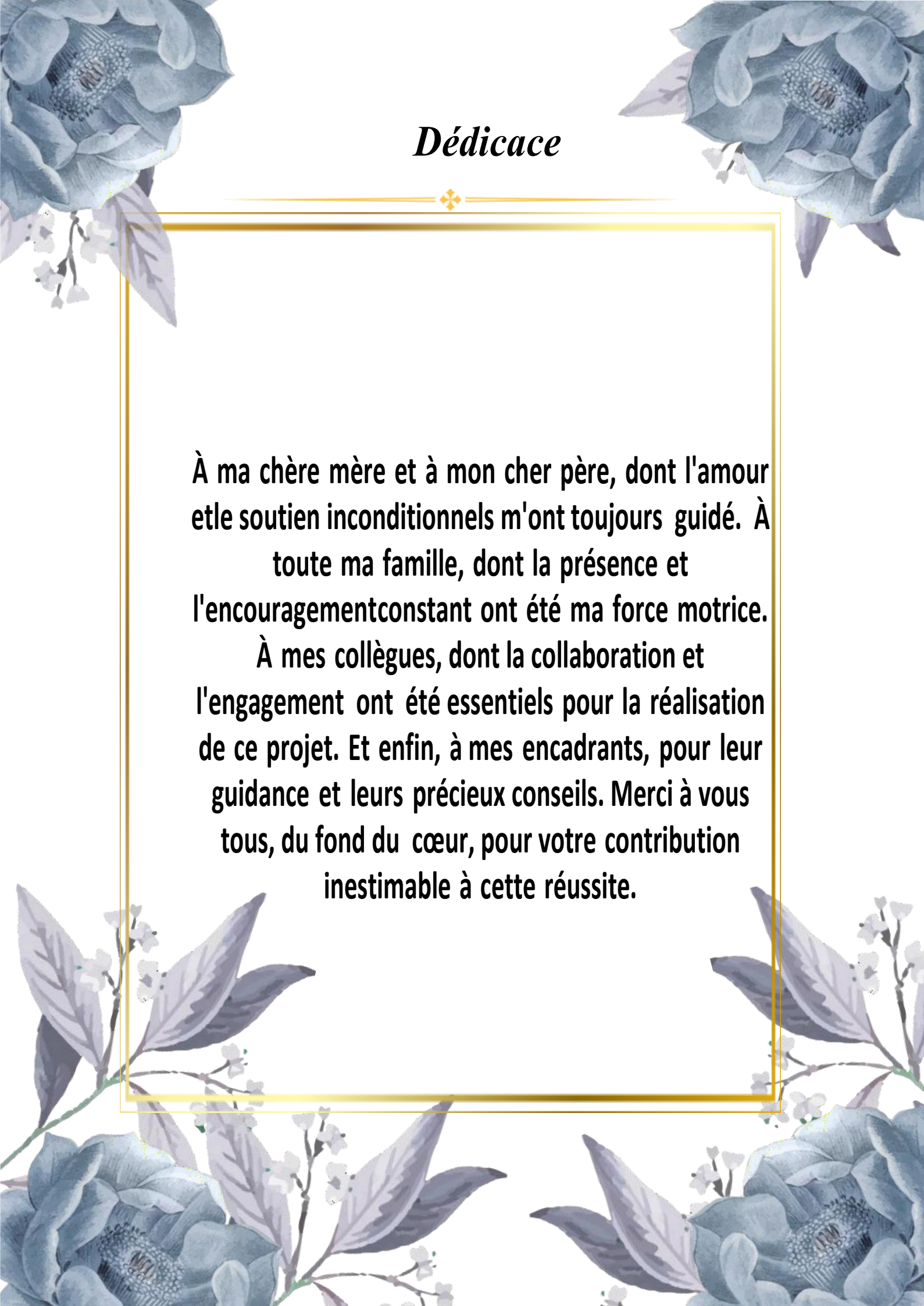
Devant le jury composé de :

| NOM et Prénom    | Grade | Qualité   |
|------------------|-------|-----------|
| Dr LATRACHE      | Pr    | Président |
| Dr. ZAOUI Moussa | MCA   | Encadreur |
| Dr Bechane lila  | MCA   | Examineur |

Année Universitaire : 2025/ 2026

N° d'ordre : GM/...../2026

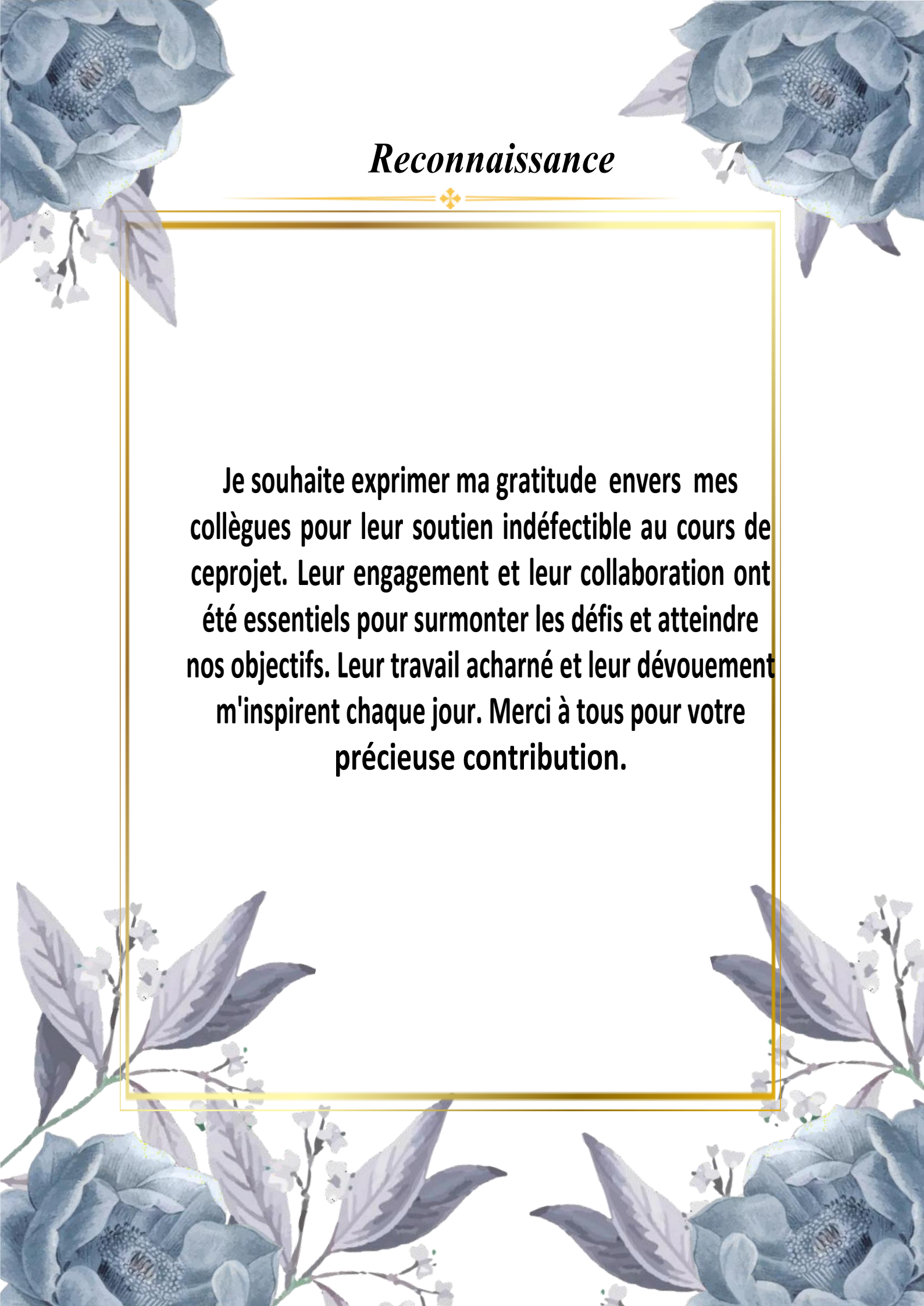




## *Dédicace*



À ma chère mère et à mon cher père, dont l'amour et le soutien inconditionnels m'ont toujours guidé. À toute ma famille, dont la présence et l'encouragement constant ont été ma force motrice. À mes collègues, dont la collaboration et l'engagement ont été essentiels pour la réalisation de ce projet. Et enfin, à mes encadrants, pour leur guidance et leurs précieux conseils. Merci à vous tous, du fond du cœur, pour votre contribution inestimable à cette réussite.



## *Reconnaissance*

**Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes collègues pour leur soutien indéfectible au cours de ce projet. Leur engagement et leur collaboration ont été essentiels pour surmonter les défis et atteindre nos objectifs. Leur travail acharné et leur dévouement m'inspirent chaque jour. Merci à tous pour votre précieuse contribution.**

## Résume

تدرس هذه المذكرة تأثير المعالجة الحرارية بعد اللحام على البنية المجهرية لوصلات الفولاذ المقاوم للصدأ 316L.

تم إنجاز اللحام باستعمال طريقتي TIG و ARC . ثم أُجريت اختبارات غير إتلافية مثل FPI والرسوم الشعاعية والاختبار بالموجات فوق الصوتية. بعد ذلك تم تحليل العينات بالمجهر الضوئي قبل وبعد المعالجة الحرارية. أظهرت النتائج أن المعالجة الحرارية حسّنت التجانس البنيوي للوصلات الملحومة.

Ce mémoire étudie l'influence du traitement thermique post-soudage sur la microstructure des soudures en acier inoxydable 316L. Les assemblages ont été réalisés par soudage TIG et ARC. Des contrôles non destructifs comme le FPI, la radiographie et les ultrasons ont été effectués. Les échantillons ont ensuite été observés au microscope optique avant et après traitement thermique. Les résultats montrent une amélioration de l'homogénéité microstructurale après traitement thermique.

This thesis studies the effect of post-weld heat treatment on the microstructure of 316L stainless steel welds. The joints were produced using TIG and ARC welding processes. non-destructive tests such as FPI, radiography, and ultrasonic testing were carried out. The samples were then examined by optical microscopy before and after heat treatment. The results show improved microstructural homogeneity after heat treatment.



# LATABLE DE MATIERE

# Sommaire

| <u>Contenue</u>                                                              | <u>page</u> |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Dédicace                                                                     | /           |
| Reconnaissance                                                               | /           |
| Résumé                                                                       | /           |
| Introduction générale                                                        | 01          |
| <b>Chapitre I Classification des procédés de soudage</b>                     |             |
| Introduction                                                                 | 05          |
| Définitions de base                                                          | 05          |
| Histoire de Soudage                                                          | 05          |
| Procédés de soudage                                                          | 06          |
| Soudage à l'arc                                                              | 06          |
| Le Soudage par point (RSW)                                                   | 12          |
| Soudage oxygaz                                                               | 14          |
| Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.                      | 17          |
| Tableau Récapitulatif des procédés de soudage                                | 18          |
| <b>Chapitre II Les défauts de soudure</b>                                    |             |
| Introduction                                                                 | 20          |
| Définition                                                                   | 20          |
| Qualités et défauts d'un cordon de soudure :                                 | 21          |
| Facteurs de défaillance des assemblages soudés :                             | 21          |
| Les principaux défauts de soudures                                           | 22          |
| Tableau. II.1 : Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention [13]. | 27          |
| Fissurations :                                                               | 28          |
| .Orientation des fissures :                                                  | 28          |
| Types des fissures :                                                         | 30          |
| Conclusion                                                                   | 40          |
| <b>Chapitre III Traitement Thermique des Soudures</b>                        |             |
| Traitement Thermique des Soudures                                            | 42          |
| Traitement Thermique De Relaxation (recuit)                                  | 39          |
| Définition                                                                   | 39          |
| Différents types de recuit                                                   | 44          |
| Traitement Thermique Revenu                                                  | 46          |
| Définition                                                                   | 46          |
| Types de Revenu                                                              | 47          |
| Conclusion                                                                   | 49          |
| <b>Chapitre IV Méthode d'inspections et de control de soudure</b>            |             |
| Examen visuel (VT)                                                           | 51          |
| Introduction                                                                 | 51          |

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>Contrôle par ressuage (PT)</b>             | <b>53</b> |
| <b>Contrôle pas magnétoscopie (MT)</b>        | <b>57</b> |
| <b>Contrôle par radiographie (RT)</b>         | <b>62</b> |
| <b>Contrôle par Ultrasons (UT)</b>            | <b>72</b> |
| <b>Le contrôle par courants Foucault (ET)</b> | <b>78</b> |
| <b>Conclusion</b>                             | <b>80</b> |
| <b>Chapitre V: Partie pratique</b>            |           |
| <b>1. Introduction</b>                        | <b>82</b> |
| <b>2. Matériau étudié</b>                     | <b>82</b> |
| <b>3. Préparation des échantillons</b>        | <b>83</b> |
| <b>4. Soudage expérimental</b>                | <b>84</b> |
| <b>5. Contrôles non destructifs</b>           | <b>85</b> |
| <b>6. Traitement thermique appliqué</b>       | <b>88</b> |
| <b>7. Préparation métallographique</b>        | <b>89</b> |
| <b>Observation microscopique</b>              | <b>90</b> |
| <b>Discussion des résultats</b>               | <b>92</b> |
| <b>Conclusion générale</b>                    | <b>94</b> |
| <b>Références</b>                             | <b>/</b>  |

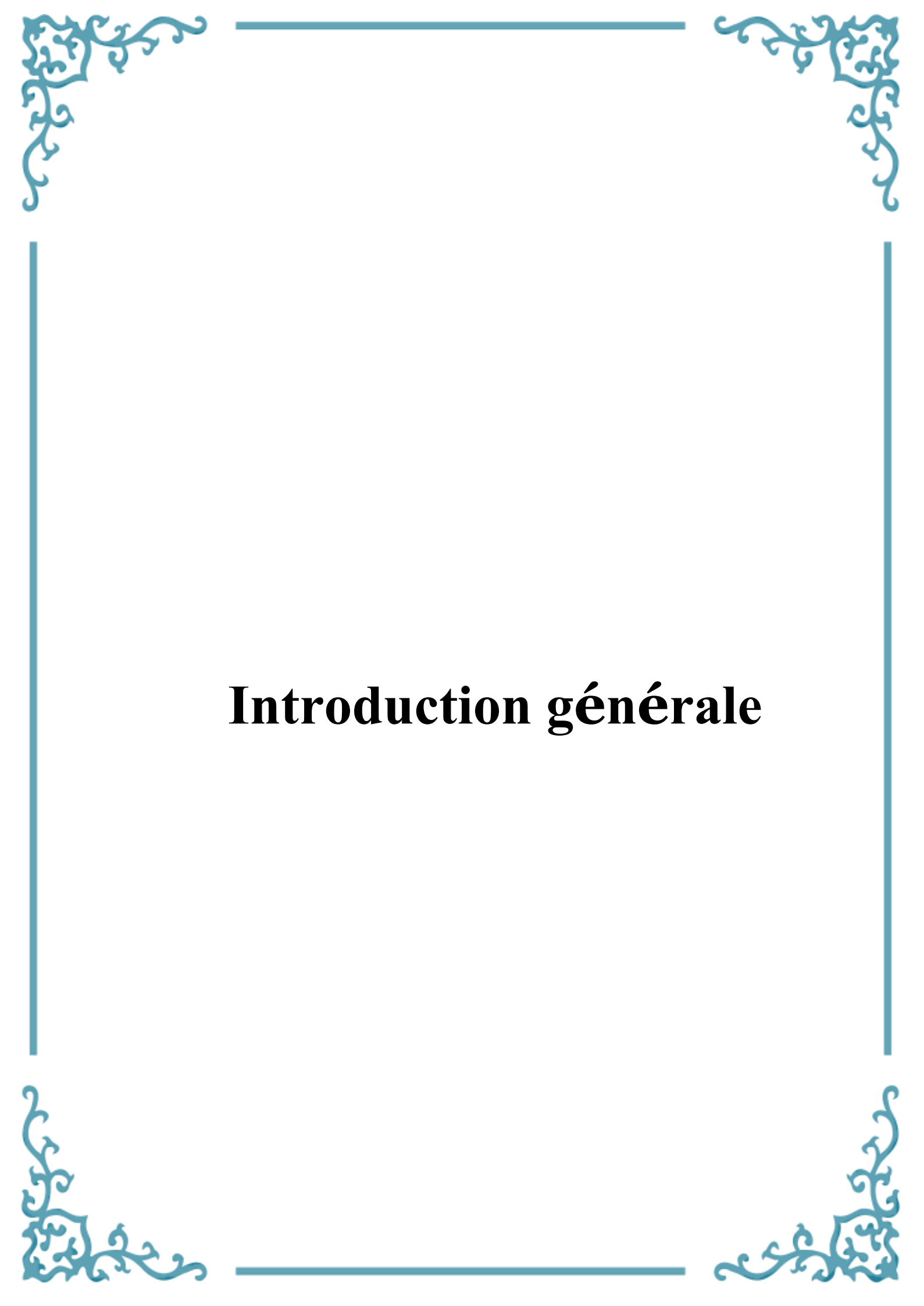
## Liste des figures

| <b>Figure</b>                                                                 | <b>Page</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Chapitre I</b>                                                             |             |
| Figure I-01 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).      | 07          |
| Figure I-02 : Principe de fonctionnement du procédé (GMAW).                   | 08          |
| Figure I-03 : Soudage avec fil fourré et gaz de protection.                   | 10          |
| Figure I-04 : Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents Procédés | 10          |
| Figure I-05 : Principe du procédé (GTAW).                                     | 11          |
| Figure I-06 : Mécanisme du soudage par point.                                 | 13          |
| Figure I-07 : Principe du soudage par molette.                                | 13          |
| Figure I-08 : Principe du soudage oxygaz .                                    | 14          |
| Figure I-09: principe du soudage par faisceau d'électrons.                    | 15          |
| Figure I-10 : principe du soudage laser                                       | 16          |
| Figure I-11 : Soudage par friction-malaxage.                                  | 16          |
| <b>Chapitre II</b>                                                            |             |
| Figure. II.1 : Les différents types de soufflure.                             | 23          |
| Figure. II.2 : Exemple de soufflures.                                         | 23          |

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure. II.3 : Localisations possibles des manques de fusion.                                            | 24 |
| Figure. II.4 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.                                             | 24 |
| Figure. II.5 : Manque de fusion entre passes.                                                            | 25 |
| Figure. II.6 : Manque de fusion à la racine de la soudure.                                               | 26 |
| Figure. II.7 : Défaut manque de pénétration                                                              | 26 |
| Figure. II.8 : Effondrement à la racine.                                                                 | 28 |
| Figure. II.9 : La fissure longitudinale.                                                                 | 29 |
| Figure. II.10 : La fissure transversale.                                                                 | 29 |
| Figure. II.11 : Les types de fissure.                                                                    | 30 |
| Figure. II.15 : Types de fissures à froid.                                                               | 31 |
| Figure. II.16 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).                                                   | 31 |
| Figure II.17 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).                                | 33 |
| Figure II.18 : fissure par arrachement lamellaire dans le métal de base.                                 | 34 |
| Figure II.19 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.                                                | 35 |
| Figure II.20 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.                              | 35 |
| Chapitre III                                                                                             |    |
| Figure III.1: Cycle Thermique d'un Recuit                                                                | 43 |
| Figure III.2: Cycle de Revenu.                                                                           | 46 |
| Figure III.3: Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu sur les aciers | 48 |
| Chapitre IV                                                                                              |    |
| Figure IV.1: Contrôle visuelle d'une pièce                                                               | 51 |
| Figure IV.2 : Témoin pour examen de ressuage                                                             | 55 |
| Figure IV.3 : Exemple de pièce observée en lumière blanche présentant un défaut.                         | 56 |
| Figure IV.4 : Exemple de pièce observée lumière UV présentant un défaut                                  | 56 |
| Figure IV.5 : Appareille manuelle de contrôle par magnétoscopie.                                         | 57 |
| Figure IV.6 : Aimantation directe                                                                        | 58 |
| Figure IV.7: Aimantation indirect                                                                        | 59 |
| Figure IV.8 : Principe du contrôle par magnétoscopie                                                     | 60 |
| Figure IV.9 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique                                     | 63 |
| Figure IV.10 : Schématisation du tube radiogène                                                          | 64 |
| Figure IV.11: Source radioactive à rayonnement gamma.                                                    | 65 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Figure IV.12 : Coupe d'un film AGFA type « NEW ».          | 65 |
| Figure IV.13 : Structure d'un Film. Radiographique.        | 66 |
| Figure IV.14: Flou géométrique.                            | 67 |
| Figure IV.15: Projection elliptique                        | 68 |
| Figure IV.16 : Tir au contact.                             | 68 |
| Figure IV.17 : Indicateur qualité image a fils             | 69 |
| Figure IV.18 : Indicateur qualité image a gradins          | 70 |
| Figure IV.19: Repérage des radiogrammes                    | 71 |
| Figure IV.20 :L'abaque de temps de pose aux rayons X       | 71 |
| Figure IV.21 : Blocs d'étalonnage de type B et V2          | 74 |
| Figure IV.22: Examen par transmission                      | 75 |
| Figure IV.23 : Examen par réflexion                        | 76 |
| Figure IV.24 : Signaux réfléchis par différents obstacles. | 77 |
| Figure IV.25 : Réflexion spéculaire                        | 77 |
| Figure IV.26 : Défaut parallèle à l'onde incidente.        | 77 |
| Figure IV.27 : Principe de contrôle par courants Foucault  | 78 |
| Chapitre V                                                 |    |
| Figure 1 spectrométrie de fluorescence X XRF               | 82 |
| Figure 2 les résultat de la spectrométrie                  | 79 |
| Figure 3 application de l'entaille V                       | 83 |
| Figure 4 application de la distance de pénétration         | 83 |
| Figure 5 électrode 308L pour TIG                           | 84 |
| Figure 6 électrode enrober 308L                            | 84 |
| Figure 7soudage TIG                                        | 84 |
| Figure 8 soudage ARC Electrode enrobée                     | 84 |
| Figure 9 résultat obtenue sans défaut                      | 85 |
| Figure 10 application de la procédure de contrôle PT       | 85 |
| Figure 11 produit utiliser dans FPI                        | 85 |
| Figure 12 pose du film radiographique et IQ                | 86 |
| Figure 13 film radio des éprouvettes                       | 86 |
| Figure 14 machine radiographique 450KV                     | 86 |
| Figure 15 test ultrasonique                                | 87 |
| Figure 16 test ultrason                                    | 87 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 17 les éprouvette de étude                                                     | 87 |
| Figure 18 l'opération de découpage                                                    | 87 |
| Figure 19 machine de découpage a fil ECD                                              | 87 |
| Figure 20 sortir les éprouvettes du four                                              | 88 |
| Figure 21 les éprouvettes en refroidissement a l'air                                  | 88 |
| Figure 22 le contrôleur du four                                                       | 88 |
| Figure 23 la courbe du traitement thermique de la température en fonction des minutes | 88 |
| Figure 24 échantillon avant enrobage                                                  | 89 |
| Figure 25 découpeuse échantillon                                                      | 89 |
| Figure 26 échantillon enrober                                                         | 89 |
| Figure 27polisseuse manuelle                                                          | 89 |
| Figure 28 échantillon après polissage                                                 | 89 |
| Figure 29 polisseuse automatique                                                      | 89 |
| Figure 30 machine enrobage résine a chaud                                             | 89 |
| Figure 31 échantillon après attaque chimique                                          | 90 |
| Figure 32 les substances d'attaque chimique                                           | 90 |
| Figure 33 machine d'électrolyse                                                       | 90 |
| Figure 34 microscope optique Olympus PX51M                                            | 90 |
| Figure 35 métal d'apport                                                              | 91 |
| Figure 36 ZAT                                                                         | 91 |
| Figure 37 métal de base                                                               | 91 |
| Figure 38 métal d'apport                                                              | 91 |
| Figure 39 ZAT                                                                         | 91 |
| Figure 40 métal de base                                                               | 91 |
| Figure 41 métal d'apport                                                              | 91 |
| Figure 42 ZAT                                                                         | 91 |
| Figure 43 métal de base                                                               | 91 |
| Figure 44 métal de base                                                               | 91 |
| Figure 45 métal d'apport                                                              | 91 |
| Figure 46 ZAT                                                                         | 91 |



# **Introduction générale**

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

L'acier inoxydable occupe aujourd'hui une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels, notamment les industries chimique, pétrochimique, alimentaire, pharmaceutique, énergétique et biomédicale, en raison de sa bonne résistance à la corrosion, de ses propriétés mécaniques satisfaisantes et de sa capacité à conserver des performances stables dans des environnements sévères. Son utilisation dans la fabrication de réservoirs, de conduites, d'échangeurs thermiques, de structures mécano-soudées et de composants soumis à des sollicitations thermiques ou chimiques importantes rend le soudage incontournable dans les procédés de mise en œuvre de ce matériau. Toutefois, l'opération de soudage ne constitue pas une simple technique d'assemblage ; elle représente également une sollicitation thermique intense qui modifie localement l'état métallurgique du matériau et peut affecter de façon significative ses propriétés d'usage.

Lors du soudage d'un acier inoxydable, la matière subit un cycle thermique complexe comprenant une phase de chauffage rapide, une fusion locale dans la zone du joint, puis un refroidissement à une vitesse dépendant du procédé employé, de l'épaisseur des pièces, de la géométrie de l'assemblage et des conditions opératoires. Ce cycle thermique entraîne la formation de différentes régions métallurgiques, à savoir le métal fondu, la zone affectée thermiquement et le métal de base non modifié, chacune présentant des caractéristiques microstructurales et mécaniques particulières. Dans ces zones, les transformations peuvent se traduire par une variation de la taille des grains, une redistribution des phases, la formation de ferrite résiduelle, la précipitation de composés secondaires ou encore l'apparition de contraintes résiduelles susceptibles d'altérer la qualité globale du joint soudé.

La nature de ces transformations dépend fortement de la famille d'acier inoxydable considérée. Les aciers inoxydables austénitiques, qui sont parmi les plus utilisés en industrie, présentent généralement une bonne soudabilité, mais ils peuvent devenir sensibles à la fissuration à chaud et à certains phénomènes de sensibilisation lorsque les conditions thermiques sont défavorables. Les aciers inoxydables peuvent subir un grossissement important des grains dans la zone affectée thermiquement, ce qui entraîne une baisse de ténacité. Les aciers inoxydables martensitiques, quant à eux, sont plus sensibles à la formation de structures dures et fragiles après soudage, ce qui justifie souvent l'application de traitements thermiques adaptés pour réduire les risques de fissuration et améliorer le comportement mécanique du joint. Enfin, les aciers inoxydables duplex, caractérisés par une structure biphasée ferrite-austénite, exigent un contrôle particulièrement rigoureux du cycle thermique afin de préserver l'équilibre de phases qui

## Introduction Générale

---

conditionne leur résistance mécanique et leur tenue à la corrosion.

Dans ce contexte, le traitement thermique appliqué avant ou après soudage apparaît comme un moyen essentiel de maîtrise métallurgique. En effet, le traitement thermique peut être utilisé pour soulager les contraintes résiduelles introduites par le soudage, homogénéiser la microstructure du joint, corriger certaines hétérogénéités locales, limiter les effets de transformations défavorables ou restaurer certaines propriétés dégradées pendant l'assemblage. Son action dépend toutefois de plusieurs paramètres fondamentaux, parmi lesquels la température de traitement, le temps de maintien, la vitesse de chauffage, le mode de refroidissement et, dans certains cas, l'atmosphère de traitement. L'influence du traitement thermique n'est donc ni simple ni systématiquement bénéfique ; elle doit être analysée en fonction du type d'acier inoxydable étudié, du procédé de soudage utilisé et des propriétés finales recherchées.

L'intérêt scientifique de ce sujet réside précisément dans la relation étroite entre traitement thermique, évolution microstructurale et performances finales du joint soudé. En métallurgie du soudage, la microstructure constitue le lien fondamental entre l'histoire thermique du matériau et son comportement mécanique ou chimique en service. Une variation de la fraction de ferrite, une précipitation de carbures aux joints de grains, la formation de nitrures, l'apparition de phases intermétalliques ou un simple grossissement granulaire peuvent suffire à modifier sensiblement la dureté, la ductilité, la résistance à la traction, la résilience ou encore la résistance à la corrosion intergranulaire et localisée. Ainsi, l'étude de l'influence du traitement thermique sur la microstructure des soudures d'acier inoxydable présente un intérêt à la fois fondamental, pour la compréhension des mécanismes métallurgiques, et appliqué, pour l'optimisation des procédés industriels d'assemblage.

