

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Présenté par :

MEHALLA Abderrehmen et LACENE NECER Mohammed