Sur le plan technologique, la maîtrise de cette influence est indispensable pour garantir la fiabilité des assemblages soudés destinés à fonctionner dans des conditions sévères. Dans de nombreux équipements, une dégradation locale de la microstructure peut constituer le point de départ d'une rupture prématurée, d'une corrosion localisée ou d'une perte de performance en service. Par conséquent, l'évaluation de l'effet du traitement thermique ne peut se limiter à une simple observation visuelle du cordon ; elle doit s'appuyer sur une approche globale intégrant l'étude des procédés de soudage, l'identification des défauts, l'analyse métallographique, les essais de dureté, les essais mécaniques et, lorsque cela est possible, l'évaluation de la résistance à la corrosion.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette perspective. Il a pour objectif principal d'analyser

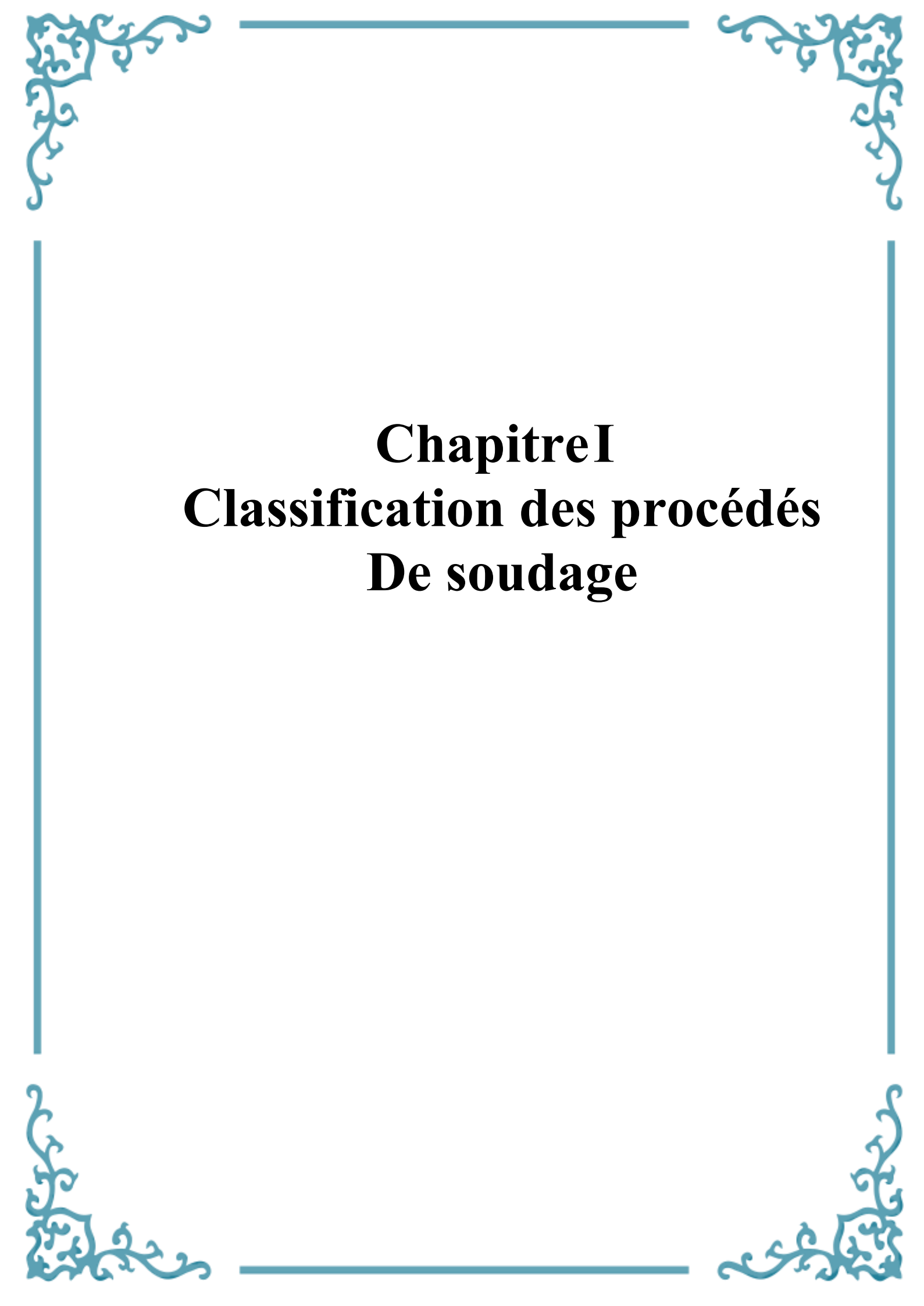
## Introduction Générale

---

l'influence du traitement thermique sur la microstructure des soudures d'acier inoxydable, tout en mettant en évidence les conséquences de cette influence sur les propriétés du joint soudé. Plus précisément, il s'agit d'examiner comment les cycles thermiques appliqués après soudage peuvent modifier la structure du métal fondu et de la zone affectée thermiquement, favoriser ou limiter certaines transformations de phases, et conduire finalement à une amélioration ou à une dégradation des performances mécaniques et de la tenue en corrosion.

Afin de répondre à cette problématique, le mémoire est structuré en plusieurs chapitres complémentaires, conformément au plan de travail retenu. Le premier chapitre est consacré à la classification des procédés de soudage, avec une attention particulière portée aux procédés couramment utilisés pour les aciers inoxydables et à leur influence sur le cycle thermique de soudage. Le deuxième chapitre traite des principaux défauts de soudage, qu'ils soient géométriques, internes ou métallurgiques, ainsi que de leurs conséquences sur la qualité des assemblages. Le troisième chapitre, qui constitue le cœur du sujet, développe les différents traitements thermiques applicables aux soudures et analyse leurs effets sur la microstructure des aciers inoxydables selon leur famille métallurgique. Le quatrième chapitre présente les méthodes d'inspection et de contrôle utilisées pour évaluer la qualité des soudures, depuis les contrôles non destructifs jusqu'aux observations microstructurales. Le cinquième chapitre expose les techniques expérimentales mobilisées dans l'étude, tandis que la partie consacrée aux résultats et interprétations vise à relier les observations obtenues aux mécanismes métallurgiques induits par les traitements thermiques.

Dans l'ensemble, ce travail cherche à montrer que la qualité d'une soudure d'acier inoxydable ne dépend pas uniquement de la bonne exécution du procédé de soudage, mais également de la maîtrise du traitement thermique appliqué avant ou après l'assemblage. La compréhension de cette interaction entre cycle thermique, microstructure et propriétés constitue une étape essentielle pour optimiser les performances des joints soudés et améliorer leur durabilité dans les applications industrielles. Par cette approche, le mémoire ambitionne d'apporter une contribution à la compréhension métallurgique des soudures inoxydables et de proposer une base scientifique utile à leur amélioration technologique.



# **Chapitre I**

## **Classification des procédés**

### **De soudage**

## I-1- introduction :

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. [1]

### a- Définitions de base :

- **Soudage** : C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport.
- **Soudure** : C'est le résultat de l'opération de soudage.
- **Soudage homogène** : les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique ou lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique semblable à celle du matériau de base.
- **Soudage hétérogène** : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente.
- **soudage autogène** : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint.

### b-Histoire de Soudage :

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- à l'âge de bronze on soudait à la poche.
- à l'âge de fer on soudait à la forge.

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'âge du bronze et assemblées par chauffage et martelage d'un joint constitué de deux surfaces se recouvrant. Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2000 ans. Pendant l'âge du bronze, Les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3000 ans ont été retrouvés.

Pendant le Moyen Âge, l'art des chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produits en utilisant la technique du martelage / soudage. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, les procédés de soudage évoluent peu, c'est vers 1850 qu'on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

- Fin XIXe siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés : Le soudage oxyacétylénique.  
Le soudage aluminothermique.

Le soudage à l'arc  
électrique. Le  
soudage par  
résistance.

Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920. [2]

### **I-2- procédés de soudage :**

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenus par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie.

#### **I-2-1- Soudage a l'arc :**

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

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs

techniques : **I-2-1-1-soudage à l'arc avec électrode**

#### **enrobée (SMAW) : a-définition :**

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est le procédé de soudage le plus couramment employé pour les travaux d'entretien et de réparation. Dans ce procédé, on fait jaillir un arc électrique entre le bout de l'électrode et le métal à souder. L'électrode est constituée d'une âme métallique, recouverte de flux ou d'un revêtement (enrobage). L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage.

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

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

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée tend à être remplacé par le soudage MIG MAG.

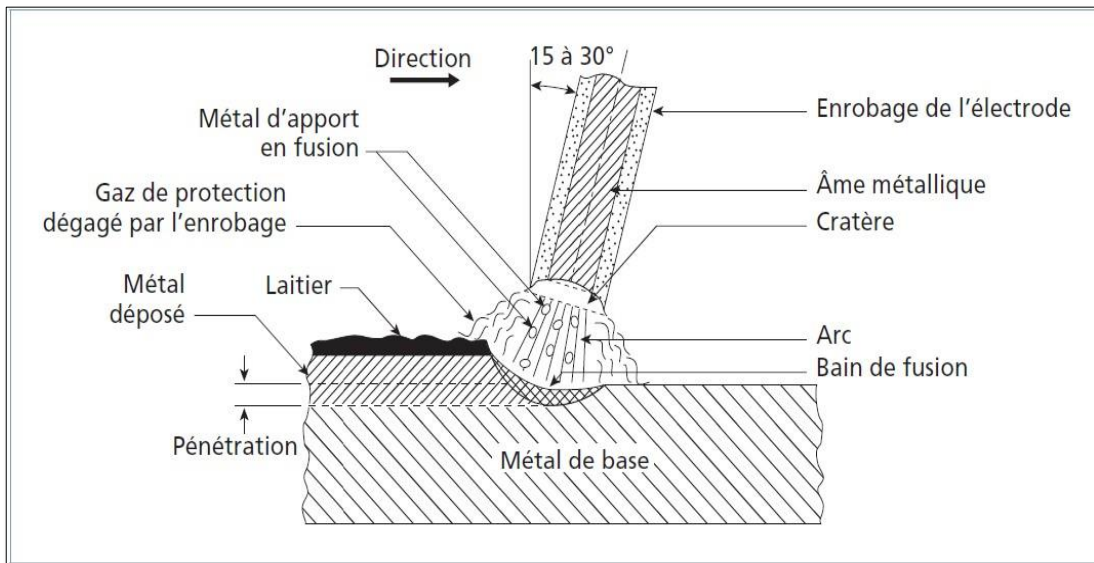


Figure I-01 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). [3]

### b- Avantages et inconvénients :

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

### c- Applications :

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons.

Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier. [4]

### I-2-1-2- Soudage MIG/MAG fil plein(GMAW) :

#### a-Définition :

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (figure 02).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection .

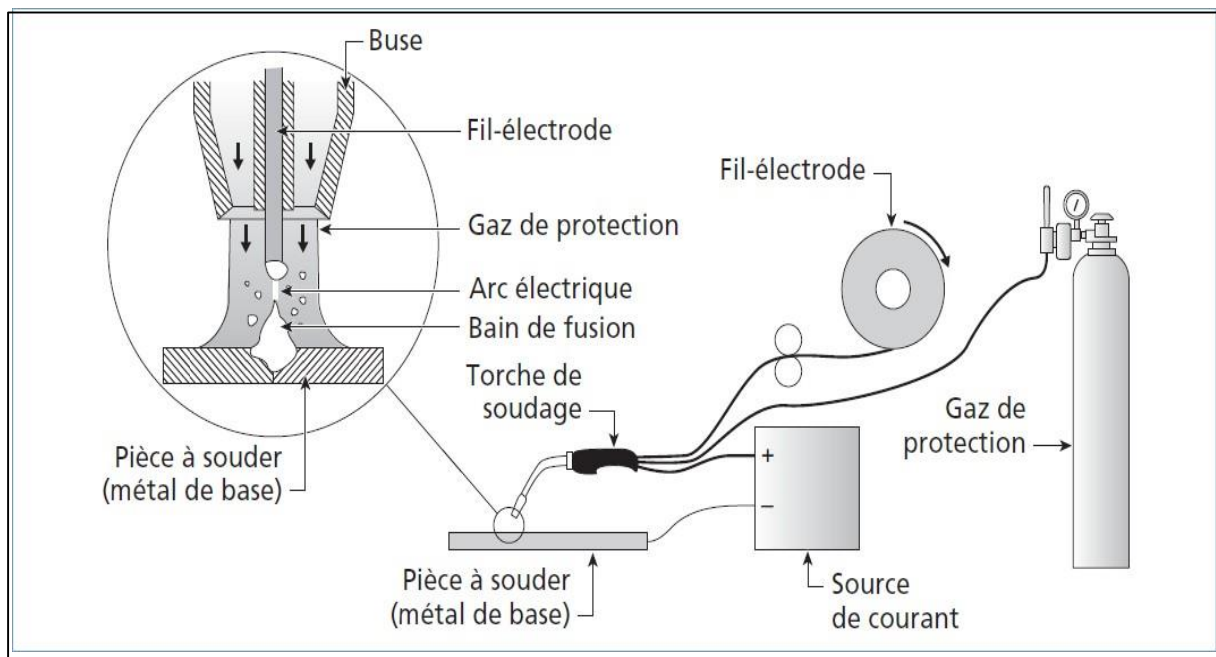


Figure I-02 : Principe de fonctionnement du procédé (GMAW). [3]

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

1. Le procédé MIG (Métal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;

2. Le procédé MAG (Métal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

### **b-Avantages et inconvénients**

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier.

La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables. [4]

### **c-Applications :**

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. [4]

## **I-2-1-3- Soudage MAG fil fourré (FCAW):**

### **a-Définition :**

Le soudage à l'arc avec fil fourré de flux (MAG fil fourré) est appelé également soudage FCAW. Dans ce procédé, la tête de soudage d'un pistolet à souder déroule à vitesse constante un fil constitué d'un tube en métal fourré de flux.

Le flux aide à amorcer l'arc, forme un laitier et comprend des adjuvants destinés à renforcer la soudure. Le gaz de protection (CO<sub>2</sub>, mélange Argon – CO<sub>2</sub>) dépend du fil fourré utilisé (possibilité d'une autoprotection par dégagement du gaz protecteur suite à la décomposition du flux) Ce type de soudage est utilisé surtout pour les travaux d'assemblage mécanique (charpente)

ou de maintenance générale. Ce procédé est principalement utilisé pour les aciers au carbone et aciers inoxydables. [4]

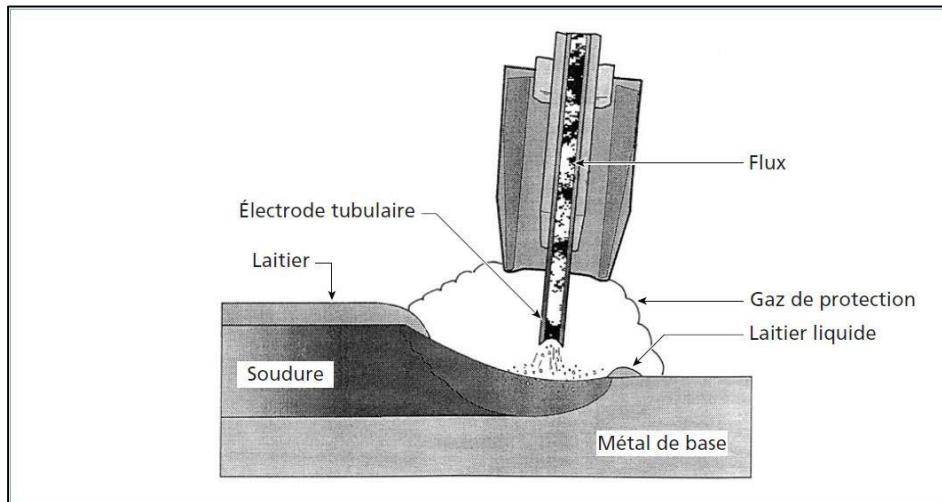


Figure I-03 : Soudage avec fil fourré et gaz de protection. [3]

### b- Avantages et inconvénients :

Ces procédés de soudage connaissent un essor certain, dû notamment à leur taux de dépôt supérieur aux autres procédés en fonction de l'intensité de courant utilisé (figure I-04).

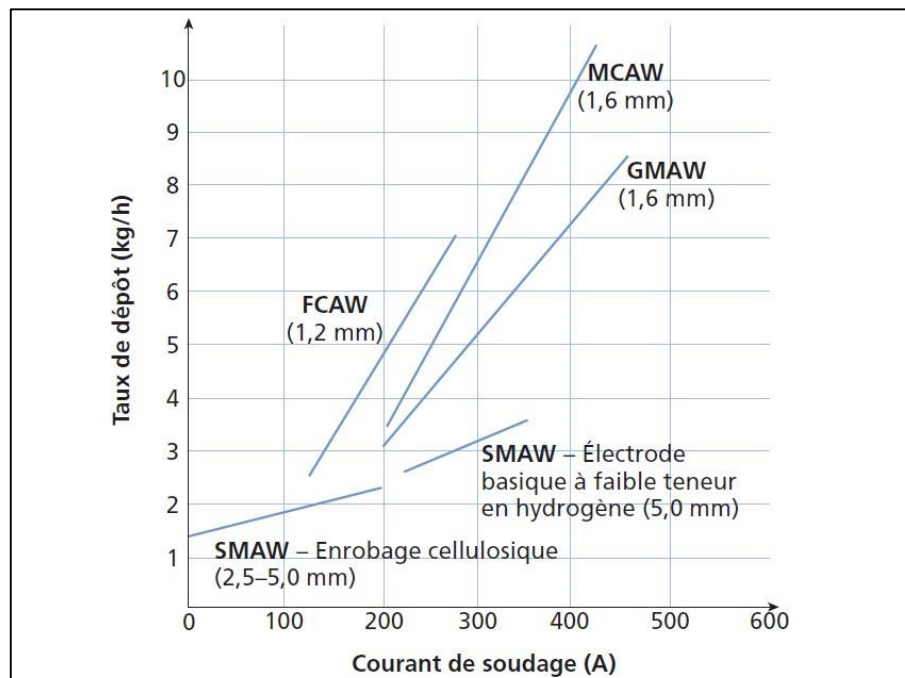


Figure I-04 : Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents Procédés.[3]

On emploie les procédés FCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm).

### c-Applications

Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc. [4]

### I-2-1-4- SOUDAGE TIG (GTAW):

#### a- Définition :

Pour le soudage à l'électrode de tungstène (TIG), un arc électrique est amorcé entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. L'électrode demeure réfractaire à la fusion. La protection de l'arc est assurée par un débit continu de gaz, habituellement de l'Argon (ou aussi de l'Hélium ou encore un mélange Argon – Hélium). Cette protection empêche les gaz atmosphériques de pénétrer dans la zone de soudage. L'arc peut fusionner deux pièces de métal sans métal d'apport. En cas d'apport de métal, celui-ci est introduit sous forme de baguette.

Le soudage TIG sert couramment dans les travaux de soudage d'aluminium (soudage métaux nobles). Il peut également servir à souder les pièces en acier doux ou en acier inoxydable.

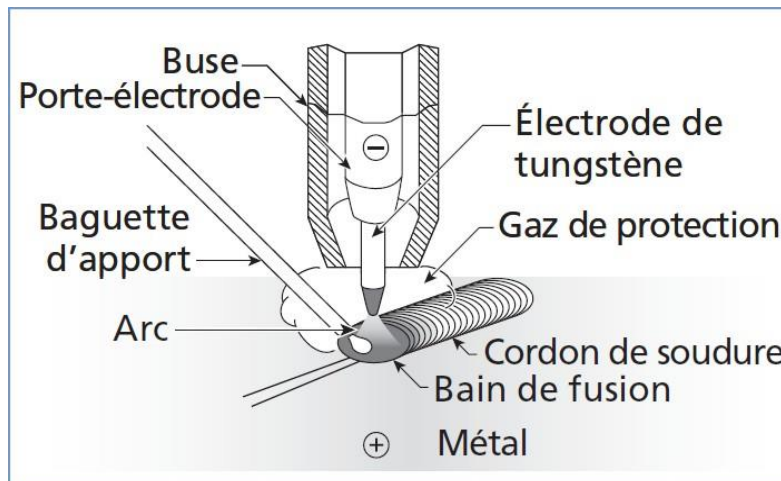


Figure I-05 : Principe du procédé (GTAW). [5]

### **b- Avantages et inconvénients :**

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

### **c-Applications :**

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces. [4]

## **I-3- Le Soudage par point (RSW) :**

### **a- Définition :**

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

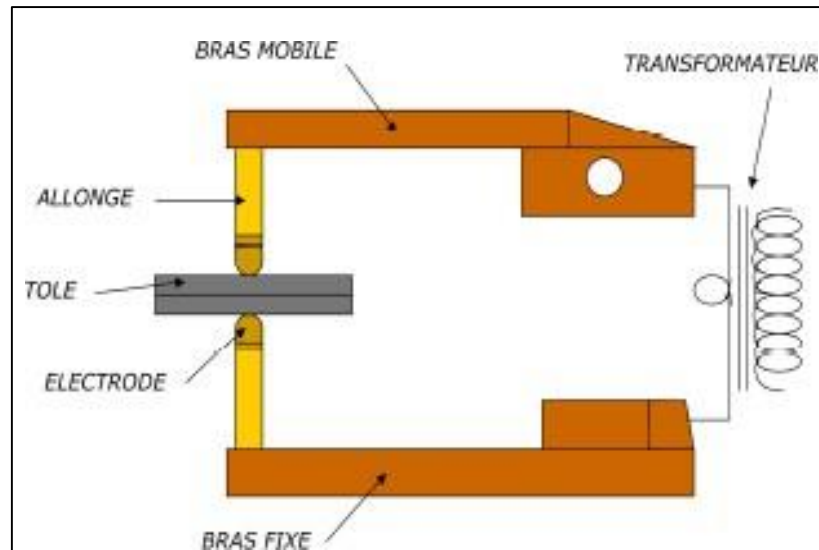


Figure I-06 : Mécanisme du soudage par point. [6]

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

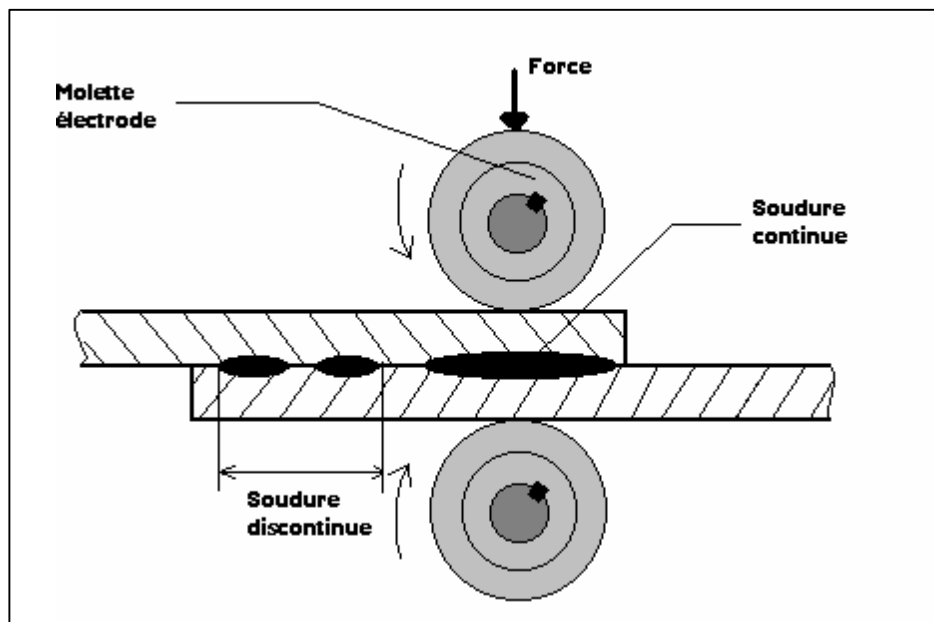


Figure I-07 : Principe du soudage par molette. [3]

### **b- Applications :**

Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc...[4]

### I-4- Soudage oxygaz :

#### a- Définition :

Dans ce procédé, le soudage utilise la chaleur de combustion d'un gaz combustible (principalement acétylène ou propane) mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant ( $O_2$ ).

Le poste de soudage à la flamme comporte des bouteilles de gaz, des détendeurs, des tuyaux flexibles, chalumeau et l'électrode d'appoint introduite à la main.

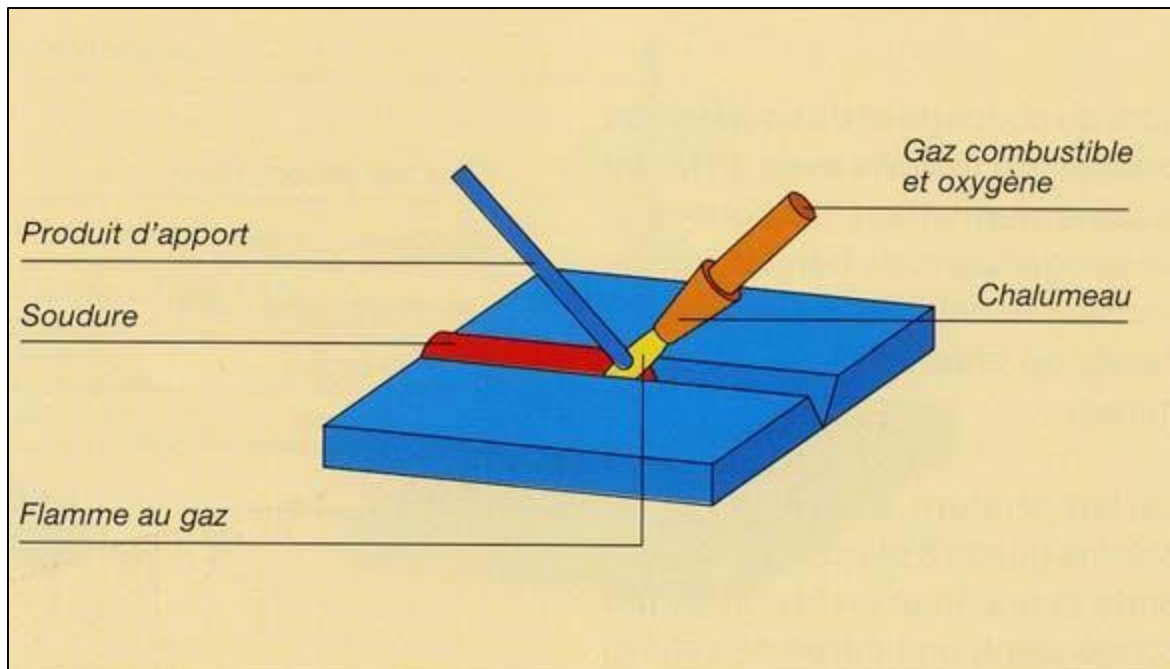


Figure I-08 : Principe du soudage oxygaz . [3]

#### b- Application :

Travaux de réparation ou pour souder de la tôle légère.

### I-5- Autres procédés :

a- Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) apparaît en 1958 (figure4). Il relève, avec le soudage laser, de la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie. Grâce à l'utilisation de très hautes températures, il permet une pénétration étroite et profonde. Il présente néanmoins un inconvénient majeur : il faut en effet pouvoir disposer d'une chambre à vide pouvant contenir à la fois le canon à électrons et la pièce à souder. L'aéronautique et le nucléaire sont les premiers à le plébisciter.

La Figure I-09 montre le principe du soudage par faisceau d'électrons.

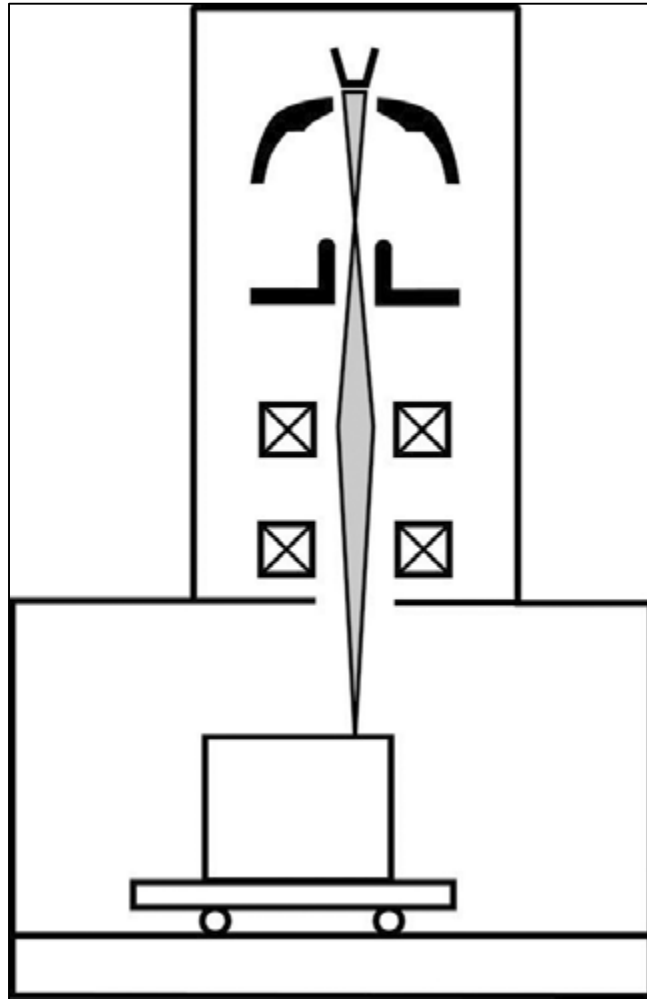


Figure I-09: principe du soudage par faisceau d'électrons. [3]

**b-** Le soudage (et le coupage) laser ont des caractéristiques idéales a plus d'un titre (figure 10). Le faisceau laser permet une conduite plus concentrée de la chaleur, des déformations très faibles et de très grandes vitesses de soudage. Malheureusement, un laser puissant est encombrant et couteux, et il faut trouver le moyen d'amener le faisceau lumineux jusqu'au point de soudure. Pour y parvenir, un système de miroirs réfléchit le faisceau dans les lasers CO<sub>2</sub>, et le rayon peut être transmis par fibre optique dans les lasers YAG, ce qui fait de ces derniers l'instrument idéal pour les robots soudeurs.

La Figure I-10 montre le principe du soudage par laser.

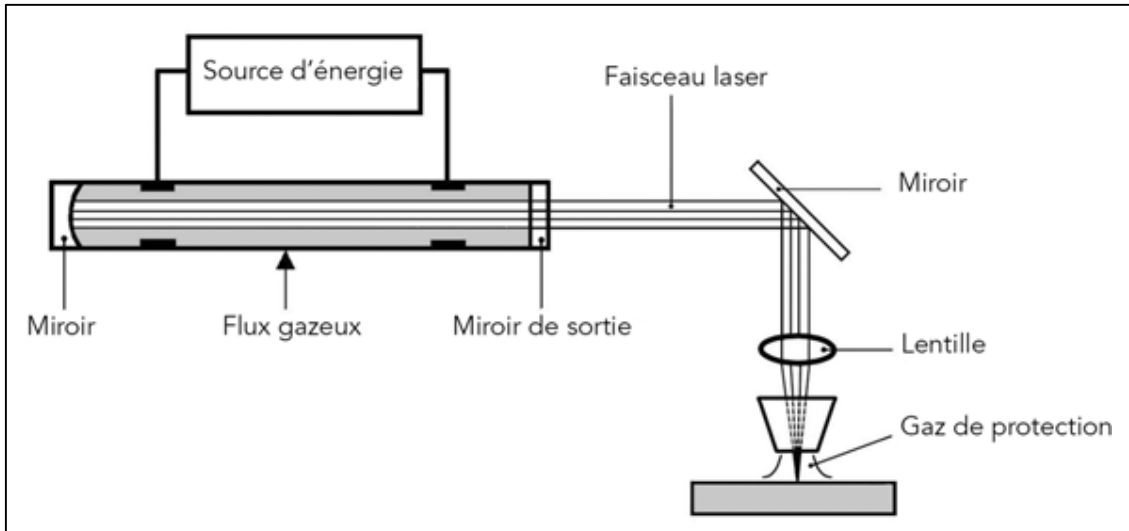


Figure I-10 : principe du soudage laser.[3]

Le soudage par friction-malaxage a été breveté par TWI en 1992 (figure 11). Le procédé est parfaitement adapté à l'aluminium et donne un joint de bonne qualité sans fusion. Il n'exige pas de matériau d'apport, consomme peu d'énergie et a un faible impact environnemental. Sa simplicité et son efficacité en font l'une des plus brillantes innovations du XXe siècle dans le domaine du soudage. [4]

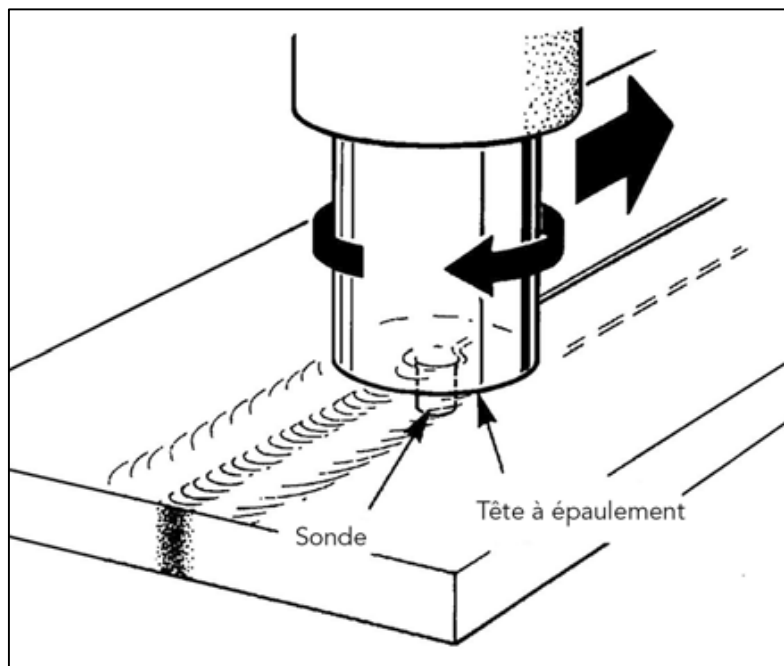
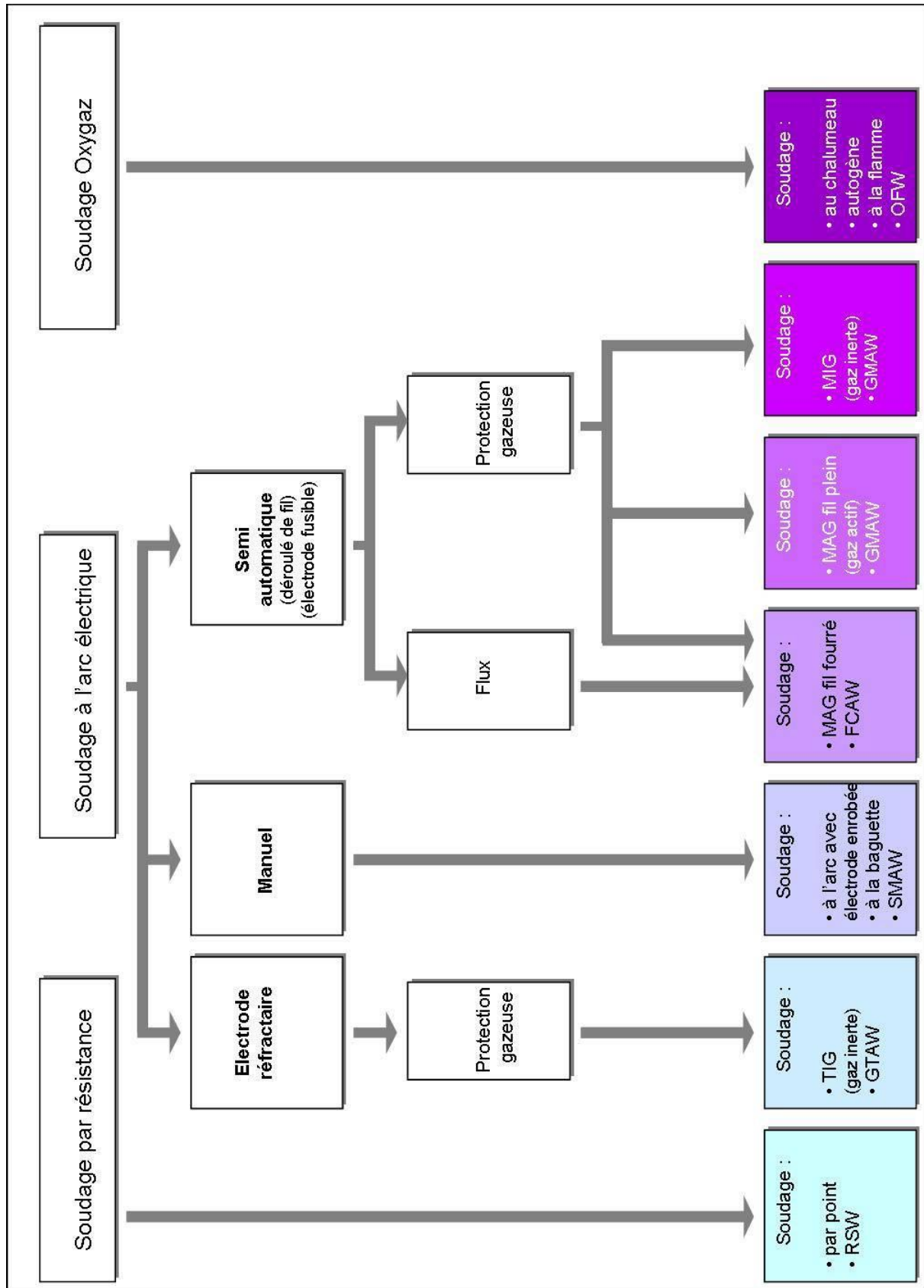


Figure I-11 : Soudage par friction-malaxage. [3]

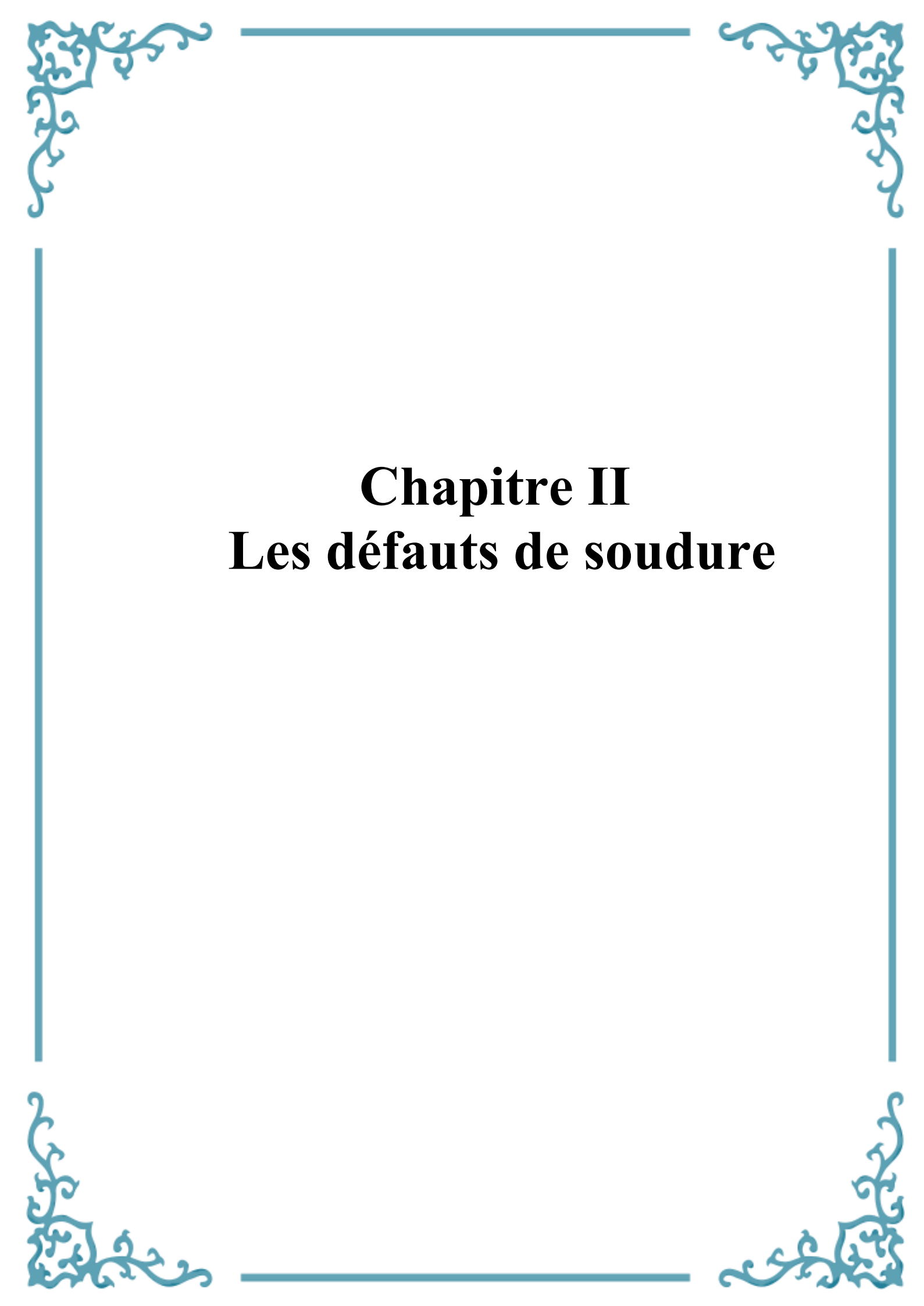
### Organigramme des procédés de soudage les plus répandus. [7]



## Chapitre I Classification des procédés de soudage

| No                 | SIGLE                             | DÉSIGNATION FRANÇAISE                                                    | DÉSIGNATION ANGLAISE                                |
|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>111</b>         | ARC E.E. / SMAW / MMA             | Soudage à l'arc avec électrodes enrobées                                 | Shielding Metal Arc Welding or Metal Manual Arc     |
| <b>114</b>         | FIL FOURRE SANS GAZ / INNERSHIELD | Soudage à l'arc avec fil électrode fourré sans gaz                       | Flux Cored Arc Welding without gas                  |
| <b>121</b>         | A.S.F./ SAW                       | Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec fil électrode          | Submerged Arc Welding                               |
| <b>122</b>         | A.S.F./ SAW                       | Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec feuillard              | Submerged Arc Welding                               |
| <b>131</b>         | MIG / GMAW                        | Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec fil électrode fusible          | Metal Inert gas or Gas Metal Arc Welding            |
| <b>135</b>         | MAG / GMAW                        | Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fusible          | Metal Active gas or Gas Metal Arc Welding           |
| <b>136</b>         | FIL FOURRE AVEC GAZ / FCAW        | Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fourré           | Metal Active gas or Flux Cored Arc Welding with gas |
| <b>141</b>         | TIG / GTAW                        | Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène         | Gaz Tungsten Arc Welding                            |
| <b>141 orbital</b> | TIG ORBITAL / GTAW                | Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène orbital | Gaz Tungsten Arc Welding                            |
| <b>15</b>          | PLASMA / PAW                      | Soudage à l'arc électrique au plasma                                     | Plasma Arc Welding                                  |
| <b>21</b>          | POINT / RSW                       | Soudage par résistance par point                                         | Resistance Spot Welding                             |
| <b>22</b>          | MOLETTE / RSEW                    | Soudage par résistance à la molette                                      | Resistance Seam Welding                             |
| <b>23</b>          | BOSSAGE /                         | Soudage par résistance par bossage                                       |                                                     |
| <b>24</b>          | ÉTINCELAGE / FW                   | Soudage en bout par étincelage                                           | Flash Welding                                       |
| <b>311</b>         | OXYA / OAW                        | Soudage au chalumeau avec flamme oxyacétylénique                         | Oxy-Acetylen Welding                                |
| <b>441</b>         | EXPLOSION / EXW                   | Soudage par explosion                                                    | Explosion Welding                                   |
| <b>45</b>          | DIFFUSION / DBW                   | Soudage par diffusion                                                    | Diffusion Bonding Welding                           |
| <b>71</b>          | ALUMINOTHERMIE / TW               | Soudage aluminothermique                                                 | Alumino-Thermic Welding                             |
| <b>72</b>          | VERTICAL SOUS LAITIER / ESW       | Soudage vertical sous laitier                                            | Electroslag Welding                                 |
| <b>73</b>          | VERTICAL SOUS GAZ / EGW           | Soudage vertical sous gaz de protection                                  | Electrogas Welding                                  |
| <b>52</b>          | LASER / LBW                       | Soudage par faisceau laser                                               | Laser Beam Welding                                  |
| <b>51</b>          | FAISCEAU ELECTRONS / EBW          | Soudage par faisceau d'électrons                                         | Electron Beam Welding                               |
| <b>781</b>         | GOUJON / SW                       | Soudage à l'arc de goujons                                               | Stud Arc Welding                                    |

Tableau I-1: Récapitulatif des procédés de soudage. [8].



# **Chapitre II**

## **Les défauts de soudure**

### II.1. Introduction :

La majeure partie des discontinuités se produisent dans les joints ou dans la ZAT, les soudures comportent des porosités et des soufflures, des inclusions, scories d'impuretés ou des fissures. Parmi ces trois défauts, les fissures sont de loin les plus déterminantes. S'il y a des limites acceptables pour les inclusions et les porosités, les fissures restent inadmissibles. Pour les propos de ce paragraphe, la fissure se distingue d'un autre défaut comme la cassure ; Les soudures casent à cause des contraintes, mauvaise conception du joint, ou fatigue, la fissure en cause ici est due à la solidification, le refroidissement les tensions dues au retrait du joint.

Les défauts de soudage sont en général inhérents aux procédés de soudage. En fait, ils dépendent de plusieurs facteurs : mauvaises exécutions (surchauffe, pression, durée d'application, etc.), qualité du métal de base et/ou du produit d'apport, propreté des régions à souder et choix du procédé lui-même [12].

Les facteurs de défaillance des assemblages soudés sont de trois ordres différents.

- Facteur technologique : facteurs associés à l'exécution des soudures.
- Facteur métallurgique : facteurs associés à l'altération métallurgique due au soudage.
- Facteur mécanique : facteurs associés au dimensionnement des cordons et aux tracés

Des ensembles soudés [12].

### II.2. Définition :

Une discontinuité géométrique, par les conséquences qu'elle entraîne naturellement, par exemple sur la répartition des contraintes peut, au sens direct, être considérée comme un défaut puisqu'elle provoque une situation inhabituelle par rapport à celle rencontrée, partout ailleurs, dans l'objet considéré mais alors, tout cordon de soudure, y compris le cordon bout à bout, constitue un défaut. En conséquence une définition possible de ce qu'on entend par défaut pourrait être «Accident géométrique autre que ceux inhérents aux cordons de soudure proprement dits » [12].

### II.3. Qualités et défauts d'un cordon de soudure :

Un cordon bien exécuté doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Il doit posséder un profil légèrement convexe.
- Sa surface doit être douce et régulière.
- Les stries doivent être également rapprochées les unes des autres.

Ses côtés doivent être bien fusionnés à la surface du métal de base

### II.4. Facteurs de défaillance des assemblages soudés :

#### II.4.1. Facteurs technologique :

Ce sont les conditions de réalisations des soudures qui provoquent l'application de défauts affectent le comportement mécanique de l'assemblage soudé. L'institut international de la soudure a proposé la classification suivante :

- Les fissures
- Les cavités
- Les inclusions solides
- Les manques de fusion et de pénétration
- Les défauts de formes
- Les autres défauts.

Les fissures sont dues souvent à l'effet thermomécanique du soudage ; les cavités sont dues au retrait du métal ou à la présence de gaz ou d'inclusions solides [12].

#### II.4.2. Facteurs métallurgiques :

Les cycles thermiques associés à l'opération du soudage provoquent des modifications locales des propriétés mécaniques de l'assemblage soudé.

Ces facteurs sont principalement. [15-14-16]

- L'adoucissement
- La trempe

- Le vieillissement
- La surchauffe
- La structure de solidification

### **II.4.3. Facteurs mécaniques :**

Dans ce cas il s'agit d'erreurs de conception et non plus d'exécution. La géométrie du cordon de soudure, par exemple, joue un rôle important sur la concentration des contraintes, surtout au pied du cordon. [11]

### **II.5. Les principaux défauts de soudures :**

Les défauts les plus importants qui risquent de donner lieu à une reprise du joint ou à mise en cause de la résistance de ces derniers sont :

#### **II.5.1. Les inclusions gazeuses :**

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- Utilisation d'aciers calmés.
- Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation.
- Séchage des pièces avant soudage.
- Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage.

#### **II.5.2. Les inclusions solides :**

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures.

Pour les éviter, il faut un nettoyage convenable des cordons, et un choix d'électrodes d'un diamètre correspond à l'épaisseur des pièces dessouder.

#### **II.5.3. Les soufflures :**

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Des soufflures débouchantes sont appelées piqûres.

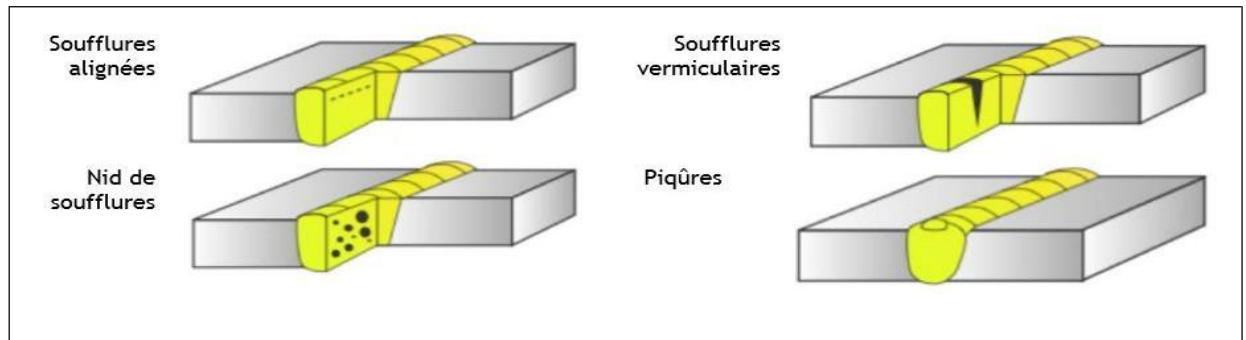


**Figure. II.1 :** Les différents types de soufflure.

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance graisseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour les prévenir, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures.

Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.



**Figure. II.2 :** Exemple de soufflures.

### II.5.4. Défauts de fusion (collage) :

Elles sont causées par une intensité très faible du courant de soudure ; vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal, Et L'angle d'inclinaison de l'électrode est incorrect. Pour les éviter, il faut faire un choix judicieux de l'intensité du courant et la vitesse d'avancement de l'électrode. En plus L'angle de l'électrode doit permettre l'établissement de l'arc avec les

parois du joint.

### II.5.4.1. Localisations possibles des manques de fusion :

Des manques de fusion peuvent apparaître (Figure. II.3) :

- Soit dans le flanc de la soudure entre métal de base et métal déposé.
- Soit entre passes de soudage.
- Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé.

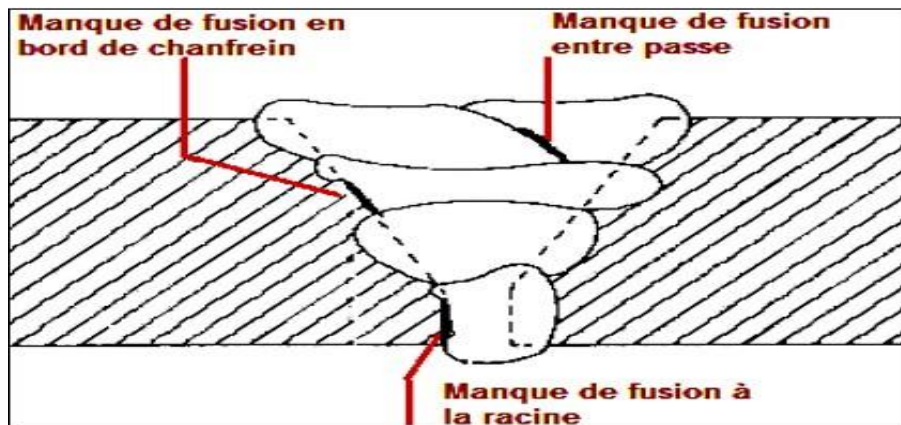


**Figure. II.3 :** Localisations possibles des manques de fusion.

### II.5.4.2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure :

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (Figure. II.4.).

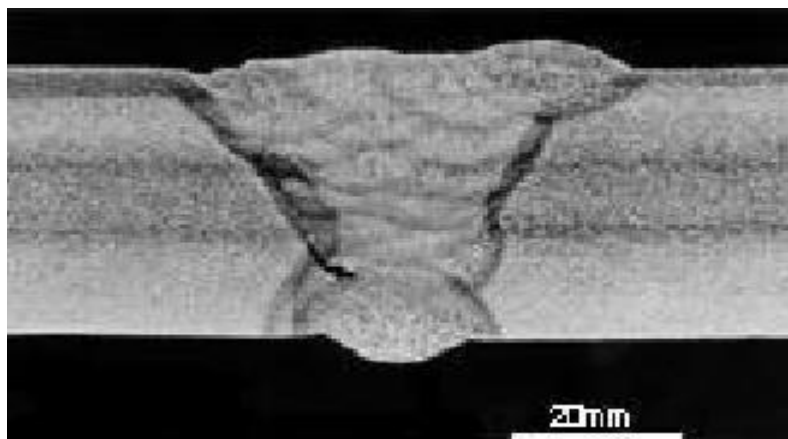


**Figure. II.4 :** Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

### II.5.4.2.1. Causes possibles :

- Energie de l'arc trop faible
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Mauvais angle de l'électrode.
- Métal d'apport qui coule devant l'arc à la suite de la position de soudage
- Inductance trop importante en soudage MAG.
- Bords à souder mal nettoyés.

### II.5.4.2.2. Mesures préventives :

- Qualification de la procédure pour vérifier la fusion
- Eventuellement modifier l'angle d'inclinaison de l'électrode ou la position de soudage
- Nettoyer suffisamment les bords à souder
- Diminuer une inductance trop élevée dans le soudage MAG, même si les projections sur le métal de base deviennent plus nombreuses.

### II. 5.4.3. Manque de fusion entre passes :

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Figure. II.5).

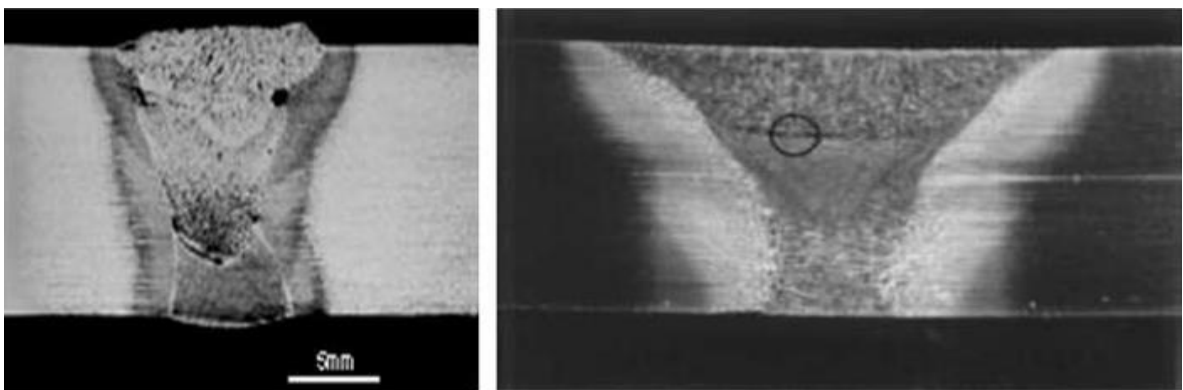


**Figure. II.5 :** Manque de fusion entre passes.

### II. 5.4.4. Manque de fusion à la racine de la soudure :

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration (Figure. II.6).

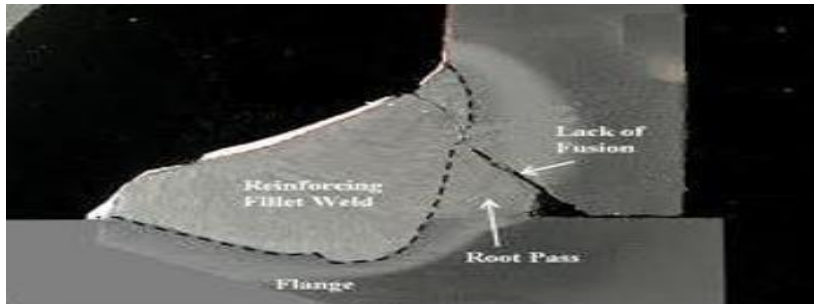


**Figure. II.6 :** Manque de fusion à la racine de la soudure.

### II.5.5. Défauts de pénétration :

Ils sont dus à une absence de métal à la racine des chanfreins, à cause d'utilisation d'électrode de diamètre trop important, intensité trop faible du courant de soudage, mauvaise préparation des pièces à souder. Pour les éviter, il faut un bon choix de l'intensité du courant de la vitesse d'avancement, et une préparation adaptée aux conditions de soudage.

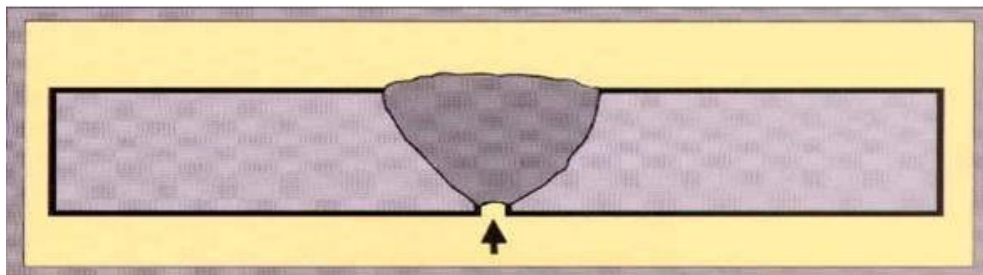


**Figure. II.7 :** Défaut manque de pénétration.

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé Tableau (II.1).

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci. Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de

pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure.

| Défaut de pénétration        | Causes possibles                                                                                                                                                                                                                      | Moyens de prévention                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Excès de pénétration</b>  | <ul style="list-style-type: none"><li>– Vitesse d'avance trop lente</li><li>– Intensité du courant trop forte</li><li>– Mauvaise préparation des bords</li><li>– Trop de distance entre les pièces</li><li>– Arc trop court</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>– Augmenter la vitesse.</li><li>– Diminuer l'intensité.</li><li>– Utiliser le joint approprié.</li><li>– Rapprocher les pièces.</li><li>– Éloigner la torche.</li></ul>                                            |
| <b>Manque de pénétration</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>– Vitesse d'avance trop élevée</li><li>– Intensité du courant trop faible</li><li>– Chanfrein trop étroit ou absent</li><li>– Métal de base trop épais et froid</li></ul>                       | <ul style="list-style-type: none"><li>– Diminuer la vitesse.</li><li>– Augmenter l'intensité.</li><li>– Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces.</li><li>– S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée.</li></ul> |

**Tableau. II.1 :** Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention [13].

### **II.5.6. Sillons aux caniveaux et morsures en surface :**

Ce sont, des rainures ou des gorges à la surface des pièces, le long des bords des joints soudés. Ils sont le fait d'une énergie de soudage trop importante ou d'une mauvaise position du fils de l'électrode.

Pour les éviter, il faut un choix judicieux de l'énergie de soudage, de la position de l'électrode, et de la température des pièces pendant le soudage.

### **II.5.7. Retassures de cratère :**

Ce sont des cavités à l'extrémité des cordons, souvent remplies de laitier et pouvant donner lieu à fissuration. Elles sont causées par une solidification rapide du métal après interruption de l'arc.

Pour les éviter, il faut un contrôle visuel pendant le soudage, interruption progressive de l'arc en fin d'exécution des cordons. [19]

### **II-5.8. Effondrement à la racine :**

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (Figure 8.).

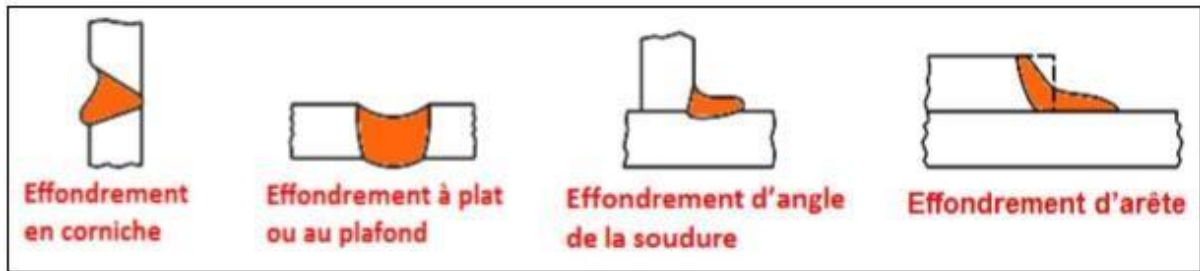


**Figure. II.8 :** Effondrement à la racine.

### II.6. Fissurations :

Elles sont définies par la présence de fissures dans le métal fondu ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT), Ou dans la zone de liaisons à la jonction de la zone fondue (ZF) et du métal de base, on trouve trois types de fissuration :

- Dans la ZAT : la fissuration à froid surviennent après que le métal est refroidi (aussi appelée fissuration différée) et la fissuration au réchauffage.
- Dans la zone fondue : les fissurations à chaud, surviennent aux températures élevées sont relatifs à la solidification. Pour réduire ou écarter le risque de fissuration, le niveau de contraintes résiduelles doit être réduit au minimum en agissant sur les séquences de soudage, le taux d'hydrogène diffusible dans le bain de fusion aussi bas que possible et la durée de refroidissement ( $\Delta T$  800 - 500) suffisante pour l'obtention d'une structure favorable.
- Dans le métal de base : l'arrachement lamellaire.

### II.7. Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur [19].

#### II.7.1. Les fissures longitudinales :

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure [19].

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous (Figure. II.9).

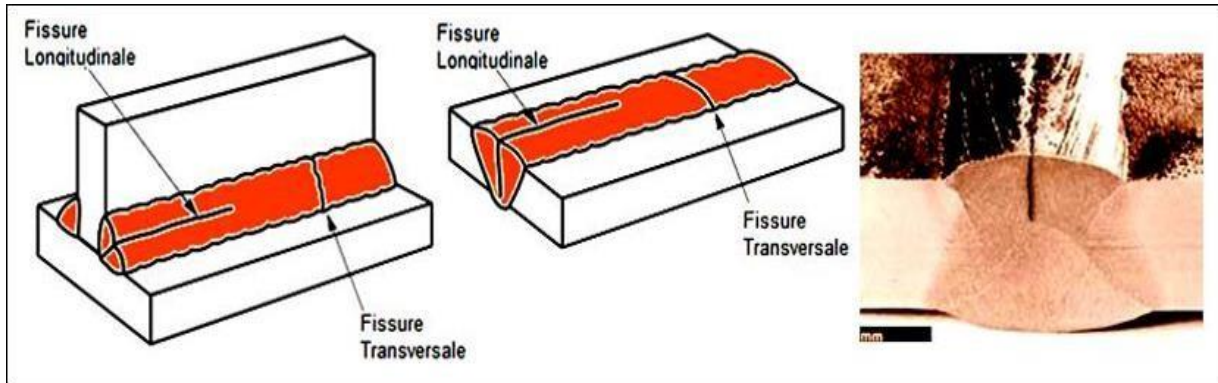


**Figure. II.9 :** La fissure longitudinale.

### II.7.2. Les fissures transversales :

Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure.

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité.

La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal.



**Figure. II.10 :** La fissure transversale.

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé.

L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures.

Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des jointes la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures [12].

### II.8. Types des fissures :

La figure (II.11) résume les fissures qui peuvent être trouvées dans la plupart des cas.

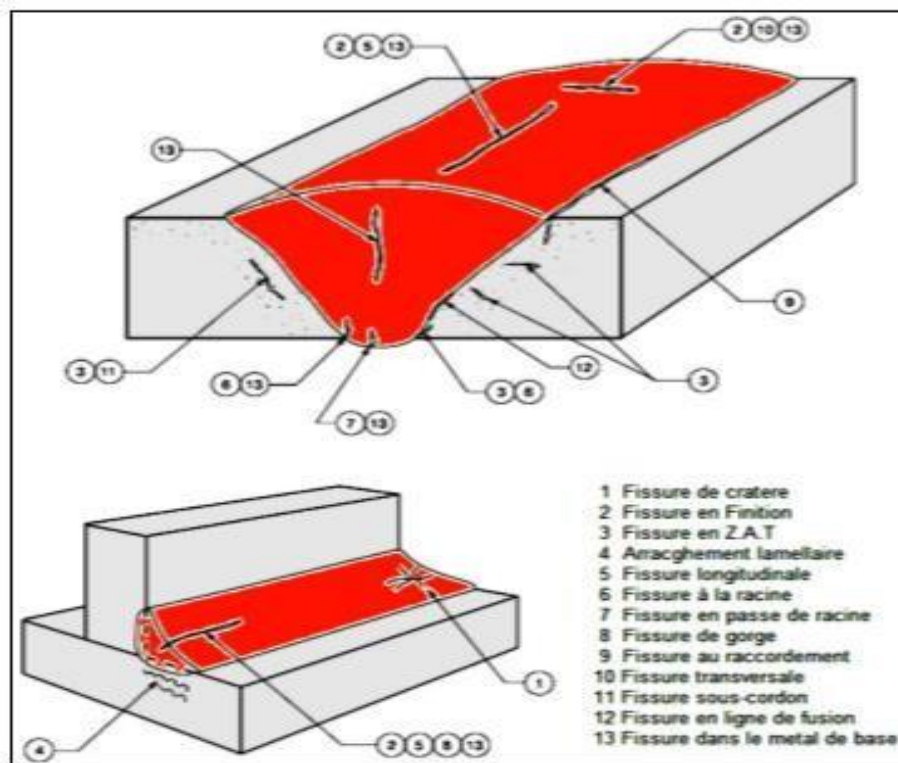


**Figure. II.11 :** Les types de fissure.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure :

La fissuration à chaud et la fissuration à froid [12].

### II.8.1. Fissuration à chaud :

#### II. 8.1.1. Définition :

C'est une fissure qui se développe quand la soudure se refroidit, elle se situe généralement en plein centre du cordon. Caractérisé par une séparation au milieu du joint, cas des passes uniques, pour les passes multiples ou plusieurs joints sont effectués par bande, la fissure centrale est souvent au milieu de l'ensemble du cordon

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion.

Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure

(Figure II.12). On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal

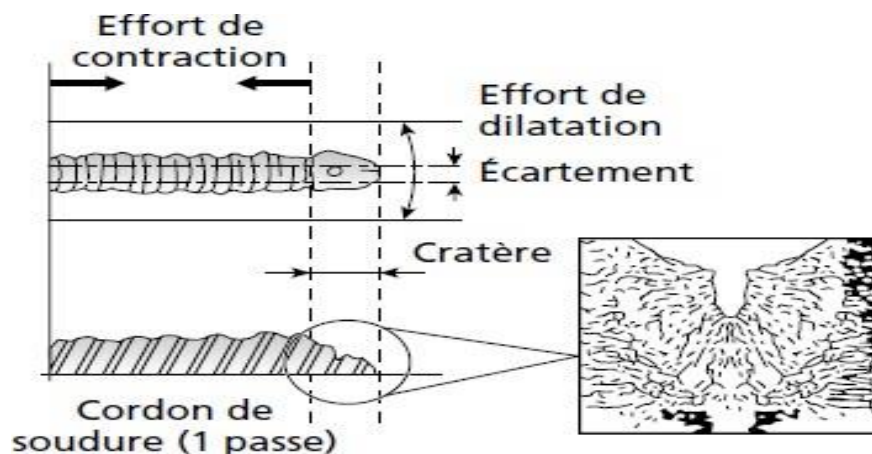


**Figure. II.12 :** Fissure de cratère.

La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud, car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus

larges et de moindre profondeur en diminuant les risques (Figure. II.13) [12].

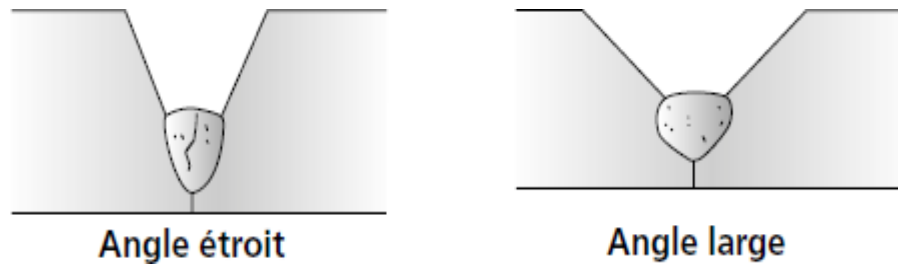


**Figure. II.13 :** Préparation d'un joint pour la prévention de la fissure à chaud .

### II.8.1.2. Causes possibles :

- Retrait transversal exagéré, sur tout pour des cordons avec un rapport profondeur/largeur supérieur à deux (rapport classique pour des procédés avec grande densité de courant tels que le soudage sous flux et le soudage MAG).

- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Figure. II.14). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température.

C'est un effet défavorable de la préchauffe.

Ecartement trop important entre les parties à assembler dans le cas de soudures d'angle.

- **Soudures d'angle avec concavité importante** : celles-ci ont parfois une résistance insuffisante pour encaisser des contraintes de retrait normales.

- Transformations allotropiques** : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier ; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains

éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

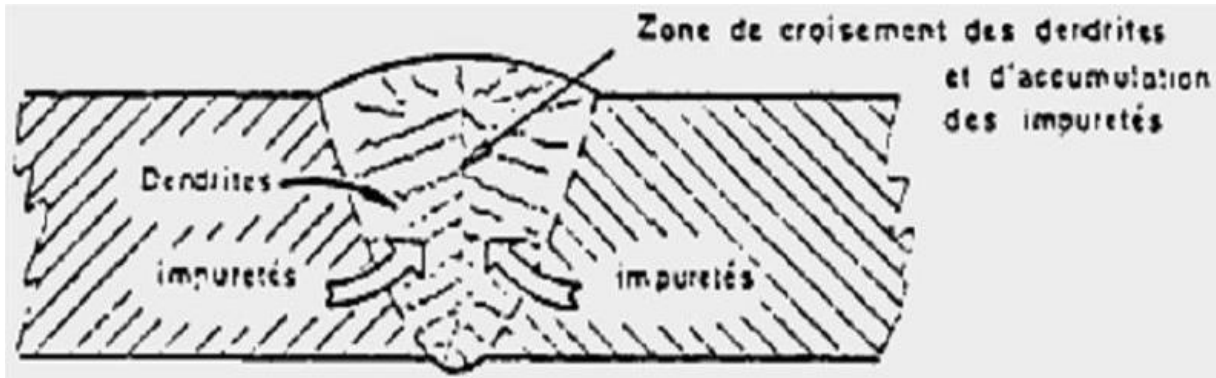


**Figure. II.14 :** Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

### II.8.2. Fissuration à froid :

#### II.8.2.1. Définition

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZTA (Figure. II.15) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes

Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid [17].

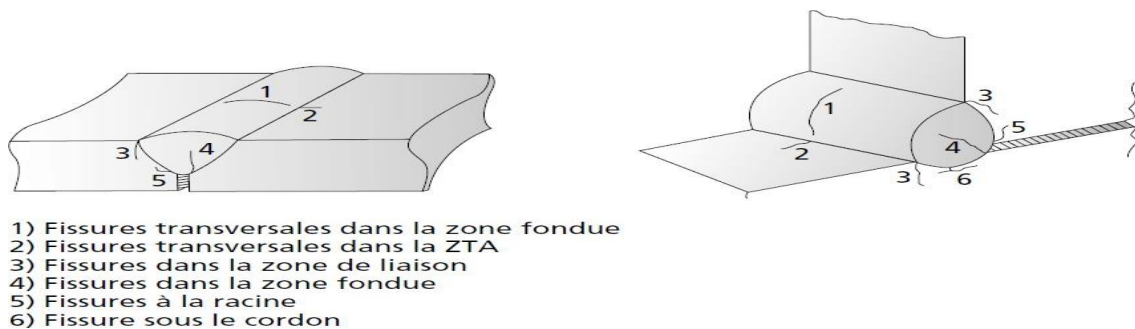


**Figure. II.15 :** Types de fissures à froid.

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage (Figure. II.16) [20].

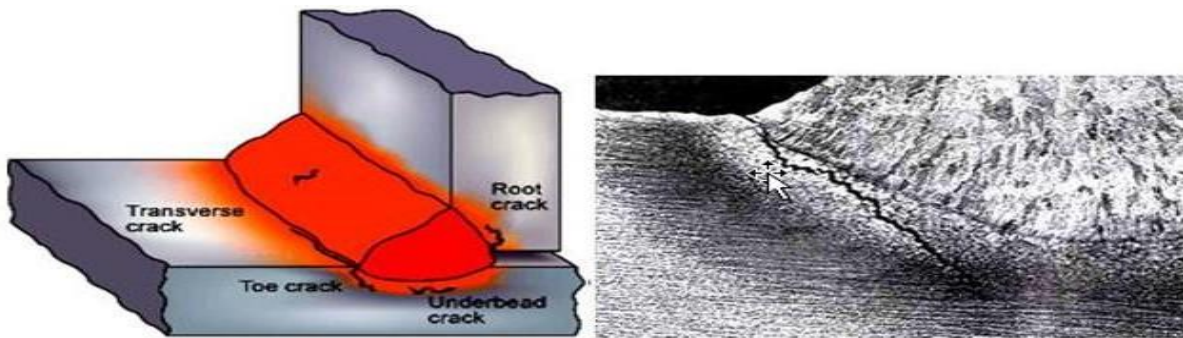


**Figure. II.16 :** Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

- la trempabilité liée au carbone équivalent ;
- la présence d'hydrogène due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;
- l'humidité dans l'air ;
- le refroidissement rapide de la pièce ;
- la présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.).

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures. [17].

### **II.8.3. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) :**

Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base.

Les fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément :

- Hydrogène.

- Une microstructure de ductilité relativement faible.
- De fortes contraintes résiduelles [20]

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Fig. II.17.).

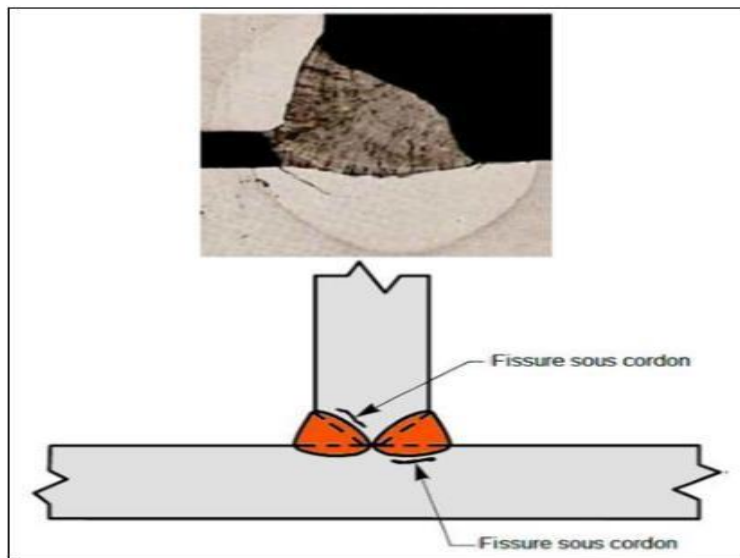


**Fig. II.17 :** Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

Les fissures de la ZAT sont caractérisées par la séparation qui survient immédiatement à la zone adjacente au joint quoi qu'il soit relié au processus de soudage, la fissure survient au métal de base et non au produit du soudage.

Ce type de fissures connu sous les noms de : fissure sous joint, fissure d'orteil, fissure différée, car ces fissures surviennent après que le métal est refroidi au voisinage de 400°C, on peut les appeler fissures froides, par ce que ces fissures sont associées à l'hydrogène, sont appelées aussi fissures assistées par l'hydrogène. [18]

L'humidité et les composés organiques sont les sources essentielles de l'hydrogène, ils peuvent être dans l'atmosphère, présents sur l'électrode ou sur les matériaux de l'emballage, le flux protecteur de l'arc, tout dépend des conditions de stockage. Pour limiter la quantité d'hydrogène dans le métal déposé, les consommables doivent être proprement déposées et le soudage doit être pratiqué sur des surfaces propres et sèches.

La concentration de l'hydrogène après le soudage immédiatement est élevée, si l'hydrogène entraînant la fissuration doit intervenir, il doit généralement se produire après quelques jours de la fabrication, et prendra de même pour voir les fissures grandir à une taille suffisante pour leur détection.

Le taux de diffusion peut être approximé à :

- 450°F, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/h.
- 220°F, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/ 48 h.
- A l'ambiante, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/ 2 semaines.

Il est possible d'appliquer un traitement post soudage couramment appelé (post chauffage) qui consiste à chauffer la soudure à 400°F, conserver pendant 1h/pouce d'épaisseur, à cette température, l'hydrogène est convenablement redistribué par une diffusion ce qui permet d'éviter le risque de fissuration. Pour rendre efficace le post chauffage, il doit être appliqué avant que la soudure soit laissée refroidir à l'ambiante.

### **Fissures par arrachement lamellaire :**

L'arrachement lamellaire (ou fissure lamellaire) peut se produire sous la soudure spécialement dans les tôles laminées à faible ductilité dans le sens de l'épaisseur [15].

Les fissures de ce type sont conséquence d'une fissuration qui se produit parallèlement à la

« peau » d'un produit laminé, au droit d'une soudure sollicitant le joint soudé dans la direction de l'épaisseur.

La fissure prend naissance par décollement suivant les plans d'inclusions le métal de base, pour des épaisseurs supérieures à 25 mm, Remèdes : Importance d'une bonne conception du joint soudé et le choix d'un acier ayant un minimum d'inclusions (Fig. II.19)

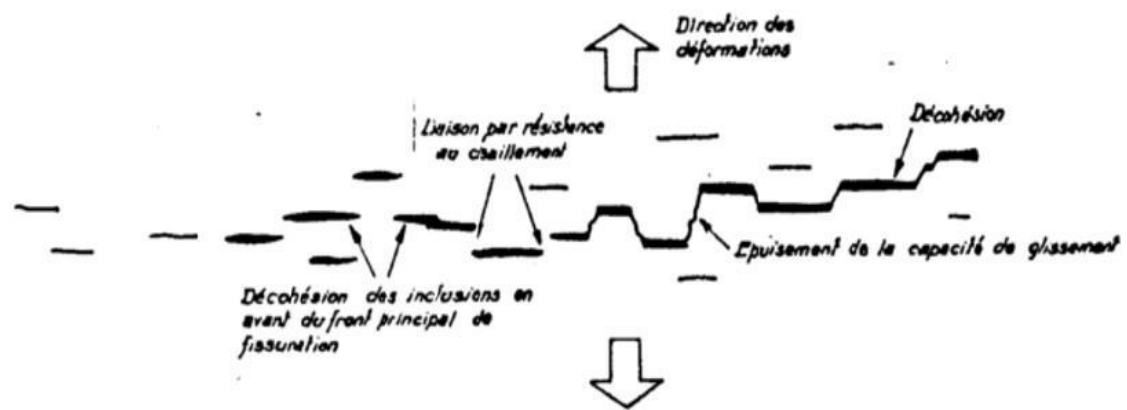


Fig. II.18 : fissure par arrachement lamellaire dans le métal de base.

Identification :

**Aspect Visuel :**

Le principal trait caractéristique de l'arrachement lamellaire est qu'il se produit dans les soudures en T et en angle et qu'il se situe dans le métal de base parallèlement à la ligne de fusion de la soudure et de la surface de la tôle (Fig. II.20.). Les fissures peuvent apparaître au bord de la pénétration de la soudure mais sont toujours associées avec des points de grande concentration de contraintes.

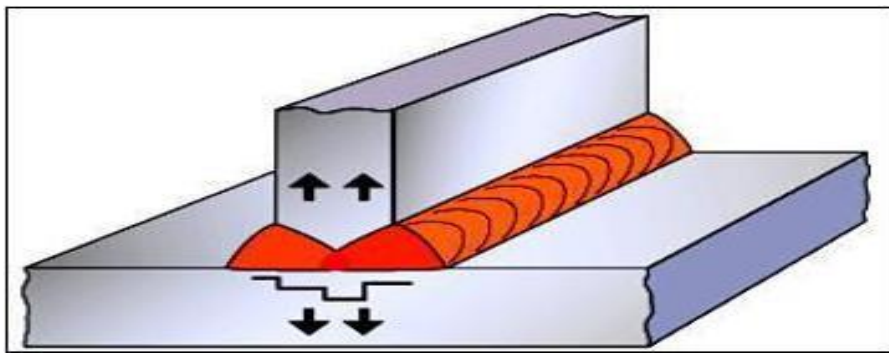


**Fig. II.19 :** Arrachement lamellaire dans un joint en T.

Surface de Rupture :

La surface de la rupture est fibreuse avec un aspect de «bois» et de longues sections parallèles qui indiquent une faible ductilité du métal dans le sens de l'épaisseur (Fig. II.21.)

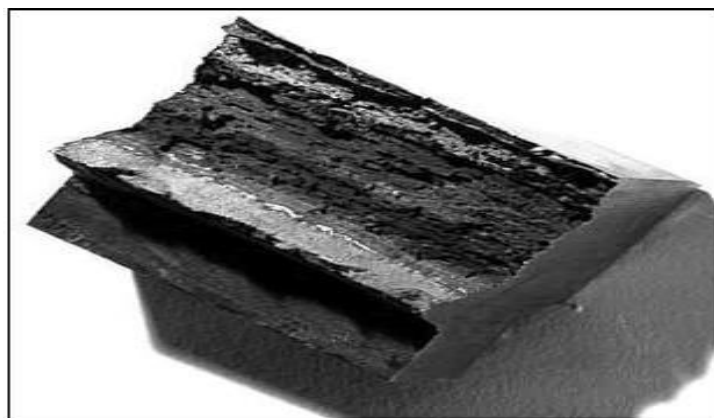


**Fig. II.20 :** Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.

### Les cause :

Il est généralement reconnu qu'il y a trois conditions qui doivent être présentes pour que l'arrachement lamellaire se produise :

- Tension dans le sens de l'épaisseur : les tensions de soudage doivent agir dans la direction la plus courte de la tôle (il à travers l'épaisseur de la tôle)
- Orientation de la soudure : la zone de fusion sera parallèle au plan des inclusions
- Susceptibilité du matériau : la tôle doit avoir une faible ductilité dans le sens de l'épaisseur

Donc, le risque d'arrachement lamellaire sera plus grand si les tensions énérees par soudage agissent dans le sens de l'épaisseur. Le risque augmentera aussi avec l'augmentation du

niveau d'hydrogène du métal déposé.

Facteurs à considérer pour réduire le risque d'arrachement :

Le choix du matériau, de la configuration du joint, du procédé de soudage, des consommables, ainsi que le préchauffage, et le beurrage peuvent aider à réduire le risque d'arrachement [15].

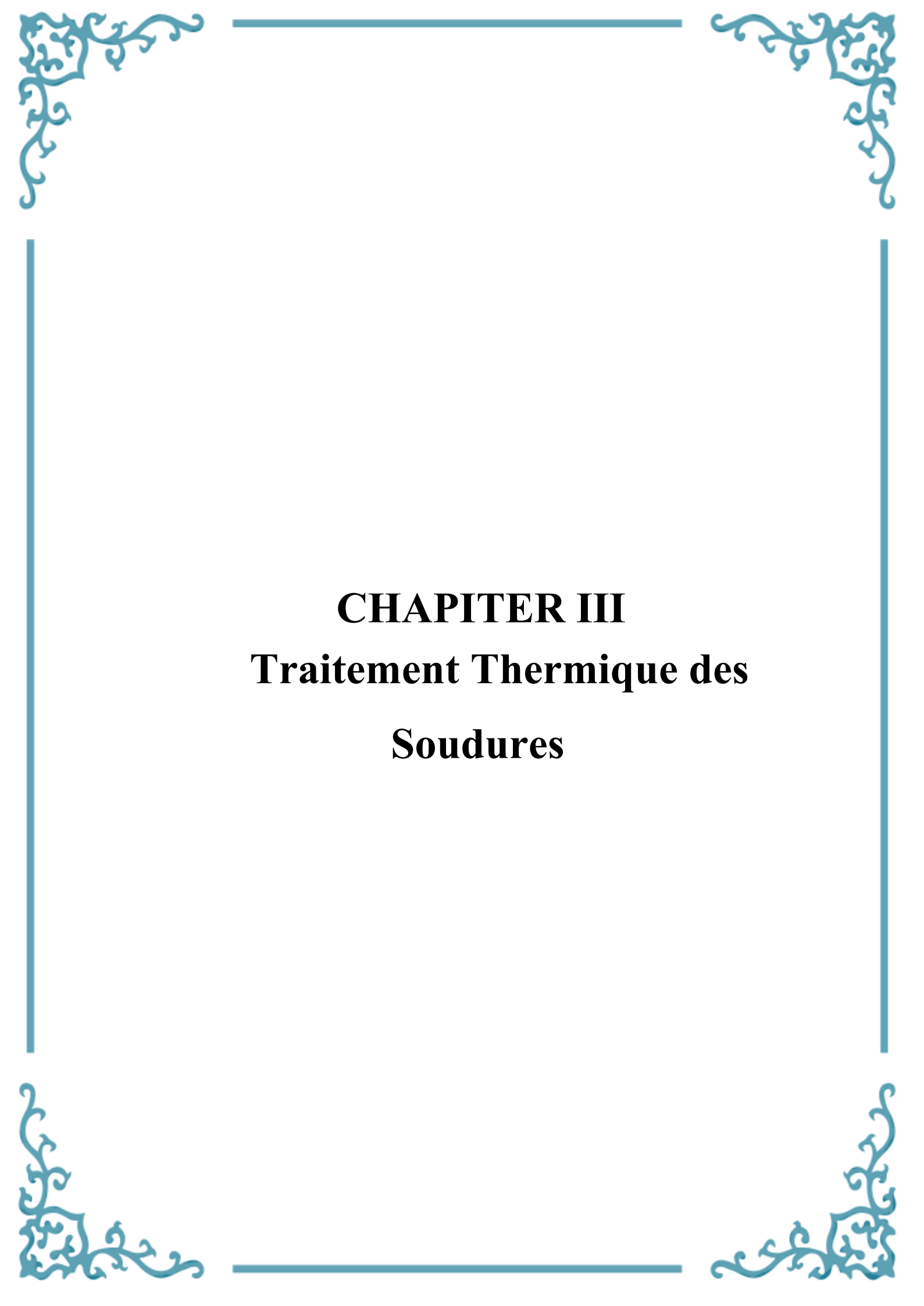
### **Conclusion :**

La fissuration résulte généralement de tensions internes trop importantes dans le cordon de soudure ou dans la zone chauffée durant le soudage (ZTA). Les fissures peuvent apparaître très tôt (fissuration à chaud) ou des heures, voire des jours après le soudage (fissuration à froid). Les causes les plus fréquentes de fissuration sont un refroidissement trop rapide, un

métal d'apport incompatible avec le métal de base ou une mauvaise préparation des joints.

En plus des fissures, il existe plusieurs types de défauts de soudure : les défauts dimensionnels (mauvaise dimension du cordon sur la largeur ou sur l'épaisseur), les défauts de géométrie du cordon, les défauts de pénétration, les soufflures, les inclusions, les caniveaux, les retassures, les projections et les défauts de fusion.

Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.



# **CHAPITER III**

## **Traitement Thermique des Soudures**

### I.4. Traitement Thermique des Soudures

Ce un processus consiste à élever la température d'un ou plusieurs matériaux après un processus de soudage. Ce traitement thermique est effectué pour atténuer les contraintes résiduelles, augmenter la résistance, augmenter ou diminuer la dureté et réduire le risque de fissuration. Malgré qu'il s'agit d'une opération à la fois longue et coûteuse. Il peut affecter la résistance et la ténacité d'un joint soudé, sa résistance à la corrosion et le niveau de contrainte résiduelle, mais il s'agit également d'une opération obligatoire spécifiée dans de nombreux codes et normes d'application. De plus, c'est une variable essentielle dans les spécifications de qualification d'un mode opératoire de soudage.

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différente de celles de métal de base. D'autre part, l'opération de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont, elles aussi, fonctions de procédés et des modes opératoires.

Qu'elles soient à caractère métallurgique et thermomécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement de service et les ensembles soudés sont utilisés à l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable ou nécessaire, ou bien encore il est obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être d'améliorer ou d'obtenir les propriétés jugées importantes vis-à-vis des conditions de service, ou d'éliminer ou simplement de réduire les contraintes résiduelles.

#### I.4.1. Traitement Thermique De Relaxation (recuit)

##### I.4.1.1 définition

Ce traitement Consiste à porter un métal à haute température, où se produit une recristallisation et/ou une transformation de phase puis un refroidissement lent, souvent dans un four de traitement thermique. Ce processus est effectué pour ramollir le métal après qu'il ait été durci, en utilisant par exemple le travail à froid, un recuit complet donnant la plus douce des microstructures. On note souvent une diminution du rendement et de la résistance à la traction, et dans le cas des aciers ferritiques, généralement une diminution de la ténacité.

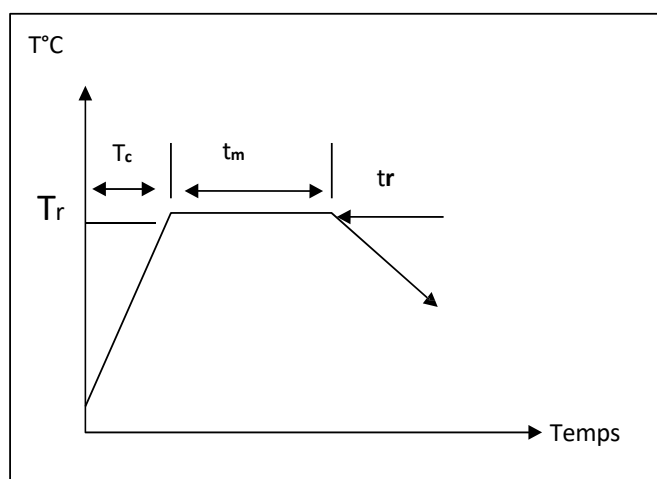
Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (Résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de:

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements 3 mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé
- Homogénéiser les textures hétérogènes
- Réduire les contraintes internes [2]

Le cycle thermique de recuit comprend les étapes suivantes :

- A) Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- B) Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- C) Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (Figure III.10).

La Figure III.10 présenté le principe Cycle Thermique d'un Recuit, Temps en fonction de Température.



Tr: température de recuit. tc: temps de chauffage. tm: temps de maintien

tr : temps de refroidissement.

Figure III.1 : Cycle Thermique d'un Recuit

### I.4.1.2 Différents types de recuit

En pratique, il existe quatre types élémentaires de recuits ceux-ci sont déterminée en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre [2].

**a) Recuit d'adoucissement :** ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à  $A1+80$ ) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine. Une deuxième variante de ce recuit se nomme « recuit de coalescence » conduisant à la structure globulaire des carbures dans une matrice ferritique [2].

**b) Recuit de normalisation :** le recuit de normalisation a pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes. Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes:

- 1- Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit  $AC3+50^\circ$  pour les aciers hypoeutectoïdes et  $AcCm+50^\circ$  pour les aciers hypereutectoïdes. Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.
- 2- Refroidissement en général à l'air calme.

Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de  $A3$  suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Appelé également perlitisation a pour objectif de produire une structure perlitique à grains fins régulièrement repartis, ce qui, pour un acier perlitique, correspond aux propriétés mécaniques optimales. Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage [2].

**c) Recuit de détente :** on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à  $A1$ . Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la

solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques.

Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier. Les températures sont très variables selon la nature de l'état d'origine de même que les temps de maintien. Les contraintes sont décroissantes du temps et de la température et ne disparaissent entièrement qu'au moment où la pièce atteint la température de recristallisation de la ferrite.

Cette opération visant à supprimer les contraintes résiduelles est également nommée relaxation. Ce recuit peut être effectué en plusieurs phases alternées avec des opérations d'usinage [2].

**d) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :** les pièces coulées en acier sont soumises en général à une vitesse de refroidissement relativement rapide. Elle conduit en effet à une hétérogénéité chimique, où les éléments d'alliages ne sont pas répartis d'une façon régulière dans la structure. On est donc en présence du phénomène de ségrégation qui peut avoir une incidence

négative sur les propriétés des aciers. Le recuit d'homogénéisation est appliqué pour remédier à ce phénomène d'hétérogénéité. Il est caractérisé essentiellement par une diffusion accélérée des éléments dans la structure utilisant notamment une température élevée durant un temps prolongé. Il consiste en pratique aux opérations suivantes:

- 1- Chauffage de la pièce avec une vitesse qui doit respecter l'état de l'acier (sa composition chimique, sa conductibilité thermique, sa forme et ses dimensions). La température du traitement doit être de son côté suffisamment élevée du domaine austénitique pour accélérer le processus de diffusion des éléments dans la structure de l'austénite. Elle est fixée à  $(AC_3 + 200^\circ)$  et  $AcCm + 200^\circ)$  respectivement pour les aciers hypoeutectoïdes et les aciers hypereutectoïdes.
- 2- Maintien prolongé à cette température. Le temps est calculé à l'aide des lois de la diffusion selon la nature des éléments d'alliages et les dimensions de la pièce.
- 3- Refroidissement à Vitesse Lente.

A la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains [2]

### I.4.2. Traitement Thermique Revenu

#### I.4.2.1 définition

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à

$AC_1$ , (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante (Figure III.11).

La Figure I.11 présenté le principe Cycle de Revenu, Temps en fonction de Température.

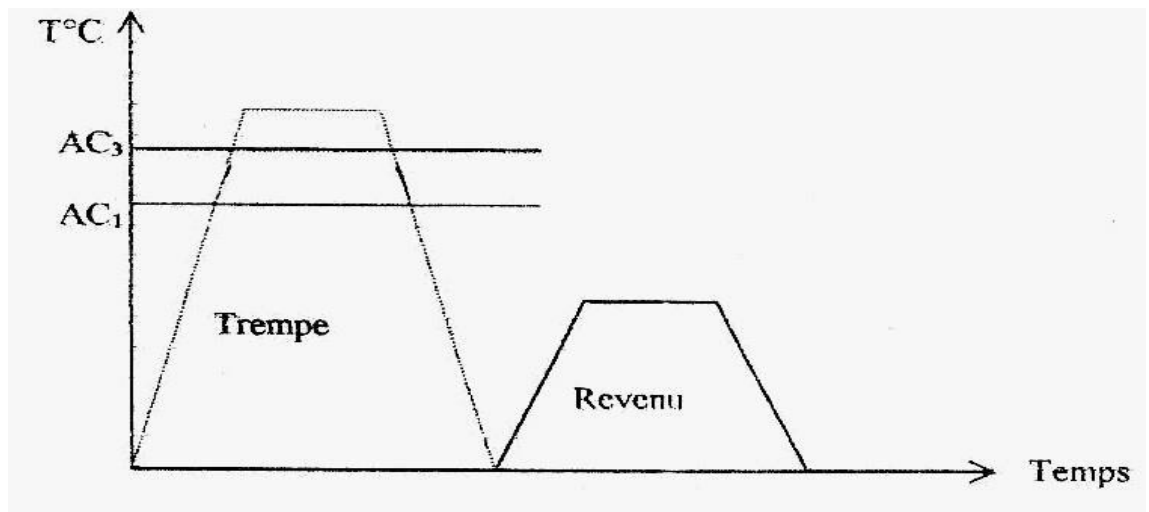


Figure III.2: Cycle de Revenu.[2]

Ce traitement est destiné à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable à froid, donc d'obtenir les propriétés mécaniques requises, c'est à dire la martensite se transforme en nouveaux constituants (sorbite, bainite).

Donc le revenu permet de supprimer les contraintes internes provoquées par la trempe, de diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Cette suppression de contraintes est d'autant plus complète que la température du revenu est plus élevée, c'est à dire, l'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 min à  $550^{\circ}C$ .

La vitesse de refroidissement après revenu, a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de  $600^{\circ}C$  produit des contraintes thermiques

nouvelles [2].

### I.4.2.2 Types de Revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

**a) Revenu de relaxation ou de détente :** il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [2].

**Revenu de structure ou classique :** dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et  $A_{c1}$ . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [2].

**b) Revenu de durcissement :** des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenus en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).[2]

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (Figure III.12).[2].

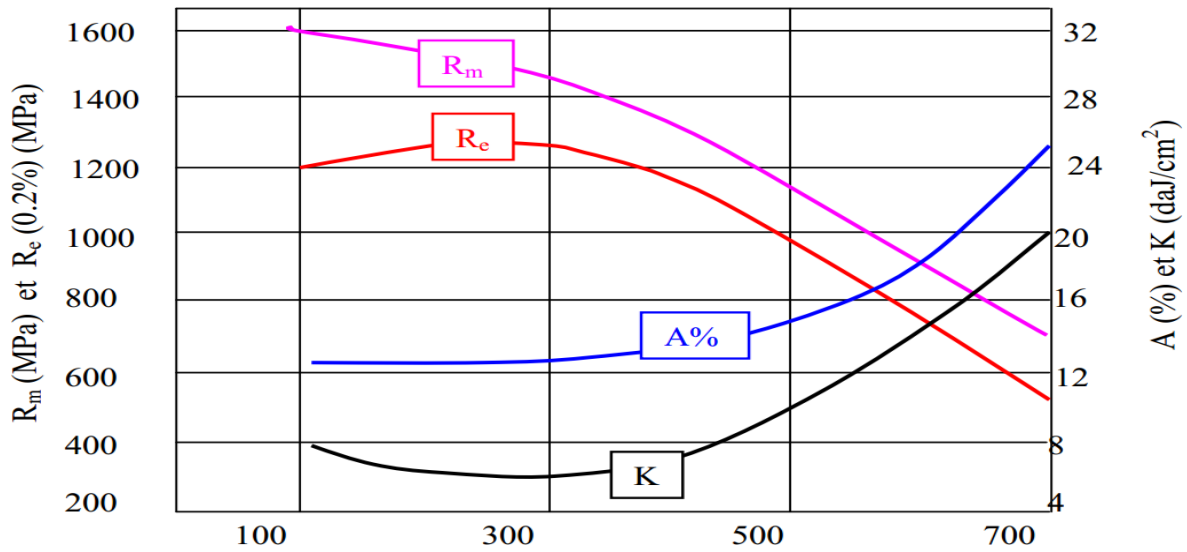


Figure III.3: Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu sur les aciers [2].

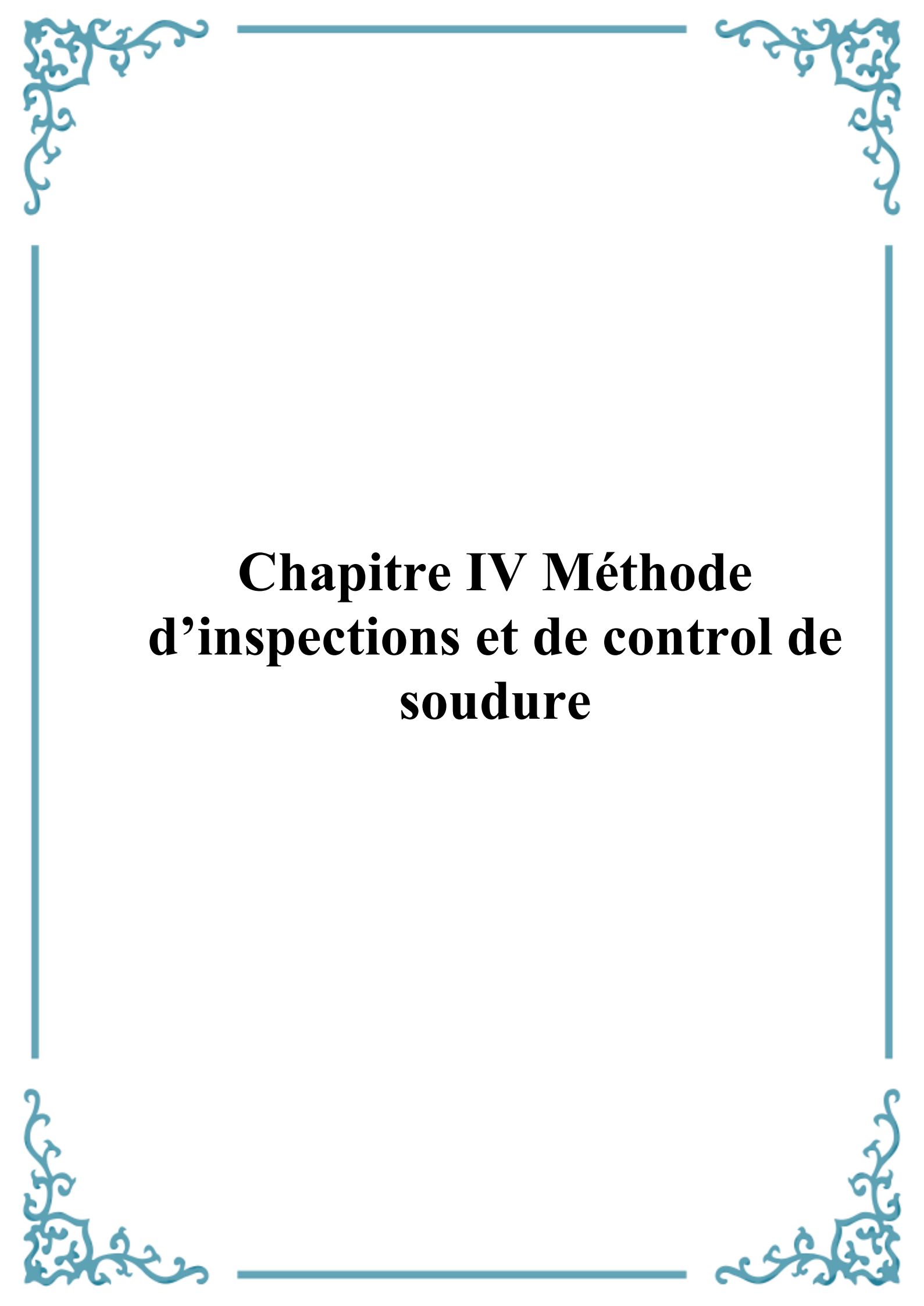
Le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 200° et 600°, puis d'un maintien à cette température pour permettre l'élimination des tensions dans toute la masse, suivi d'un refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes [2].

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions de base sur l'assemblage soudé, que ces avantages, et ces limites.

De plus, nous avons montré que le traitement thermique est une opération qui'il peut affecter la résistance et la ténacité d'un joint soudé, sa résistance à la corrosion et le niveau de contrainte résiduelle, mais il s'agit également d'une opération obligatoire spécifiée dans de nombreux codes et normes d'application. De plus, c'est une variable essentielle dans les spécifications de qualification d'un mode opératoire de soudage.

Dans le chapitre nous allons montrer le matériaux d'étude ainsi que les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser les joints de soudure ainsi que les traitements thermiques réalisés.



# **Chapitre IV Méthode d'inspections et de control de soudure**

### 1-Methode d'inspections et de control de soudure

#### 1-1- Examen visuel (VT)

##### 1-1-1- Introduction

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

En examen préalable, l'inspection visuelle d'un objet, d'une structure, d'un assemblage tel qu'une soudure permettra de guider un observateur expérimenté dans la définition d'une autre technique : choix de l'angle de tir en radiographie, direction de magnétisation, fréquence ultrasonore.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des hétérogénéités locales et superficielles (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures que nous allons examiner et qui justifient l'éclosion de toute une gamme de procédés de contrôle optique.[22]

##### 1-1-2- Éclairage

Dans tous les cas d'observation d'un objet, les conditions d'éclairage sont essentielles pour la fiabilité du contrôle optique. Il s'agit d'abord de se placer dans les conditions énergétiques. Il s'agit ensuite d'adapter le type et l'orientation de l'éclairage à la nature des défauts en vue d'améliorer le contraste. L'éclairage diffus, fourni par exemple par un ensemble de sources lumineuses placées derrière un écran dépoli, est utilisé dans la recherche de défauts variés, sans orientation définie. Par contre, pour détecter facilement les défauts du type rayures orientées, on doit préférer l'utilisation d'un éclairage directif ; enfin les défauts présentant un certain relief sont mis en évidence grâce à un éclairage rasant.

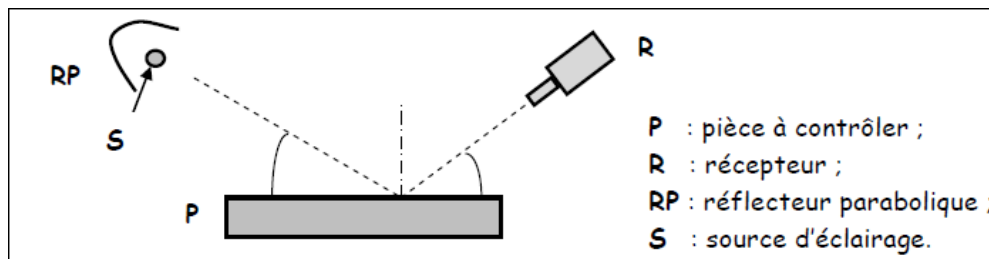


Figure IV.1: Contrôle visuelle d'une pièce

### 1-1-3- L'œil et ses limitations

L'œil est un capteur optique remarquable mais possédant toutefois des limitations dont il faut tenir compte en contrôle non destructif. La lecture d'une image associe en fait l'œil et le cerveau de l'observateur, initiant ainsi à la fois des problèmes objectifs et des problèmes subjectifs. Les premiers concernent l'aspect optique avec un paramètre principal qui est l'acuité, c'est-à-dire le pouvoir séparateur de l'œil ; on le situe entre 0,5 et 1 minute d'angle soit environ 50  $\mu\text{m}$  à une distance d'observation de 25 cm. Mais il ne s'agit là que d'une valeur moyenne, car l'acuité visuelle dépend de la nature de l'image (éclairage et contraste), ainsi que de l'individu à travers son pouvoir d'accommodation à la distance et à la luminance, pouvoir dont on connaît la décroissance avec l'âge de celui-ci.[22]

### 1-1-4- Aides optiques à la vision

Il s'agit des instruments d'optique permettant d'accroître les performances de l'œil ou encore plus généralement de donner la possibilité de contrôler des surfaces inaccessibles à la vision directe de l'observateur.

#### 1-1-4-1- Appareils optiques classiques

Les appareils optiques classiques permettent de repousser les limites de l'acuité visuelle. Il s'agit en premier lieu des loupes et des verres grossissants constitués généralement d'une ou deux lentilles donnant un grossissement allant de 1,5 à 20 fois environ. La loupe doit être tenue près de l'œil ; son champ et sa profondeur de champ diminuent fortement lorsque le grossissement s'accroît.

Pour un examen approfondi en laboratoire, on utilisera de préférence du matériel d'observation métallographique : loupe binoculaire à grossissement variable et éclairage incorporé, éventuellement microscope métallographique si l'on ressent la nécessité d'utiliser des grossissements importants, de 100 ou 1 000 et plus.

On note enfin que l'emploi des microscopes électroniques à balayage (MEB) n'est plus désormais réservé aux seuls spécialistes, ce qui devrait élargir son soutien au contrôle non destructif en laboratoire.[22]

#### Appareils optiques spécifiques

Des appareils optiques spécifiques ont été développés pour le CND.

**a- L'endoscope** est un appareil conçu pour pouvoir observer les surfaces non

directement accessibles à l'œil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité, d'un alésage ou d'un trou borgne. Mis au point à l'origine pour les examens liés au diagnostic médical, les endoscopes classiques à lentilles ont été remplacés par des transmetteurs d'image à fibres optiques

**b- Le stroboscope** est un appareil d'éclairage délivrant des brefs flashes lumineux à une cadence soutenue et réglable dans une gamme de plusieurs dizaines de coups par seconde. Il permet, en contrôle non destructif, l'examen visuel de pièces ou de produits en mouvement ; c'est ainsi qu'il a longtemps été utilisé pour l'examen de tôles en défilement dans les aciéries. Son utilisation systématique provoque toutefois une rapide fatigue visuelle pour les observateurs.[22]

### **1-2- Contrôle par ressuage (PT)**

#### **1-2-1- Introduction**

Le ressuage est une extension de l'inspection visuelle qui peut s'appliquer sur tout matériau à l'exception de certaines fontes qui présentent une surface poreuse.

C'est un terme qui désigne la sortie d'un fluide (liquide ou gazeux) d'une discontinuité dans laquelle ce fluide s'était précédemment accumulé au cours d'une opération d'imprégnation.

C'est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter des défauts débouchant en surface de pièce pour des matériaux non absorbants (alliages métalliques, matières plastiques, caoutchouc moulés, verres, certaines céramiques...).

Les défauts observés sont principalement : les reprises de coulée, les criques, les tapures, les microporosités, les décohésions et les reprises de fonderie. L'opération de ressuage peut s'effectuer à tous les stades d'élaboration d'une pièce (brut de fonderie, après usinage, après traitements thermiques...).

#### **1-2-2- Principe de ressuage**

La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce.

On lui laisse un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissantes à la surface, On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités.

Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface (effet buvard) et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.

L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité. Le pénétrant contient en général un produit coloré visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultra-violet).

### 1-2-3- Domaine d'application

Le ressuage est utilisé pour détecter d'éventuels défauts débouchant. Le ressuage peut s'utiliser dans de nombreux domaines, et pas seulement en chaudronnerie et en soudage. Le procédé est utilisé dans l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire, la fonderie, la mécanique, la tuyauterie ...

Des pièces soudées, usinées, moulées, brutes, peuvent être soumises à ce moyen de contrôle.

### 1-2-4- Produits de ressuage

Les produits de ressuage sont constitués par les pénétrants, les émulsifiants et les révélateurs.

- **Les pénétrants** font l'objet d'une classification selon la spécification américaine MIL I 25135 révision C ; les pénétrants fluorescents, qu'ils soient à post-émulsion ou directement lavables à l'eau, sont plus sensibles que les pénétrants colorés.
- **Les émulsifiants**, longtemps de type lipophiles à base de solvants pétroliers, peuvent être approvisionnés sous forme d'émulsifiants hydrophiles à diluer dans l'eau, permettant ainsi un meilleur réglage de la sensibilité du contrôle.
- **Les révélateurs** sont soit de type sec, soit de type humide, en suspension dans l'eau ou encore à support organique volatil. Le choix à faire dépend du type de contrôle ; en particulier, on utilise toujours un révélateur non aqueux en association avec un pénétrant coloré. Il existe enfin des révélateurs pelliculaires qui permettent de garder la trace des défauts.

Tous ces produits de ressuage sont vendus conditionnés de diverses façons et, en particulier, sous forme de récipients aérosols pour les contrôles à l'unité et sur site.

### 1-2-5- Fiabilité

La vérification de la fiabilité du contrôle par ressuage est en particulier indispensable lorsqu'il s'agit d'une chaîne manuelle ou automatique. Indépendamment des procédés d'assurance qualité concernant l'installation et les produits de ressuage mis en œuvre, on effectue des tarages périodiques basés sur l'utilisation de pièces de référence que l'on soumet au contrôle par ressuage. Il en existe plusieurs types : le test bloc en alliage d'aluminium (code ASME) est assez peu sélectif et peu réutilisable, les plaquettes nichrome, d'origine japonaise, sont facilement reproductibles et réutilisables ; les plaques billées recouvertes d'un chromage dur sont très utilisées en aéronautique mais ont l'inconvénient, comme les précédentes, d'avoir une surface quasi poli miroir trop parfaite pour renseigner sur la validité du pénétrant ou la saturation de l'émulsifiant.

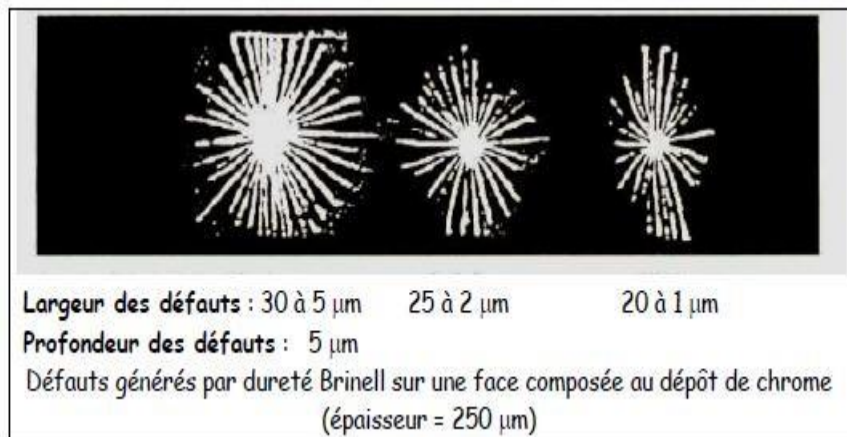


**Figure IV.2 :** Témoin pour examen de ressuage

### 1-2-6- Interprétations des résultats

Une estimation grossière de la fissure peut être faite grâce à la largeur de l'étalement du pénétrant sur le révélateur.

#### 1-2-6-1-Interprétation – Evaluation

C'est une erreur de confondre entre les deux termes « interprétation » et « évaluation ». Interpréter une indication c'est en trouver la cause (fissure, manque de liaison...). Evaluer l'indication c'est de juger de son importance aux efforts ultérieurs et de décider de son acceptation ou non.

### 1-2-6-2- Origine des indications

Toute apparition du pénétrant indique en principe la présence d'une discontinuité sur la surface.

### 1-2-6-3- Type d'indications

Les indications peuvent être classées en trois types :

#### a) Les vraies indications

Ce sont les seules indications soumises à une évaluation. Elles ont pour origine les discontinuités non prévues à la conception de la pièce ou non justifié par les conséquences normales des procédés de fabrication.

#### b) Les indications parasites

Il s'agit d'indications résultantes des discontinuités existant réellement mais dont on connaît l'origine qui est d'ordre conceptuel.

#### c) Les fausses indications

Elles sont en général pour origine une élimination incomplète de pénétrant restant en surface. L'absence d'indication est aussi une fausse indication (dégraissage incomplet de la pièce, présence de poussière, ...).

### 1-2-7- Significations des indications

Les indications observées en ressurgences peuvent être regroupées en 5 types :

a) Ligne continue : indication d'origine les fissures, les replis de forge, les rayures.

b) Ligne discontinue : indication apparaît lorsque la pièce subit une préparation mécanique ou toute autre opération qui peut enfermer une partie d'un défaut débouchant.

c) Forme arrondie : indications d'origine les défauts surfaciques de forme sphérique, (soufflure, piqûre, structure poreuse de la pièce...).

d) Tache ponctuelle : indication apparaissant surtout lors de contrôle des pièces moulées. Elle est d'origine la nature poreuse de la pièce, des piqûres ou de la structure grossière de la pièce.

e) Tache diffuse : Présence de micropore dans les pièces.



**Figure IV.3 :** Exemple de pièce observée

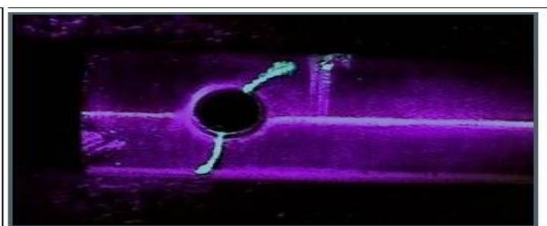


**Figure IV.4 :** Exemple de pièce

observée en en lumière blanche présentant un défaut défaut.

lumière UV présentant un

### 1-2-8- Les Avantages et Inconvénients

- \* Coût faible
- \* Facilité de mise en œuvre
- \* Facilité de lecture du défaut
- \* Fiabilité de l'analyse
- \* Impossibilité de détecter les défauts non débouchant

### 1-3- Controle pas magnétoscopie (MT)

#### 1-3-1- Introduction

A l'instar du ressuage, la magnétoscopie complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent peu visibles au ressuage malgré tout le soin apporté. Parfois même si les anomalies débouchant, le milieu ne permet pas d'avoir recours au ressuage (pièces immergées par exemple).

Lorsque le ressuage est insuffisant, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes : passage de courant électrique, passage de flux magnétique.

Les procédés magnétiques de contrôles non destructifs (figure II.14), permettent la détection des défauts superficiels débouchant ou non débouchant dans les matériaux ferromagnétiques (forgés, moulés, soudés, laminés...). [23]



**Figure IV.5 :** Appareille manuelle de contrôle par magnétoscopie.

### 1-3-2- Définition

Le principe de la magnétoscopie est exposé dans la norme NF A09-590, comme suit :

« L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé ».[23]

### 1-3-3- Principe de la méthode

Le principe consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique d'une intensité suffisante de manière à travailler dans une zone située au-dessus de la valeur maximale de la perméabilité magnétique du matériau.

Le champ magnétique nécessaire à la visualisation des criques est produit dans la pièce contrôlée soit par **aimantation directe** (figure IV.15) par passage d'un champ magnétique longitudinal (solénoïde) où la pièce est mise dans le champ au contact de pièces polaires, soit par **aimantation indirecte** (figure IV.16) (passage de courant) produisant un champ magnétique dans lequel se trouve placée la pièce.[23]

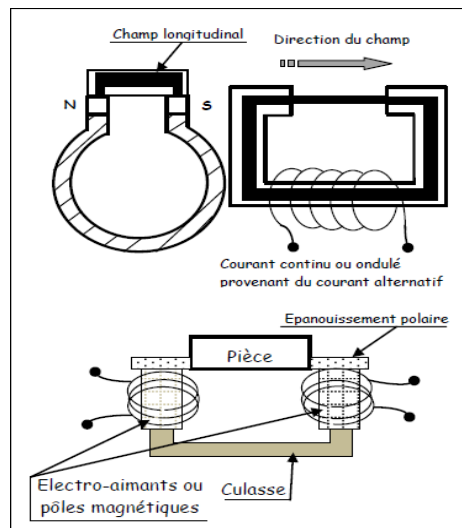


Figure IV.6 : Aimantation directe

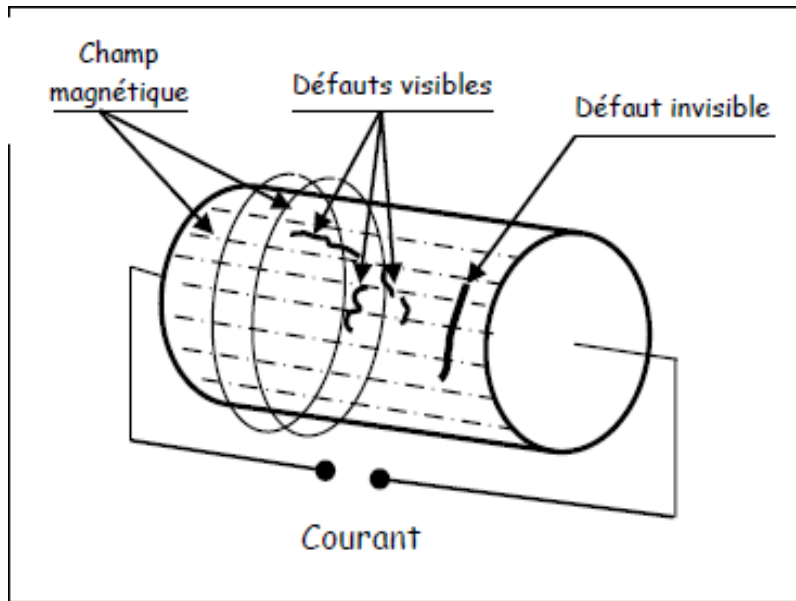


**Figure IV.7:** Aimantation indirect

Lorsqu'un défaut se situe dans la pièce, il crée un champ de fuite très intense du fait de la saturation du matériau.

Il est possible de visualiser le champ magnétique en pulvérisant sur la pièce un liquide à faible viscosité contenant en suspension des particules magnétiques suffisamment fines ( $< 30\mu$ ). Ces particules sont attirées au-dessus du défaut, de manière à s'opposer à la résistance magnétique de l'air par formation d'un « pont magnétique ». Ces accumulations de poudre sont détectables à l'œil.

Les défauts ne sont détectables que s'ils se trouvent placés perpendiculairement aux lignes de champs, d'où la nécessité de pratiquer au moins deux directions d'aimantation, si possible perpendiculaires.

Le liquide révélateur contient des particules d'oxyde de fer noir (5 à 10 g/l de pétrole).

Il existe des particules colorées aidant à la lecture du défaut par rapport à la teinte des pièces. On utilise également des produits fluorescents avec inspection en lumière ultraviolette (lampe de Wood).[23]

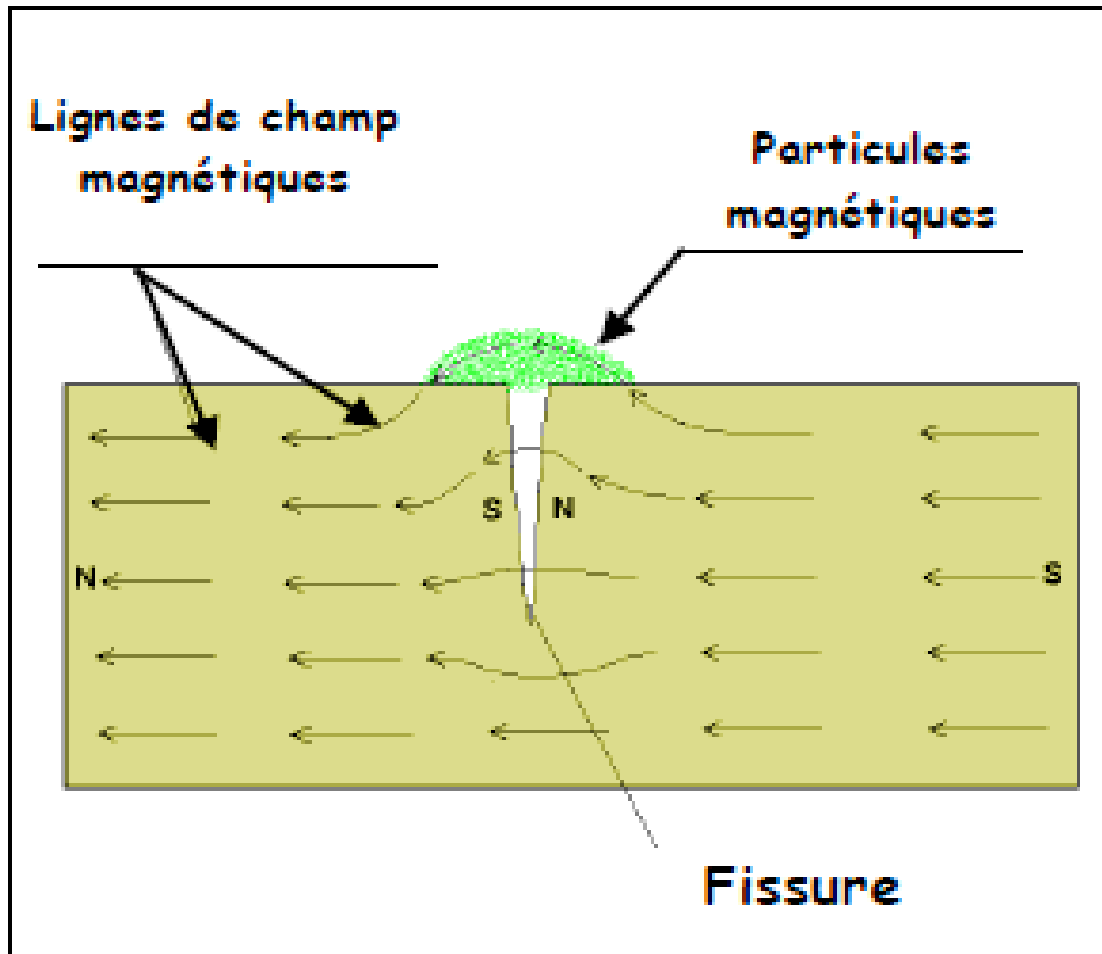


Figure IV.8 : Principe du contrôle par magnétoscopie

### 1-3-4- Produit utilise en magnétoscopie

Après avoir magnétisé la pièce, on a recours à un indicateur des défauts qui sera projeté à la surface à contrôler : généralement des fines **particules ferromagnétiques**. Celles-ci sont attirées et accumulées par les champs de fuites qui se comportent à leurs égards comme des minuscules aimants. Ces accumulations visibles de particules matérialisent donc les défauts en constituant ce qu'on appelle :

« Les spectres de défaut ».

Si le produit est appliqué lors de la magnétisation, la méthode est appelée méthode en continue, si le produit est appliqué après magnétisation la méthode est appelée la méthode résiduelle. [23]

### Caractéristiques des produits

Il est nécessaire que les particules aient les caractéristiques suivantes :

- Non toxique
- Ferromagnétique
- Haute perméabilité
- Faible rémanence
- Couleur contraste par rapport à la surface ;
- Graines de dimension satisfaisante et grande mobilité.

### 1-3-5- Conservation des spectres magnétiques

On a souvent besoin de conserver les indications données par le contrôle magnétoscopique à cet effet un grand nombre de méthodes existe permettant de fixer sur support soit plastique soit photographique.

Les spectres obtenus [23]:

- Réplique plastique.
- Techniques photographiques.
- Utilisation d'un ruban adhésif transparent.

### 1-3-6- Démagnétisation

Le principe de la démagnétisation consiste à soumettre un matériau à un champ magnétique inverse constamment d'intensité uniformément décroissante. L'intensité du champ résiduelle est ainsi ramenée à une valeur faible.

Il est essentiel de vérifier l'efficacité de la démagnétisation à l'aide d'un indicateur de champ portatif.

La nécessité de démagnétiser une pièce ou non après le contrôle par magnétoscopie dépend d'un certain nombre de facteurs. On peut estimer que l'opération est nécessaire pour l'une des conditions suivantes :

- La pièce fait partie d'un ensemble mobile (les particules adhérentes peuvent être à l'origine d'usure) ;
- Le champ résiduel peut influencer des équipements voisins dans le fonctionnement est basé sur le magnétisme ;
- La présence d'un champ résiduel peut être néfaste au nettoyage de la pièce.

La démagnétisation n'est pas nécessaire dans les cas suivants :

- La pièce est en acier doux (champ résiduel faible) ;
- La pièce va subir un traitement thermique ;
- Un deuxième contrôle par magnétoscopie est prévu.[23]

### **1-3-7- avantages et inconvénients**

#### **a - Avantages**

La méthode est relativement simple de mise en œuvre. Elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacentes et une appréciation de leur longueur.

Les différentes séquences de la mise en œuvre se prêtent bien à l'automatisation.

#### **b- Inconvénients**

La méthode ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction.

Elle ne permet pas une appréciation de la profondeur et l'interprétation dans la phase de révélation reste parfois très délicate : l'automatisation de cette dernière phase n'a pas encore vraiment débouché industriellement. Une désaimantation des pièces après contrôle est nécessaire pour les pièces exposées à un environnement sévère.[23]

### **1-4- Contrôle par radiographie (RT)**

#### **1-4-1- Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique**

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou  $\gamma$ ) permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive  $\gamma$  qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement. Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en traversant la paroi du matériau irradié. Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une variation de la densité optique

du film au droit de l'image du défaut.[24]

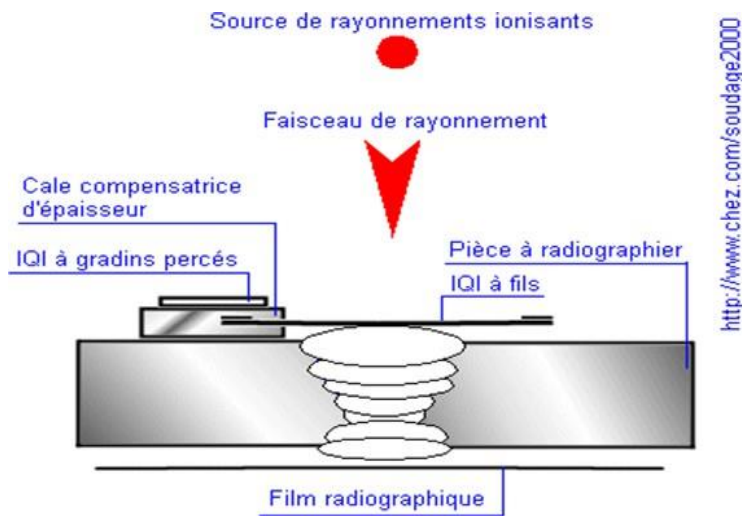


**Figure IV.9 :** Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique

### 1-4-2- Les sources de rayonnements

Les sources de rayonnements ionisants sont choisies en fonction de la nature des matériaux à contrôler, de l'épaisseur traversée, de la qualité d'image demandée et des conditions techniques de réalisation.

#### a- Le tube à rayons X :

Le tube radiogène ou tube de Coolidge est un tube en verre dans lequel règne un vide poussé. Il est alimenté en courant électrique et émet des électrons par échauffement d'un filament incandescent de tungstène de la cathode (potentiel négatif). Ce faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de volts) vers la cible de l'anode ou anti-cathode (potentiel positif). L'impact des électrons sur la cible ou foyer électronique ou foyer thermique génère 99% de chaleur et 1% de rayons X.

L'émission du rayonnement X résulte de la brusque décélération des électrons sur la cible métallique.

- La qualité du rayonnement est déterminée par la tension d'accélération en kV.
  - La quantité de rayonnement est définie par l'intensité du courant en mA.
- Plus le rayonnement est pénétrant (faible longueur d'onde), moins le contraste est élevé.

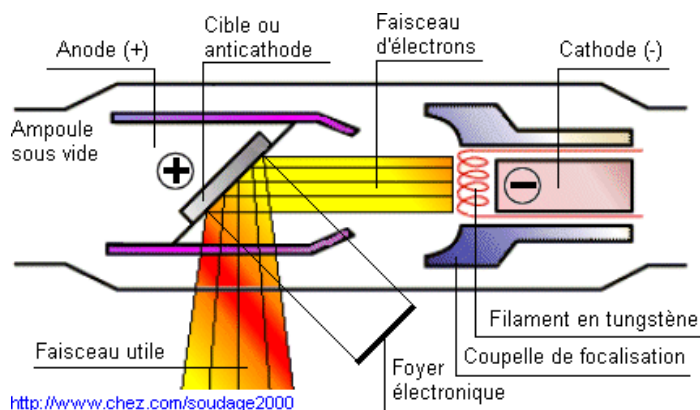


**Figure IV.10 : Schématisation du tube radiogène**

## b- La source radioactive à rayonnement gamma $\delta$ :

Les rayons  $\delta$  sont émis lors de la désintégration spontanée d'une particule qui compose le noyau atomique du radio-élément (radioactivité).

➤ La **qualité** du rayonnement est déterminée par la nature du radio-élément

➤ La **quantité** de rayonnement est définie par l'activité du radio-élément L'activité d'une source est exprimée en curie (Ci) ou en becquerel (Bq).

➤  $1 \text{ Tbq} (10^{12} \text{ Bq}) = 27 \text{ Ci}$

➤  $1 \text{ Ci} = 37 \text{ Gbq} (37 \times 10^9 \text{ Bq})$

L'activité d'un radio-élément décroît dans le temps. Chaque radio-élément a sa période de décroissance ou demi-vie. A chaque période de décroissance, l'activité de la source est divisée de moitié.[24]

**Tableau IV.1 : Les différents types de radio-éléments  $\delta$**

| Radioélément        |                   | Période   | Constante spécifique du radionucléide |                                  |                                  |
|---------------------|-------------------|-----------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|                     |                   |           | R/h <sup>-1</sup> à 1 m par Ci        | nA.kg <sup>-1</sup> à 1m par Gbq | mGy.h <sup>-1</sup> à 1m par Tbq |
| <u>Iridiu m 192</u> | <sup>192</sup> Ir | 74 jours  | 0,5 R/h <sup>-1</sup>                 | 0,97 nA.kg <sup>-1</sup>         | 135 mGy/h <sup>-1</sup>          |
| <u>Cobalt 60</u>    | <sup>60</sup> Co  | 5,27 ans  | 1,31 R/h <sup>-1</sup>                | 2,54 nA.kg <sup>-1</sup>         | 353,7 mGy/h <sup>-1</sup>        |
| <u>Césiu m 137</u>  | <sup>137</sup> Cs | 30 ans    | 0,35 R/h <sup>-1</sup>                | 0,68 nA.kg <sup>-1</sup>         | 94,5 mGy/h <sup>-1</sup>         |
| <u>Thuliu m 170</u> | <sup>170</sup> Tm | 127 jours | 0,0025 R/h <sup>-1</sup>              | 0,0048 nA.kg <sup>-1</sup>       | 0,675 mGy/h <sup>-1</sup>        |

Le radio-élément est placé dans une capsule scellée placée sur une porte source et dans un conteneur appelé projecteur de gammagraphie. L'utilisation de ce type de matériel est très réglementé, exige des compétences en radioprotection et la détention de source radiographique est strictement surveillée par la CIREA.

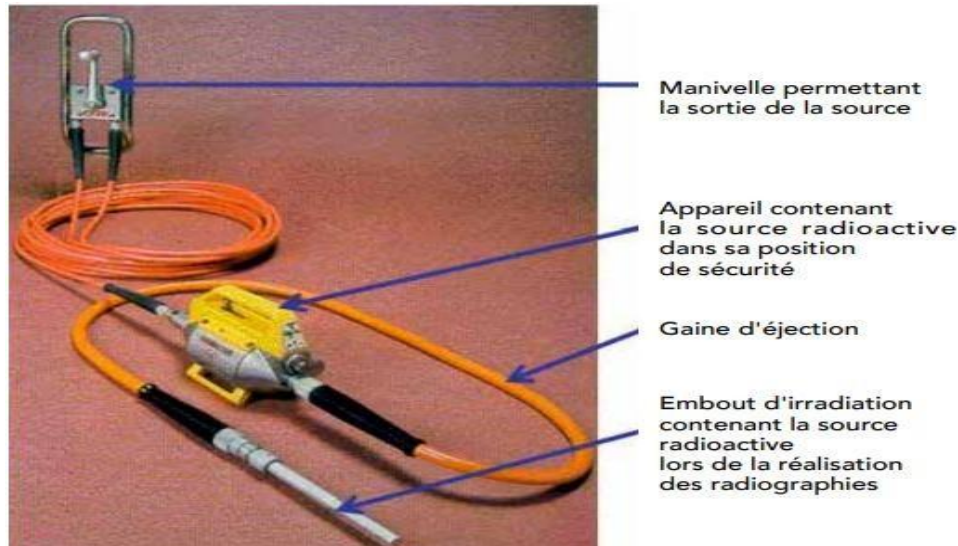


Figure IV.11: Source radioactive à rayonnement gamma $\delta$ .

### 1-4-3- Les films radiographiques

#### a- Structure d'un film

Les films radiographiques (figure IV.21) sont constitués d'émulsions photosensibles, contenant des halogénures d'argent (sels d'argent), coulées sur les deux faces d'un support plastique et protégées par une pellicule de gélatine de protection durcissant. Lors de l'exposition aux rayonnements ionisants, les sels d'argent sont ionisés ( $\text{Ag}^+$ ).

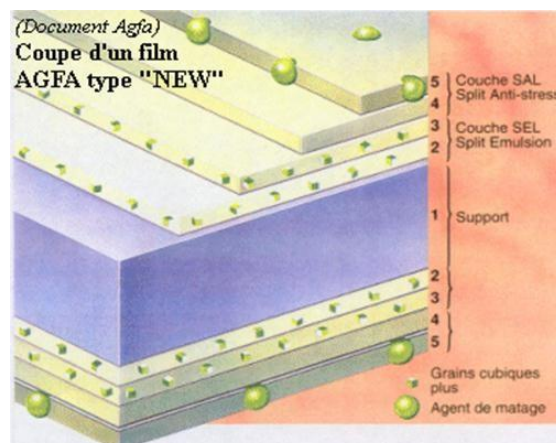


**Figure IV.12 :** Coupe d'un film AGFA type « NEW ».

Le développement des films dans le révélateur transforme les ions d'argent  $Ag^+$  en argent métallique noir. L'opération de fixage consiste à libérer tous les cristaux  $AgBr$  non ionisés.

La granulation du film définit sa sensibilité et sa rapidité d'exposition. Plus le grain est fin, plus le film est sensible à la détection des défauts et plus le temps de pose est long.[24]

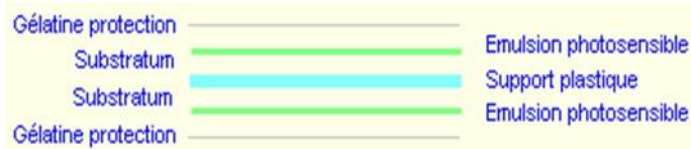


**Figure IV.13 :** Structure d'un Film. Radiographique.

**Tableau IV.2 :** Classification des films et coefficient de sensibilité.

| Typ | EN<br>584. | CO<br>DAP<br>95 | ISO<br>5579 | AST<br>M | DIN<br>5411 | BS<br>2600 | K    |
|-----|------------|-----------------|-------------|----------|-------------|------------|------|
| CX  | C6         | 4               | GIII        | 3        | G4          | FG-HC      | 0.65 |
| D8  | C6         | 4-5             | GIII        | 2        | G4          | FG-HC      | 0.65 |
| AA  | C5         | 4               | GIII        | 2        | G4          | FG-HC      | 1.00 |
| D7  | C6         | 4-5             | GIII        | 2        | G3          | FG-HC      | 1.00 |
| T20 | C4         | 3               | GII         | 1        | G2          | UFG-HC     | 1.90 |
| D5  | C4         | 3               | GII         | 1        | G2          | UFG-HC     | 1.90 |
| MX  | C3         | 3               | GI          | 1        | G2          | UFG-HC     | 3.10 |
| D4  | C3         | 3               | GI          | 1        | G2          | UFG-HC     | 3.10 |
| M   | C2         | 2               | GI          | 1        | G2          | UFG-HC     | 4.40 |
| D3  | C2         | 2               | GI          | 1        | G2          | UFG-HC     | 4.40 |

c- La densité optique d'un film :

La densité optique d'un film radiographique correspond au degré de noircissement du film. La densité optique est égale au rapport logarithmique de la lumière incidente par la lumière transmise. Plus le film est dense et noir et moins la lumière incidente est transmise.

Une densité optique de 3 correspond à un film qui transmet 1/1000 de la lumière incidente du négatoscope. La densité optique d'un film est comprise couramment entre 1,7 (relativement blanc et transparent) et 4,0 (relativement noir et opaque).[24]

Les rayonnements parasites

Les rayonnements diffusés et rétro-diffusés doivent être éliminés par un système de filtration et/ou de blocage. Un filtre est placé entre la pièce et la pochette de film pour filtrer le rayonnement diffusé par la pièce. Un écran de blocage en plomb est placé à l'arrière de la pochette de film pour arrêter le rayonnement rétro-diffusé.[24]

#### 4-4-5- Le flou géométrique

Le flou géométrique est une zone d'ombre créée autour de l'image radiographique du défaut. Pour atténuer ce flou, il faut augmenter les distances entre la source de rayonnement et la pièce à radiographier ou choisir des dimensions de foyer ou de source les plus faibles possible. Le flou géométrique est imposé à une valeur maximale de 0,2 mm en rayons X et de 0,3 mm en rayons  $\delta$  (Iridium 192.) [25]

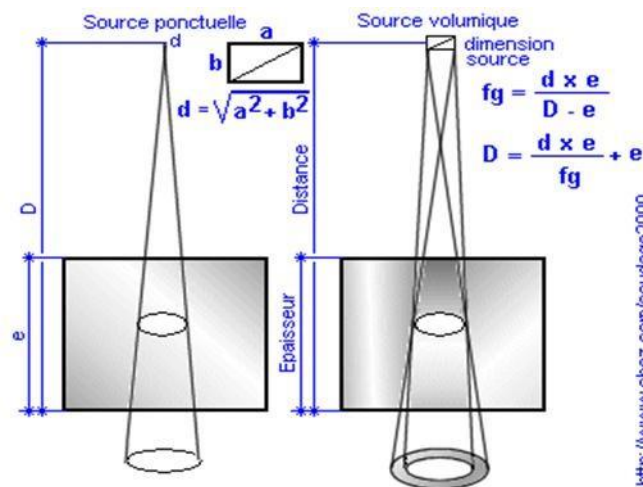


Figure IV.14 : Flou géométrique.

#### 4-4-6- La projection elliptique

Le contrôle radiographique de soudures circulaires de tubes de diamètre extérieur compris entre 30 mm et 100 mm est réalisé par un tir en ellipse ou projection elliptique. La source est décalée d'une distance par rapport à l'axe de la soudure. Deux expositions décalées à 90° sont réalisées pour le contrôle complet de la soudure. Le temps de pose est

déterminé sur les deux épaisseurs du tube traversées. La qualité d'image est déterminée à partir de la somme des deux épaisseurs de parois du tube. L'interprétation des deux cordons est réalisée simultanément.[25]

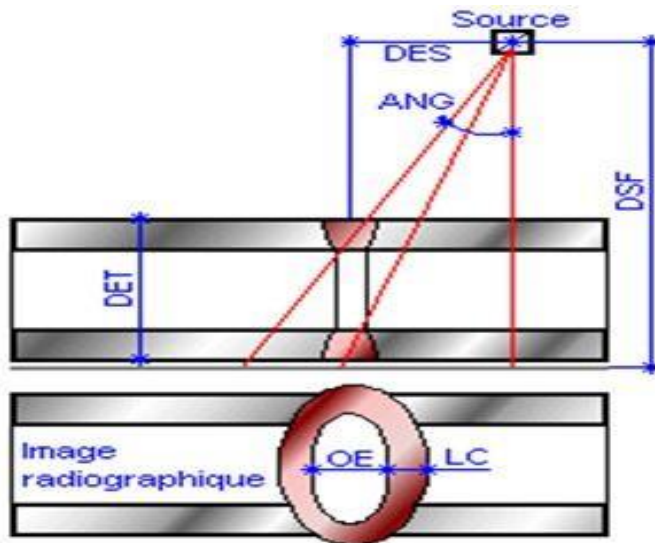


Figure IV.15 : Projection elliptique

### 4-4-7- Le tir au contact

Le contrôle radiographique de soudures circulaires de tubes de diamètre extérieur compris entre 90 mm et 500 mm est réalisé par un tir au contact. La source est placée sur la paroi extérieure du tube et le film est placé sur la paroi extérieure à l'opposé de la source. Plusieurs expositions sont réalisées pour le contrôle complet de la soudure. Le temps de pose est déterminé sur les deux épaisseurs du tube traversées. La qualité d'image est déterminée à partir de l'épaisseur de la paroi du tube avec sa surépaisseur de cordon.[25]

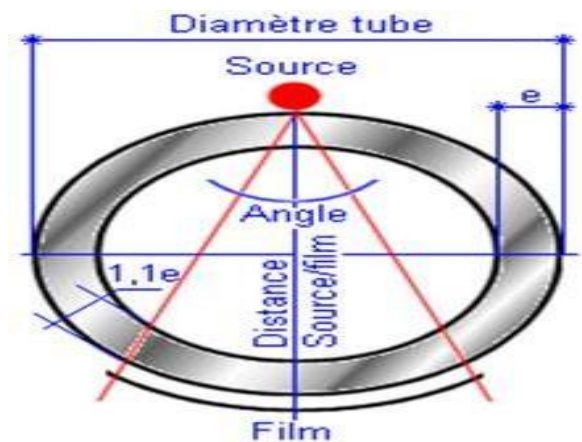


Figure IV.16 : Tir au contact.

### 4-4-8- Les indicateurs de qualité d'image (IQI)

L'indicateur de qualité d'image est un dispositif permettant de définir la qualité de la technique radiographique globale de l'image radiographique d'un film. La qualité d'image détermine le degré de détail d'une image radiographique sur un film. L'indicateur doit être placé de préférence côté source, posé sur la pièce à contrôler.

#### a- Les IQI à fils suivant NF EN 462-1

L'indicateur de qualité d'image à fils est repéré par un numéro en plomb (W1, W6, W10 et W13) correspondant au diamètre du fil le plus gros de la pochette. L'I.Q.I. est constitué d'une pochette en plastique translucide dans lequel sont placés 7 fils de diamètres calibrés précis et décroissants. Le matériau des fils doit avoir un coefficient d'absorption le plus proche du matériau à contrôler.



**Figure IV.17:** Indicateur qualité image a fils

**Tableau II.3 :** Indicateurs de qualité d'image a fils.

| 1 FE EN      |             | 6 FE EN      |             | 10 FE EN     |             | 13 FE EN     |             |
|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| N°<br>du fil | Ø fil<br>mm | N°<br>du fil | Ø<br>fil mm | N°<br>du fil | Ø fil<br>mm | N°<br>du fil | Ø<br>fil mm |
| 1            | 3,20        | 6            | 1,0<br>0    | 10           | 0,40<br>0   | 13           | 0,2<br>00   |
| 2            | 2,50        | 7            | 0,8<br>0    | 11           | 0,32<br>0   | 14           | 0,1<br>60   |
| 3            | 2,00        | 8            | 0,6<br>3    | 12           | 0,25<br>0   | 15           | 0,1<br>25   |
| 4            | 1,60        | 9            | 0,5<br>0    | 13           | 0,20<br>0   | 16           | 0,1<br>00   |
| 5            | 1,25        | 10           | 0,4<br>0    | 14           | 0,16<br>0   | 17           | 0,0<br>80   |
| 6            | 1,00        | 11           | 0,3<br>2    | 15           | 0,12<br>5   | 18           | 0,0<br>63   |
| 7            | 0,80        | 12           | 0,2<br>5    | 16           | 0,10<br>0   | 19           | 0,0<br>50   |

L'IQI à fils chevauche la soudure. Le plus petit fil doit être positionné vers l'extrémité de la zone radiographiée.

**b-** Les IQI à gradins et percés de trous suivant NF EN 462-2 :

L'indicateur de qualité d'image à gradins est repéré par un numéro en plomb (H1, H5, H9 et H13) correspondant à l'épaisseur du gradin et au diamètre du trou le plus gros. Les gradins inférieurs à 0,8 mm d'épaisseur sont percés de deux trous. Le matériau de l'IQI doit avoir un coefficient d'absorption le plus proche du matériau à contrôler.[25]



**Figure IV.18:** Indicateur qualité image a gradins

### 4-4-9- Le repérage des radiogrammes

Un système de repérage et d'identification des radiogrammes doit assurer une correspondance parfaite entre le film et la zone radiographiée.

Des lettres et chiffres en plomb ainsi que des rubans métriques utilisés pour assurer le marquage et l'identification des films. Ces marquages sont placés sur les pièces à contrôler.[25]

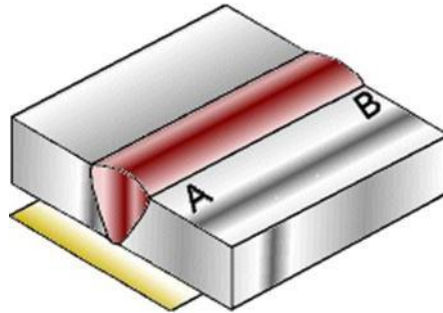


**Figure IV.19:** Repérage des radiogrammes

### 4-4-10- Les temps de pose

a- Les temps de pose aux rayons X :

Le temps de pose est déterminé par un abaque d'exposition spécifique à chaque poste à rayons

X. Cette abaque est défini pour un type de film donné, un type de chargement de

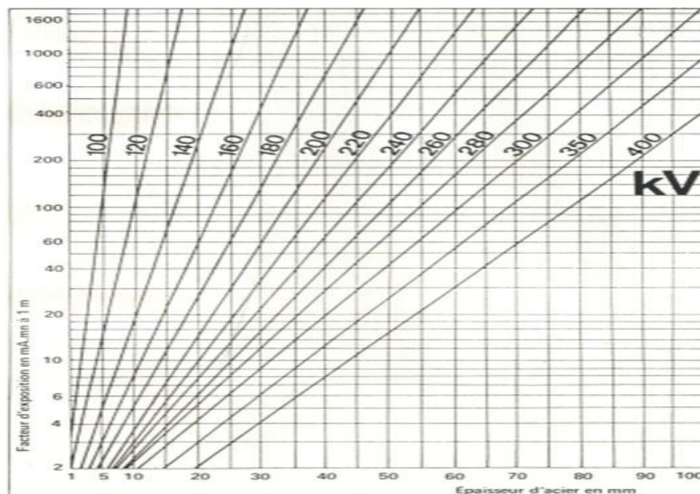


**Figure II.20 :** L'abaque de temps de pose aux rayons X

cassette de films avec ou sans écrans renforceurs, une densité optique donnée, une distance focale tube / film fixe, des conditions de développement et de traitement de films précises et un nombre de milliampères.[25]

Une modification d'un des paramètres ci-dessus oblige à refaire l'abaque de temps de pose.

### b- Les temps de pose aux rayons $\delta$ :

Le temps de pose est déterminé par la formule de calcul suivante :

- T : le temps de pose en heure
- Q : le facteur d'exposition en heure / curie
- D : la distance source / film en mètre
- K : le coefficient de rapidité du film
- N : le coefficient de densité optique
- S : le coefficient de renforcement
- A : l'activité de la source en Curie ou Giga-becquerel [25].

$$T = \frac{Q \times D^2 \times K \times N \times S}{A}$$

### 4-4-11- Avantages du contrôle par radiographie

- Facilité de détection des défauts internes des pièces.
- Rapidité relative d'obtention des résultats (de l'ordre de 15 minutes).
- Bonne sensibilité de détection des défauts.
- Traçabilité et archivage des résultats

### 4-4-12- Inconvénients du contrôle par radiographie

- Investissement important
- Limitation du contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé.
- Les opérateurs doivent être très expérimentés
- Les règles de sécurité sont rigoureuses et contraignantes
- Mise en œuvre délicate sur chantier avec tube à rayons X [25]

## 1-5- Contrôle par Ultrasons (UT)

### 1-5-1- Introduction

Le contrôle non destructif par ultrasons est un procédé de recherche du manque de matière (défaut) dans un matériau. Il permet de localiser et de dimensionner les discontinuités (défauts) à l'aide d'ondes acoustiques. Le contrôle US consiste à observer les échos produits par un manque de matière lors de la propagation d'une vibration de très haute fréquence et de très courte durée dans le matériau. La vibration est transmise et reçue par un même capteur appelé transducteur qui comporte un élément piézoélectrique apte à transformer un signal électrique en vibration mécanique et inversement. L'impulsion acoustique émise se propage dans tout le matériau et est réfléchiée par tout obstacle se trouvant sur son parcours. Le parcours de l'onde ultrasonore définit le faisceau acoustique : il est directif et limité dans l'espace. Il peut être utilisé sur pratiquement tout type de matériau.

Le contrôle de toute la pièce oblige l'opérateur à déplacer le traducteur qui est un dispositif électronique appelé aussi transducteur sur toute la surface de la pièce à contrôler.

Pour effectuer un examen ultrasonore d'une pièce mécanique l'opérateur doit fournir un certain nombre de choix :

- Matériels utilisés (appareil, traducteur, bloc de référence ...)
- L'exploration (balayage du traducteur)
- Sensibilité du contrôle
- Critères d'acceptation

Le matériel utilisé en contrôle par ultrason est léger et portable. Le contrôle par ultrasons peut être facilement mis en œuvre sur le site de production.[26]

### 1-5-2- Fonctionnement d'un appareil à ultrasons

Un générateur envoie des impulsions avec une fréquence de répétition de quelques centaines d'hertz grâce à une horloge qui excite un palpeur piézoélectrique sous des tensions de plusieurs centaines de volts. La réception, signal provoqué par l'écho, est très faible (quelques millivolts) ; elle s'effectue entre deux impulsions. Le signal de l'écho de retour est visualisé sur un écran par un système d'amplification performant (gain de 100 dB) à large bande pour diminuer le bruit. L'horloge commande une base de temps synchronisée par l'émetteur. Au niveau du palpeur, le signal est instantanément transformé en une onde ultrasonore. Lorsque le faisceau ultrasonore rencontre la face opposée de la pièce, il y a réflexion si un défaut se trouve sur le parcours du faisceau ultrasonore. Une partie des ultrasons est immédiatement réfléchi vers le palpeur, avant que la partie complémentaire n'ait atteint le fond de la pièce. Sur l'écran, on observe un écho intermédiaire qui révèle sa position et dont l'amplitude est fonction de la dimension et de l'orientation du défaut. Le contrôle par ultrasons utilise généralement les blocs d'étalonnage V1 et V2. Les normes NF A 09-310 et NF A 09-315 ont respectivement pour objet de définir les caractéristiques et de décrire les méthodes d'utilisation des blocs d'étalonnage A et B.[26]

#### 1-5-2-1- Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2

C'est un acier non allié dont la teneur en carbone est inférieure à 0.15%. L'indice de grosseur du grain ferritique G doit être supérieur ou égal à 8 et les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales et transversales sont respectivement de 5920 et 3255 m.s-1. L'écrouissage après usinage doit être minimale et la rugosité Ra inférieure à 3.2 µm.

# Chapitre IV Méthode d'inspections et de control de soudure

Le bloc d'étalonnage V1 est le plus complet. Il existe un modèle réduit et léger appelé V2 pour les applications sur chantier.[26]

**Tableau IV.4 :** Dimensions des blocs de référence v1 et v2 (en mm)

|                   | Bloc B « V1 » | Bloc V2 |
|-------------------|---------------|---------|
| Épaisseur         | 25            | 12.5    |
| Rayon de courbure | 100           | 50      |
| Largeur b         | 100           |         |
| Longueur a        | 300           |         |

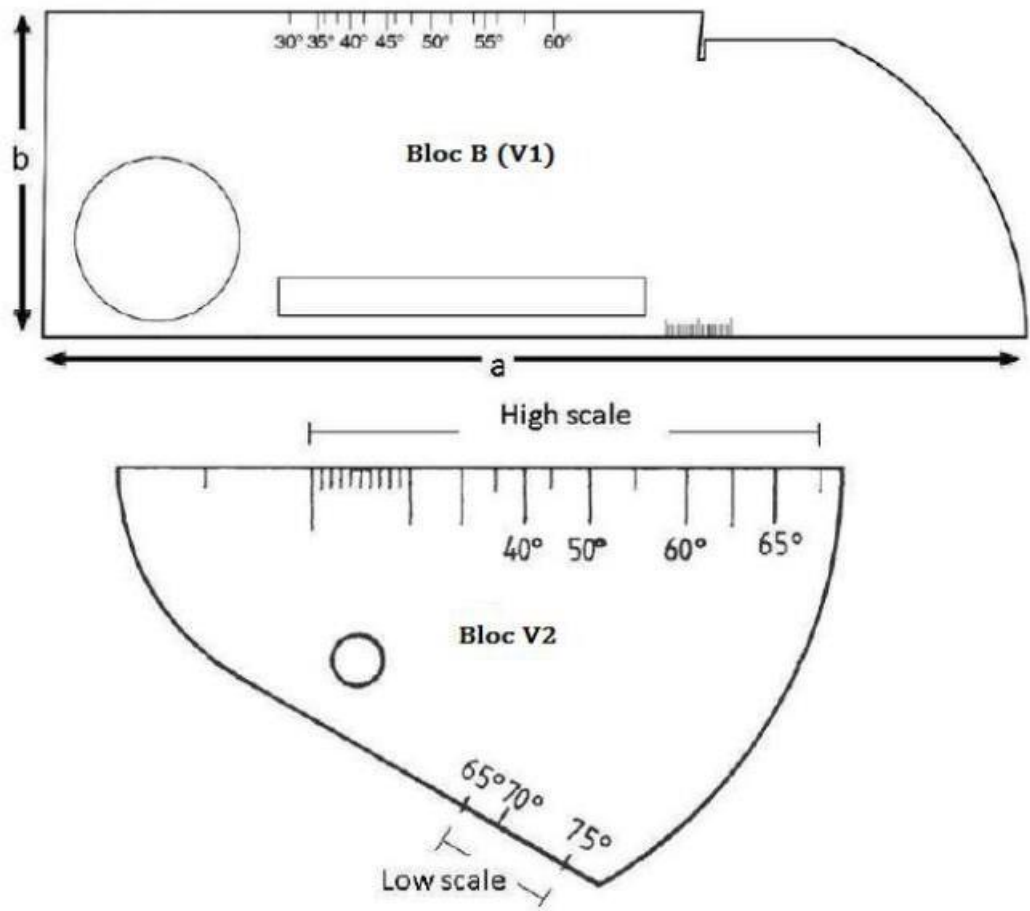


**Figure IV.21 :** Blocs d'étalonnage de type B et V2

Avant tout contrôle d'une pièce, il est nécessaire d'étalonner la base de temps du générateur à ultrasons et les caractéristiques du palpeur. Les blocs d'étalonnage sont utilisés

pour déterminer le point d'émergence du traducteur, l'angle de réfraction. Le réglage est plus précis lorsque le matériau à contrôler ne diffère pas de celui du bloc (acier ferritique faiblement allié).[26]

### **1-5-2-2-Ondes acoustiques**

Les ondes acoustiques sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans les milieux gazeux, liquides ou solides (pas de propagation dans le vide). Ces ondes résultent d'un ébranlement mécanique engendré par une source de vibration qui le communique au milieu considéré. Les ondes ultrasonores se déplacent difficilement dans l'air, un très bon contact doit être réalisé entre le transducteur et la surface de la pièce. On emploie un produit de couplage comme l'eau, l'huile ou de la glycérine.

La déformation qui accompagne ce mouvement est de nature élastique et les particules constituant le corps entrent en vibration autour de leur position d'équilibre. Les ondes ultrasonores constituent la partie supérieure du spectre des ondes acoustiques à partir du seuil d'audibilité (15 à 25 kHz) pour l'espèce humaine. Dans la pratique du contrôle des matériaux métalliques, les domaines de fréquences sont compris entre 1 et 15 MHz. Le plus petit défaut décelable est de l'ordre de la demi-longueur d'onde ; un hertz représente un cycle par seconde.

Problématique :

- Produire des vibrations.
- Mise en mouvement des particules dans le matériau.
- Propagation.
- Détection.[26]

#### **1-5-2-3- Principe de la méthode**

Il consiste à balayer une pièce par un faisceau pour déceler les défauts de discontinuité géométrique Il existe deux types de procédures d'analyse :

- Méthode par transmission
- Méthode par réflexion

#### **a- Examen par transmission**

Il nécessite l'utilisation de deux palpeurs : l'un émetteur et l'autre récepteur qui reçoit la quasi-totalité de l'énergie acoustique émise. Si un défaut se trouve dans le parcours du faisceau ultrasonore, l'énergie est partiellement ou totalement occultée.

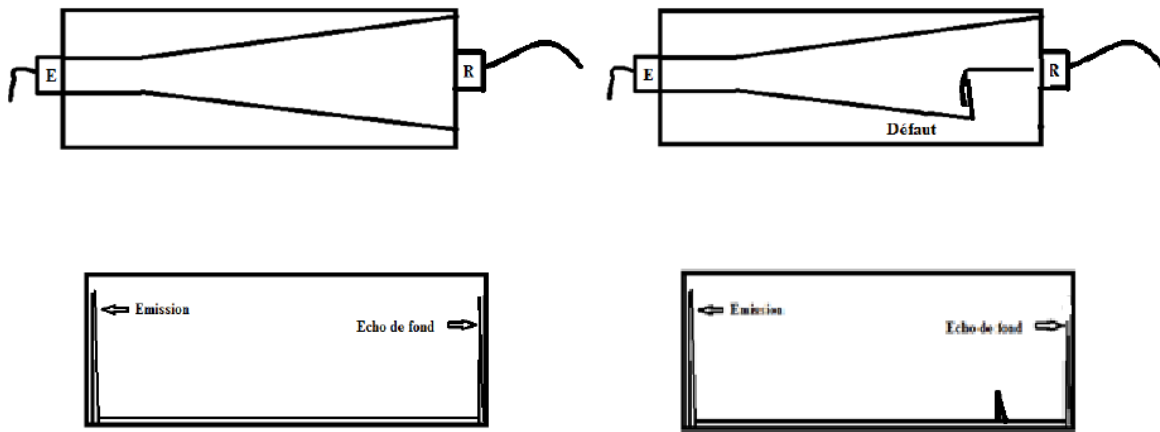


**Figure IV.22:** Examen par transmission

### **b-** Examen par réflexion

- La méthode est très utilisée, un seul palpeur joue le rôle d'émetteur et de récepteur. Les ondes ultrasonores sont émises de façon discontinue (impulsions brèves) pendant de très courtes périodes de temps comprises entre un et trois millièmes de seconde (microsecondes). Entre deux impulsions le palpeur reçoit les ondes réfléchies qui sont discriminées de l'émission dans le temps.

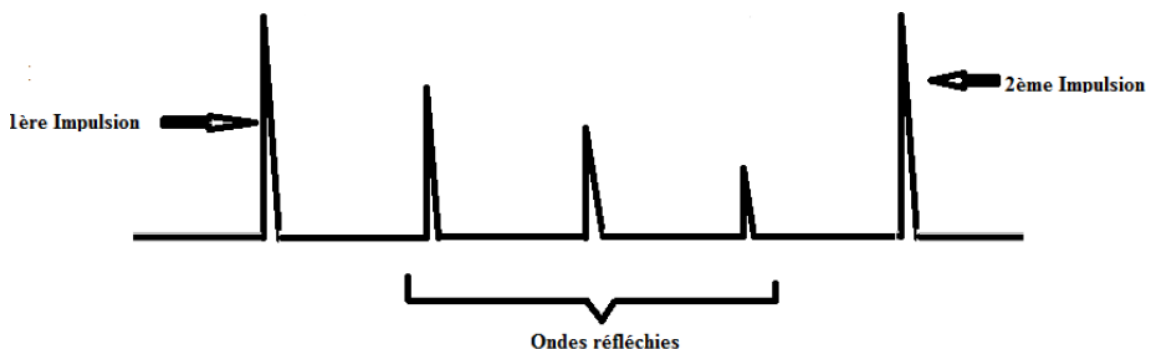


**Figure IV.23 :** Examen par réflexion

- Lorsque l'émission est modulée par impulsions, les signaux réfléchis par différents obstacles peuvent être séparés.

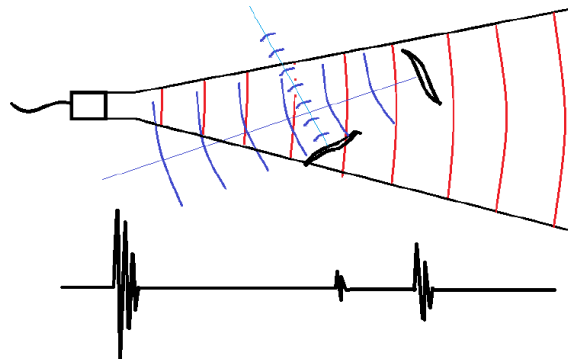


**Figure IV.24:** Signaux réfléchis par différents obstacles.

- La méthode permet de détecter un défaut à condition qu'il présente une surface réfléchissante normale au faisceau ultrasonore (réflexion spéculaire), sinon l'onde réfléchie revient au palpeur mais faiblement (l'écho n'est pas observé). L'étalonnage correct de la base de temps de l'écran de l'oscilloscope de l'appareil à ultrasons permet de déterminer la position du défaut.[26]

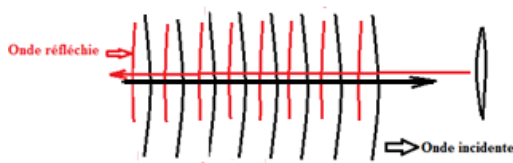


**Figure IV.25:** Réflexion spéculaire

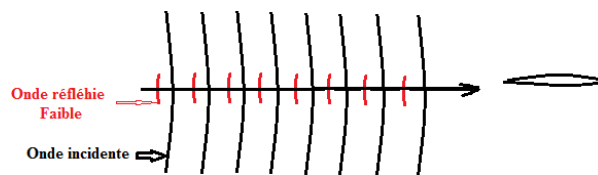


**Figure IV.26 :** Défaut parallèle à l'onde incidente.

### 1-6- Le contrôle par courants Foucault (ET)

#### 1-6-1- Définition de de contrôle par courants Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est largement utilisée dans la sidérurgie, l'aéronautique, l'automobile ou encore dans nucléaire. C'est l'une des nombreuses méthodes d'essais électromagnétiques utilisées en contrôles non destructifs (CND) faisant usage de l'induction électromagnétique pour détecter et caractériser les défauts de surface et de sous surface dans les matériaux conducteurs et dans les métaux plus spécifiquement.[20]

#### 1-6-2- Principe de contrôle par courants Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est basé sur la création des courants électriques dans le matériau à contrôler et sur l'observation de leur comportement.

Par application d'un champ magnétique variable situé près d'un matériau conducteur, les courants de Foucault sont créés, ils sont des boucles fermées de courants induits circulant dans des plans perpendiculaires au flux magnétique qui leur a donné naissance. Ils circulent parallèlement aux spires de la bobine et au plan de la surface.

Les courants de Foucault produisent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose au champ d'excitation. Le champ d'équilibre est alors affaibli, ce qui provoque un changement de l'impédance de la bobine. [20]

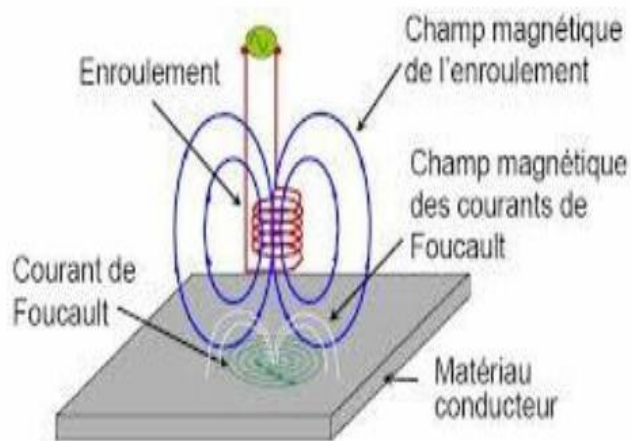


**Figure IV.27 :** Principe de contrôle par courants Foucault

### 1-6-3- Domaine d'application

Cette méthode de CND est souvent utilisée pour détecter des défauts superficiels car les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau) ; elle est donc appliquée au contrôle de tôles. Mais elle s'avère très performante pour le contrôle de structures cylindriques (barres, tubes).

Les courants de Foucault permettent également de déceler les variations de composition d'un alliage et même de mesurer des épaisseurs de revêtements. Il s'agit ainsi d'une méthode présente dans l'ensemble des industries mais en particulier dans celles de la fabrication de tubes et de la maintenance. [20]

### 1-6-4- Les avantages et inconvénients

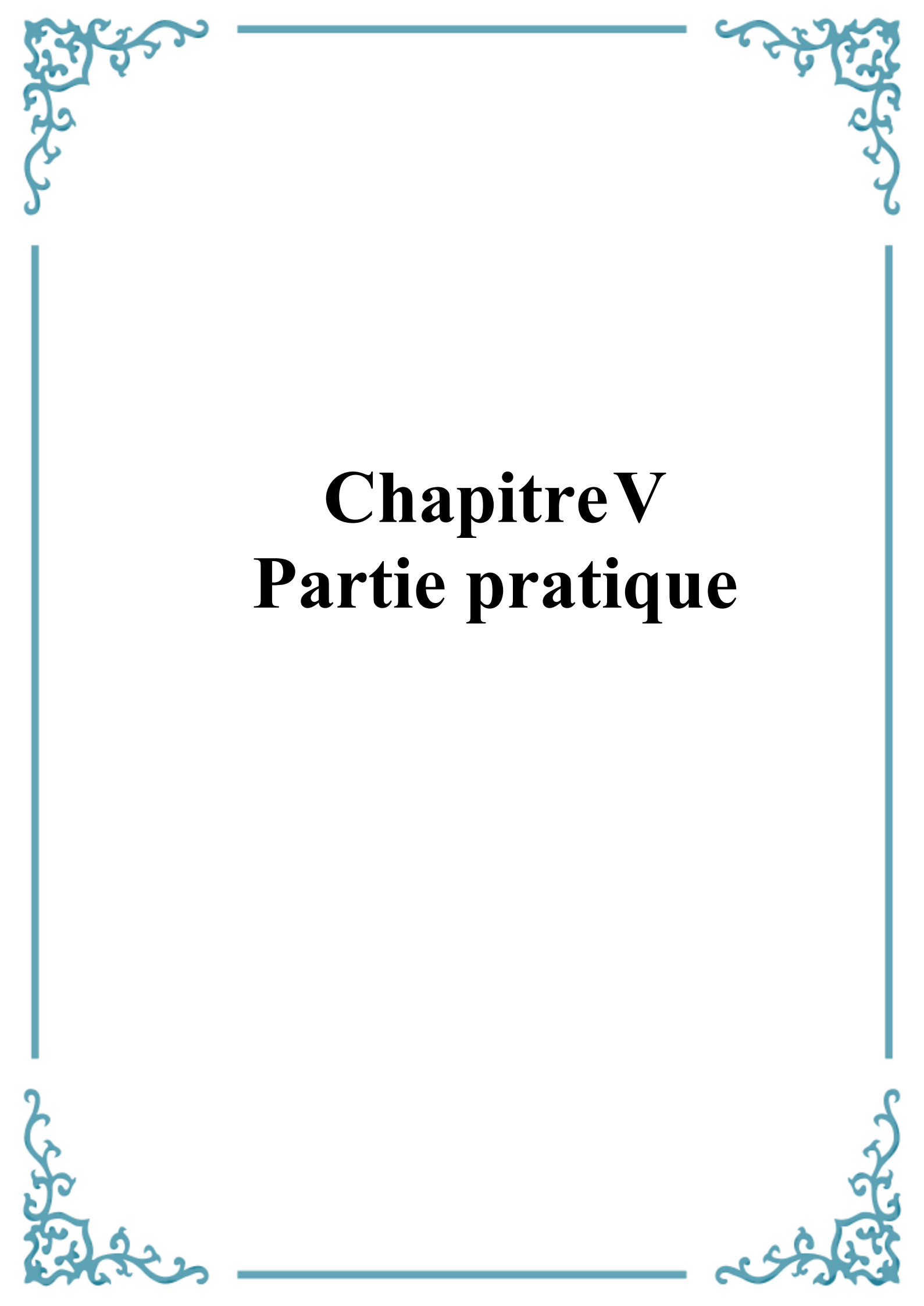
- \* Une préparation minimale des pièces est nécessaire.
- \* Peut détecter les défauts de surface et ceux près de la surface.
- \* La méthode peut être utilisée pour plus d'application que la seule détection de défauts.
- \* Des normes de références sont nécessaires pour la configuration.
- \* La finition et la rugosité de la surface peuvent interférer.[20]

### Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les principaux procédés de contrôle non destructif utilisés pour l'examen des soudures et des pièces métalliques, notamment le contrôle visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, les ultrasons et les courants de Foucault. Chacune de ces méthodes possède un domaine d'application spécifique, avec des avantages et des limites liés à la nature du matériau, au type de défaut recherché et aux conditions d'examen.

L'étude a montré que le choix de la méthode de contrôle dépend essentiellement de la localisation du défaut, de la sensibilité souhaitée et des exigences de qualité imposées à la pièce ou à l'assemblage. Ainsi, les techniques de surface comme le ressuage et la magnétoscopie complètent utilement l'examen visuel, tandis que la radiographie, les ultrasons et les courants de Foucault permettent une détection plus approfondie des discontinuités internes ou superficielles selon le cas.

Au final, l'efficacité du contrôle non destructif repose sur une bonne maîtrise du principe de chaque procédé, une préparation correcte des surfaces, un réglage approprié des paramètres d'examen et une interprétation rigoureuse des indications obtenues.



# **Chapitre V**

## **Partie pratique**

# Chapitre : Partie pratique

## 1. Introduction

La partie pratique de ce mémoire a pour objectif d'étudier expérimentalement l'influence du traitement thermique post-soudage sur la microstructure des soudures d'acier inoxydable 316L réalisées par deux procédés différents : le soudage TIG et le soudage à l'arc à l'électrode enrobée. Cette démarche expérimentale vise à relier les conditions opératoires de soudage, l'application d'un traitement thermique de détente et l'évolution des zones caractéristiques du joint soudé, notamment le métal fondu et la zone affectée thermiquement. L'intérêt de cette partie réside dans l'observation directe des modifications structurales induites par le cycle thermique, en s'appuyant sur des méthodes de contrôle non destructif, sur la préparation métallographique et sur l'examen microscopique des échantillons soudés.

## 2. Matériau étudié

Le matériau retenu pour cette étude est un acier inoxydable austénitique de type 316L, identifié également sous la désignation 1.4404, sous forme de plaques d'épaisseur 5 mm. Ce choix se justifie par l'emploi très répandu de cette nuance dans les secteurs industriels exigeant une bonne résistance à la corrosion, une tenue mécanique satisfaisante et une bonne aptitude au soudage. Afin de confirmer la nature du matériau utilisé, une analyse par spectrométrie de fluorescence X a été réalisée au préalable, puis comparée aux tableaux de référence des nuances usuelles, ce qui a permis de confirmer la correspondance avec l'inox 316L .



Figure 1 spectrométrie de fluorescence X XRF



Figure 2 les résultat de la spectrométrie

### 3. Préparation des échantillons

La première étape de la méthodologie expérimentale a consisté à préparer les éprouvettes destinées aux opérations de soudage. Les plaques d'inox 316L ont été découpées puis préparées avec des chants adaptés à l'assemblage, notamment avec une préparation en V lorsque cela était nécessaire pour assurer une bonne pénétration du cordon. Avant soudage, les surfaces ont été soigneusement nettoyées mécaniquement et chimiquement afin d'éliminer les contaminants susceptibles de perturber la qualité métallurgique de la soudure, comme les oxydes, les graisses ou les particules étrangères. Cette étape est essentielle dans le cas des aciers inoxydables, car la propreté de surface influence directement la stabilité de l'arc Electrode enrobée, la qualité du bain fondu et le risque d'apparition de défauts de surface ou internes.



*Figure 3 application de l'entaille V*



*Figure 4 application de la distance de penetration*

### Métal d'apport

Le métal d'apport joue un rôle essentiel dans la qualité finale du joint soudé, car il assure la continuité métallurgique entre les pièces assemblées et participe à la composition chimique du métal fondu. Dans le cas de l'inox 316L, le choix du métal d'apport doit être compatible avec la nuance de base afin de préserver la résistance à la corrosion, la stabilité microstructurale et les propriétés mécaniques du joint. Pour le soudage TIG de l'acier inoxydable austénitique, des métaux d'apport de type 308L ou 316L sont généralement utilisés selon l'application, tandis que l'usage d'un fil adapté permet de limiter la fissuration et d'améliorer l'aspect du cordon ainsi que la fluidité du bain fondu.



Figure 6 electrode enrober 308L



Figure 5 electrode 308L pour TIG

### 4. Soudage expérimental

Deux procédés de soudage ont été retenus dans cette étude afin de comparer l'effet de conditions thermiques différentes sur la structure finale du joint. Le premier procédé est le soudage à l'arc avec électrode enrobée, réalisé en courant continu pulsé avec une électrode E308L. Le second procédé est le soudage TIG, mis en œuvre avec une électrode tungstène contenant 2 % de lanthane, sous protection d'argon pur et en courant continu à polarité négative à l'électrode. Pour le procédé TIG, les paramètres mentionnés dans le poster indiquent une plage de courant comprise entre 80 et 120 A, une vitesse de soudage de 10 à 15 cm/min et l'utilisation d'un métal d'apport de 1,2 mm. Le choix de ces deux procédés permet de mettre en évidence l'influence de l'apport thermique, de la stabilité de l'arc Electrode enrobée et du mode de transfert de chaleur sur la géométrie du cordon, la zone affectée thermiquement et la microstructure obtenue après soudage.



Figure 7 soudage TIG



Figure 8 soudage ARC Electrode enrobe

### 5. Contrôles non destructifs

Après réalisation des assemblages, un ensemble de contrôles non destructifs a été mis en œuvre pour évaluer la qualité initiale des joints soudés avant traitement thermique. Le premier contrôle utilisé est le ressuage, méthode adaptée à la détection des défauts débouchants en surface tels que

les fissures, les porosités ouvertes ou certaines discontinuités superficielles. Le second contrôle est la radiographie aux rayons X avec une tension de 450 kV, destinée à examiner l'intérieur de la soudure et à détecter les défauts internes comme les inclusions, soufflures ou fissures internes. L'intérêt de cette étape est de vérifier la conformité des soudures réalisées avant d'engager les analyses métallographiques, afin de distinguer les effets du traitement thermique des défauts déjà présents après soudage.

#### Les résultats de control ressuage (FPI)

Le contrôle par ressuage fluorescent, ou FPI, est une méthode de contrôle non destructif utilisée pour mettre en évidence les défauts débouchant en surface, tels que les fissures, les porosités ouvertes ou les discontinuités superficielles au niveau du cordon de soudure. Cette méthode repose sur l'application d'un produit pénétrant fluorescent, suivie d'un révélateur qui fait ressortir les indications sous lumière adaptée, ce qui permet d'évaluer rapidement l'état de surface du joint soudé. Dans cette étude, les résultats obtenus par FPI montrent l'absence de toute indication de défaut, ce qui traduit une qualité satisfaisante des soudures examinées et confirme la bonne continuité de surface des assemblages réalisés



Figure 11 produit utiliser dans FPI



Figure 10 application de la procédure de contrôle PT

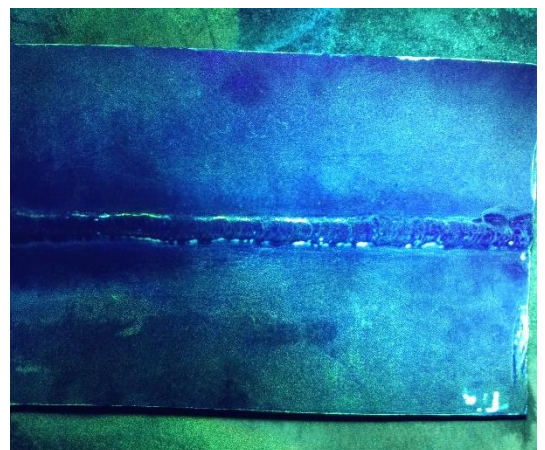


Figure 9 résultat obtenue sans défaut

### Résultats de control Radiographie

Le contrôle radiographique réalisé sur les soudures permet de mettre en évidence les défauts internes, tels que les porosités, les inclusions ou les fissures, grâce aux différences d'absorption des rayons X dans le métal soudé. Dans cette étude, les résultats obtenus montrent l'absence d'aucun défaut apparent sur les radiographies examinées, ce qui indique une bonne homogénéité interne des joints soudés et confirme la qualité globale des assemblages réalisés.



Figure 12 pose du film radiographique et IQ



Figure 13 machine radiographic 450KV



Figure 14 film radio des éprouvettes

### Contrôle par ultrasons

Le contrôle par ultrasons a été utilisé pour vérifier l'intérieur des soudures et détecter d'éventuels défauts non visibles en surface, tels que les fissures, les inclusions ou les porosités. Dans cette étude, les résultats obtenus au contrôle ultrasonore n'ont révélé aucun défaut, ce qui confirme la bonne qualité interne des joints soudés et l'absence d'indications anormales dans la zone contrôlée.



Figure 16 test ultrason



Figure 15 test ultrasonic

### Le découpage

Le découpage des tôles soudées a été réalisé par fil d'électroérosion (ECD) afin de préserver au maximum les caractéristiques du matériau et d'éviter tout échauffement local important pendant la séparation des échantillons. Cette méthode est particulièrement adaptée aux matériaux conducteurs, car elle permet une découpe précise avec une zone affectée thermiquement très faible, ce qui limite toute modification de la microstructure et conserve l'état métallurgique initial de la soudure.



Figure 19 machine de découpage a fil ECD

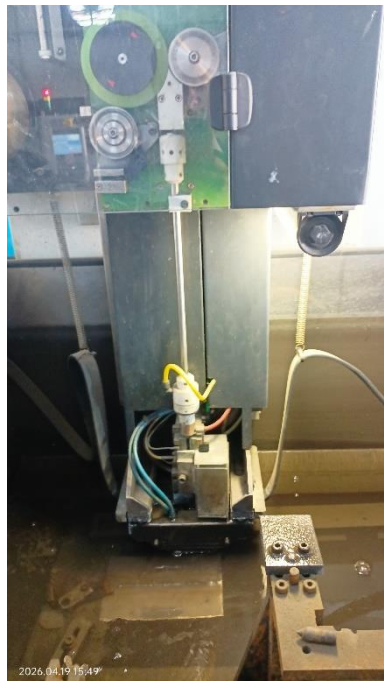


Figure 18 l'operation de decoupage



Figure 17 les eprouvette de étude

### 6. Traitement thermique appliqué

Le traitement thermique retenu dans le cadre de cette étude est un revenu de détente réalisé à 1050 °C pendant 1 heure. Ce traitement a pour objectif principal de réduire les contraintes résiduelles générées par le soudage TIG ou à l'arc Electrode enrobe, tout en évitant autant que possible des transformations défavorables susceptibles de fragiliser le matériau. Après maintien à température, les échantillons ont subi un refroidissement lent au four afin de stabiliser la microstructure avant les observations ultérieures. Le recours à un traitement de détente est cohérent avec les objectifs du travail, car il permet d'évaluer dans quelle mesure la relaxation des contraintes et la modification des états microstructuraux locaux influencent l'homogénéité du joint soudé.



Figure 21 sortir les éprouvettes du four



Figure 22 le contrôleur du four



Figure 20 les éprouvettes en refroidissement à l'air

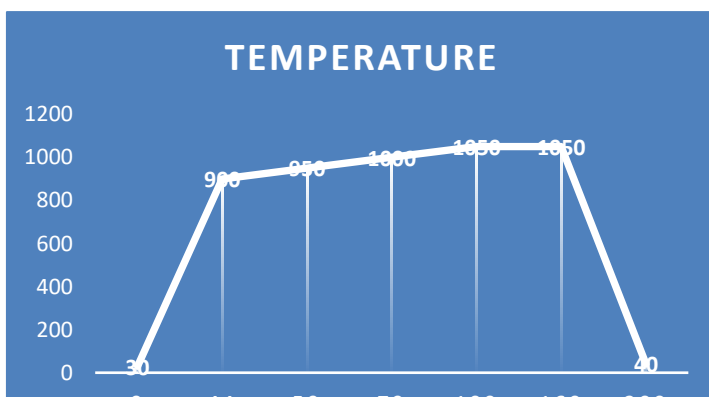


Figure 23 la courbe du traitement thermique de la température en fonction des minutes

### 7. Préparation métallographique

Une fois les contrôles terminés et le traitement thermique appliqué, les échantillons ont été préparés pour l'observation microstructurale. Cette préparation a été réalisée à l'aide d'une polisseuse permettant d'obtenir une surface plane, lisse et exempte de rayures, condition indispensable à une bonne révélation de la microstructure après attaque chimique. La qualité de cette étape est déterminante, car une mauvaise préparation peut masquer les limites de grains, altérer la lecture de la zone fondue et conduire à une interprétation erronée des effets du traitement thermique.



Figure 26 decoupeuse echantillon



Figure 24 echantillon avant enrobage



Figure 25 echantillon enrober



Figure 27 machine enrobage resine a chaud



Figure 29 polisseuse automatique



Figure 28 polisseuse manuelle



Figure 30 echantillon aprer polissage

### Attaque chimique

L'attaque chimique des échantillons a été réalisée par électrolyse à l'acide oxalique à l'aide de l'appareil Electromet, afin de révéler nettement la microstructure de l'acier inoxydable et de faire ressortir les joints de grains ainsi que les zones modifiées par le soudage. La solution d'attaque a été préparée en mélangeant 10 g d'acide oxalique avec 100 mL d'eau distillée, ce qui correspond à une solution à 10%, adaptée à l'attaque électrolytique des aciers inoxydables. Cette méthode a été choisie pour obtenir un contraste métallographique satisfaisant tout en limitant le risque de surattaque, afin d'avoir de bons résultats lors de l'observation microscopique



Figure 33 machine d'électrolyse

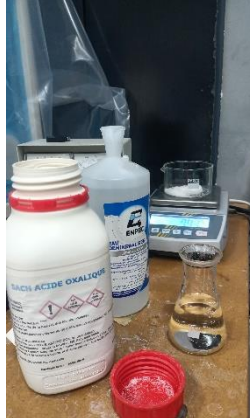


Figure 32 les substances d'attaque chimique



Figure 31 échantillon après attaque chimique

### 8. Observation microscopique

L'analyse microstructurale a été menée au microscope optique Olympus PX51M. Cette observation permet d'examiner la taille des grains, l'aspect du métal fondu, l'étendue de la zone affectée thermiquement, la répartition éventuelle de certaines phases et l'évolution générale de la soudure après traitement thermique. La comparaison entre les soudures brutes et les soudures traitées thermiquement permet ainsi d'identifier les modifications introduites par le revenu de détente et de discuter leur influence sur l'homogénéité



Figure 34 microscope optique Olympus PX51M

### Resultat obtenue Pour les echantillon souder TIG Sans traitement

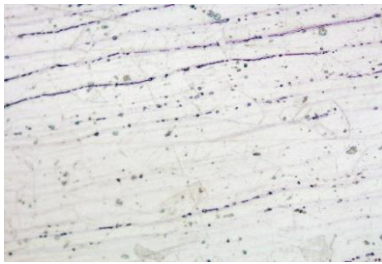


Figure 37 metal de base

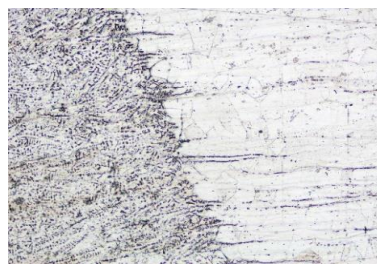


Figure 36 ZAT



Figure 35 metal d'apport

### souder TIG Avec traitement thermique



Figure 40 metal de base

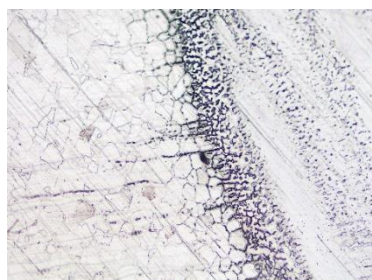


Figure 38 ZAT



Figure 39 metal d'apport

### Pour les echantillon souder ARC Electrode enrobe Sans traitement



Figure 43 metal de base

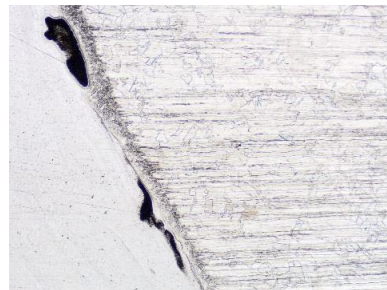


Figure 42 ZAT

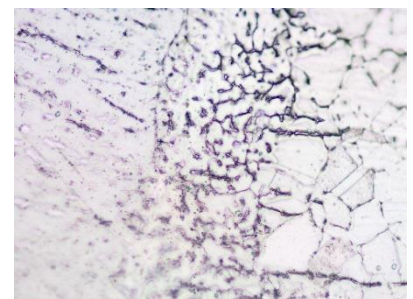


Figure 41 metal d'apport

### Pour les echantillon souder ARC Electrode enrobe avec traitement



Figure 38 metal d'apport



Figure 39 zat

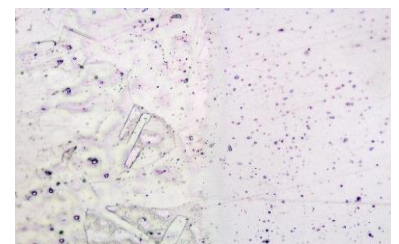


Figure 40 metal de base

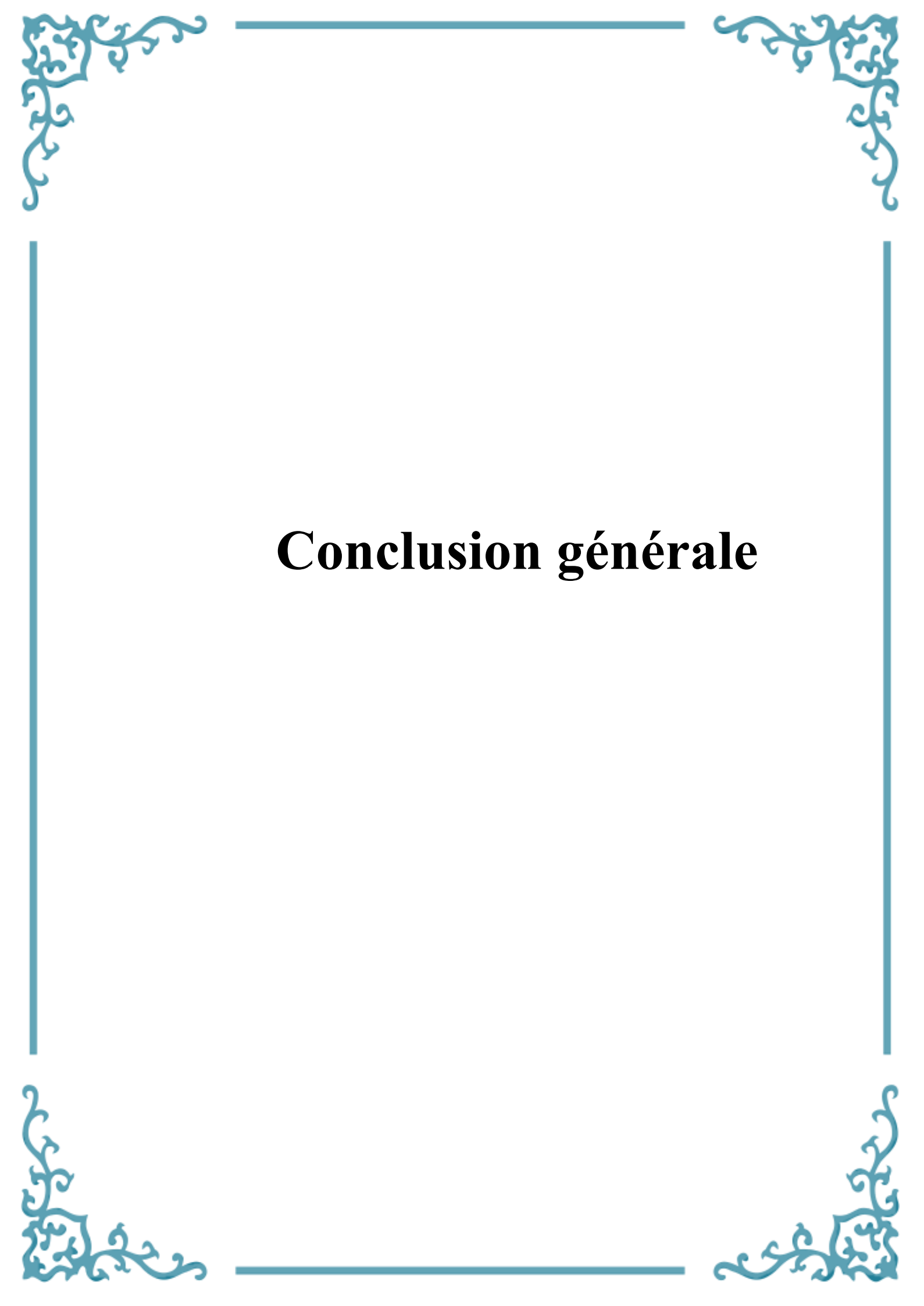
### Discussion des résultats

L'observation métallographique des échantillons soudés par les procédés TIG et ARC Electrode enrobe montre clairement que la microstructure varie selon la zone examinée, à savoir le métal d'apport, la zone affectée thermiquement et le métal de base. Cette différence est attendue, car le cycle thermique du soudage modifie localement la structure de l'acier inoxydable et crée une hétérogénéité entre les différentes parties du joint. L'effet du traitement thermique apparaît ensuite comme un facteur de stabilisation, capable de réduire certaines tensions internes et d'atténuer les contrastes microstructuraux entre les zones soudées.

Pour les échantillons soudés par TIG, l'état sans traitement présente généralement une microstructure plus marquée par l'effet direct de la fusion et du refroidissement rapide, ce qui peut conduire à une zone fondue plus contrastée et à une ZAT plus visible. Après traitement thermique, l'aspect microstructural devient plus homogène, ce qui suggère une redistribution plus stable des contraintes internes et une meilleure relaxation de la structure locale. Le procédé TIG, grâce à son apport thermique plus contrôlé, tend aussi à produire une soudure plus propre et plus régulière, ce qui facilite l'interprétation métallographique.

Pour les échantillons soudés par ARC Electrode enrobée, les observations montrent en général un effet thermique plus intense que celui du TIG, ce qui peut entraîner une zone affectée thermiquement plus large et une microstructure plus perturbée avant traitement. Après traitement thermique, la soudure devient plus stable sur le plan métallurgique, avec une amélioration de l'aspect de la ZAT et une diminution des hétérogénéités locales. Cette évolution confirme que le traitement thermique joue un rôle important dans l'amélioration de la qualité métallurgique des joints soudés, en particulier lorsque le procédé de soudage introduit un apport thermique plus élevé.

Globalement, les résultats obtenus montrent que le traitement thermique post-soudage améliore la microstructure des soudures en inox 316L en rendant les zones soudées plus homogènes et plus stables. La comparaison entre TIG et ARC Electrode enrobée suggère également que le TIG offre un meilleur contrôle du bain fondu et donc une microstructure plus régulière, tandis que le soudage ARC Electrode enrobée reste plus susceptible de générer des variations locales plus marquées. Ces résultats sont cohérents avec la littérature qui montre que la maîtrise du cycle thermique est essentielle pour préserver les propriétés des soudures inoxydables.



# **Conclusion générale**

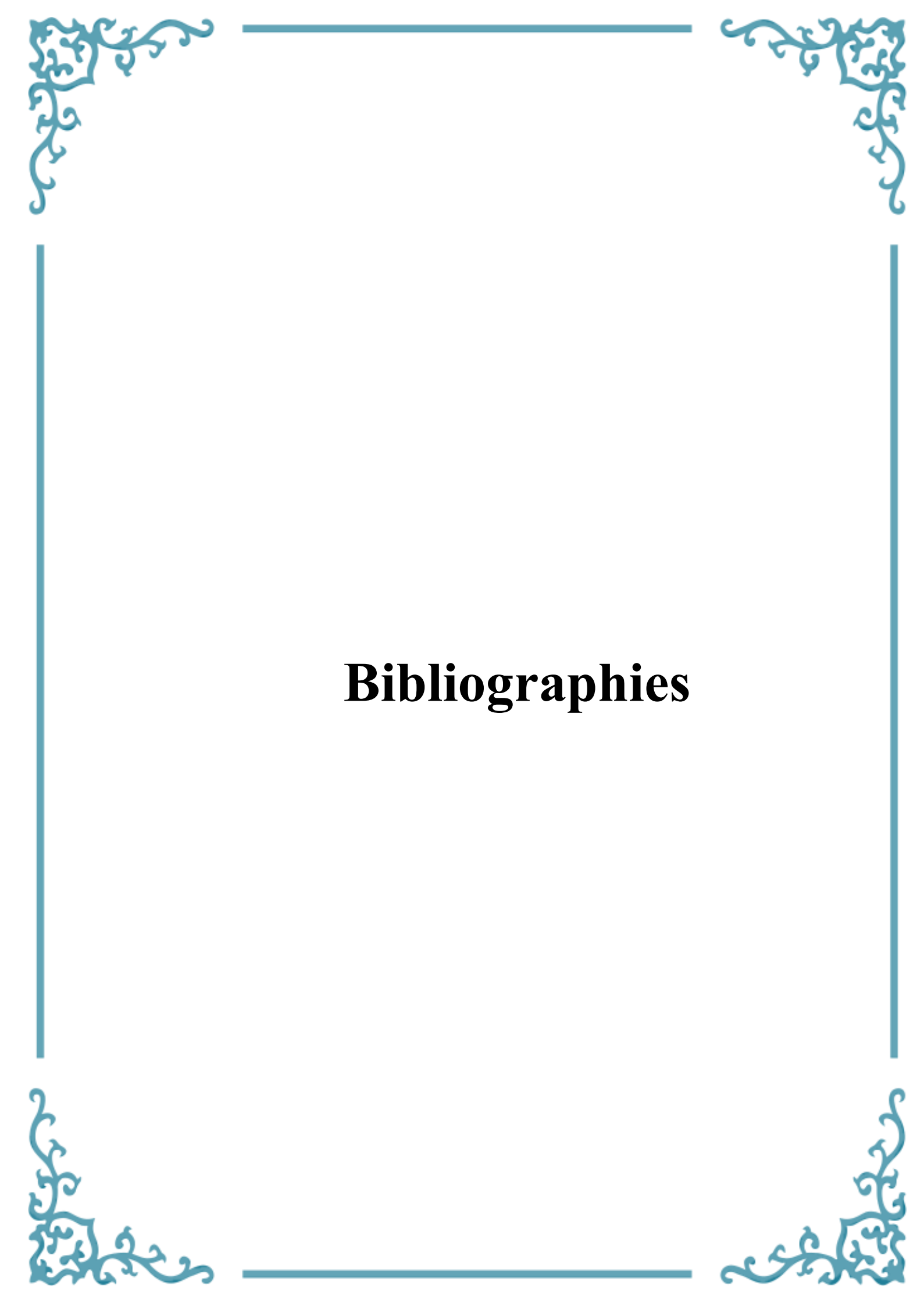
L'étude présentée dans ce mémoire a porté sur l'influence du traitement thermique sur la microstructure des soudures d'acier inoxydable 316L réalisées par les procédés TIG et ARC Electrode enrobée, dans le but d'évaluer l'effet du cycle thermique post-soudage sur l'homogénéité du joint et sur l'évolution métallurgique des différentes zones soudées. L'ensemble du travail a été structuré autour d'une démarche expérimentale fondée sur la préparation des échantillons, la réalisation des soudures, les contrôles non destructifs et l'observation microscopique avant et après traitement thermique.

Les résultats obtenus ont montré que le soudage entraîne des modifications microstructurales nettes dans le métal d'apport, dans la zone affectée thermiquement et, à un degré moindre, dans le métal de base. La comparaison entre les états avec et sans traitement thermique met en évidence une amélioration de l'homogénéité structurale après application du revenu de détente à 1050 °C pendant 1 heure, ce qui traduit l'effet bénéfique de ce traitement sur la stabilisation de la microstructure et sur la réduction des hétérogénéités locales induites par le soudage.

L'étude comparative des deux procédés de soudage a également montré que la nature du procédé influe directement sur la morphologie du joint et sur l'étendue des transformations observées. Le soudage TIG, caractérisé par un apport thermique plus contrôlé, semble conduire à une microstructure plus régulière, tandis que le soudage ARC Electrode enrobée présente des transformations plus marquées dans certaines zones du joint. Cette différence confirme que le choix du procédé de soudage constitue un paramètre essentiel dans la maîtrise métallurgique des assemblages en acier inoxydable 316L.

Les contrôles non destructifs réalisés dans le cadre de ce travail ont permis de vérifier la qualité globale des assemblages avant leur caractérisation microstructurale. Les résultats obtenus par ressuage fluorescent, radiographie et contrôle ultrasonore n'ont révélé aucun défaut apparent, ce qui confirme la bonne qualité des soudures étudiées et renforce la fiabilité de l'analyse métallographique menée par la suite.

En définitive, ce travail montre que le traitement thermique post-soudage constitue un moyen efficace pour améliorer l'état microstructural des soudures en inox 316L et pour limiter certains effets défavorables liés au soudage. Il met également en évidence l'importance de relier les paramètres de soudage, les conditions de traitement thermique et les observations microstructurales afin d'optimiser les performances finales du joint soudé. Ainsi, ce mémoire apporte une contribution utile à la compréhension du comportement métallurgique des soudures d'acier inoxydable et ouvre la voie à des travaux complémentaires portant sur la corrélation entre microstructure, propriétés mécaniques et résistance à la corrosion.



# **Bibliographies**

- [1] R. Cazes ; Procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur, B 7700.
- [2] B. HICHEM « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers », Juin 2013.
- [3] H. Granjon ; Bases métallurgiques du soudage, Eyrolles, Paris (1977).
- [4] Symap ; Guide soudage/chapitre\_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants).
- [5] H.P.Lieurade, Spécial mécano soudage, CETIM Informations N°118, Septembre 1990.
- [6] F.Rossillon. "Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point". Thèse de Doctorat, Université balaise pascal. 2007
- [7] Document réalisé par le groupe Toxicologie d'Annecy Santé au Travail Actualisé en 2009. H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de
- [8] VARISELLAZ, R. 1987. « Soudage : éléments de conception et de réalisation ». p. 4-49 p.160-176.
- [9] MOUICI Derradji « cours procédés de soudage » ingénieur de soudage chez alpha pipe, Tub de ghardaia , 2014.
- [10] A. Belhadj ; “ Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : Application aux alliages de magnésium ” ; Doctorat de l'Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis (2009).
- [11] -L. Blais ; “ Introduction au soudage laser ” ; Centre spécialisé de technologie physique du Québec Inc. (2006).
- [12] - CSMOFMI : Soudage et assemblage-soudage « Défauts de soudure •Chapitre 6 ».
- [13] - B. BARTHELEMY Notions pratiques de mécanique de la rupture - Editions EYROLLES-Paris 1980.
- [14]- D. SEFERIAN : Métallurgie de la soudure - DUNOD - 1959.
- [15] L. Mouchat, S. Malek, “Mise en œuvre de classificateurs basés sur la notion de distance et classification statistique. Applications : Identification des défauts de joint de soudure sur les images radiographiques”. Mémoire d'ingéniorat. Université de Blida. 2002.
- [16]- F. DELATRE : Le soudage des aciers inoxydables - DUNOD – 1965.
- [17]- MAKRI HOCINE « Thèse MAGISTER ».
- [18] - Jean-Michel VIGO OTUA le soudage applique à la construction de ponts métalliques « 30/01/03 ».
- [20]: Mr RABHI Mouldi, Support de cours « Contrôle non destructif CND » , Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA, Département Génie Mécanique, 2017.
- [21]: APAVE Lyon France ,Présentation des principaux moyens d'investigation par contrôle non destructif, Document de formation.
- [22]: Recueil de normes AFNOR Soudage et techniques connexes - Tome 3 Contrôles et Essais.
- [23]: Mme B. MANGEOT, Maître de conférences à l'Université Paris VI, Magnétoscopie Niveau 2, 2ème Edition 1990.
- [24]: [www.chez.com/soudage2000](http://www.chez.com/soudage2000).
- [25]: <http://ndt.agfa.com>
- [26]: ALI RAID 2017-2018 « CONTRÔLE NON DESTRUCTIF » L'université des sciences Et de la technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf.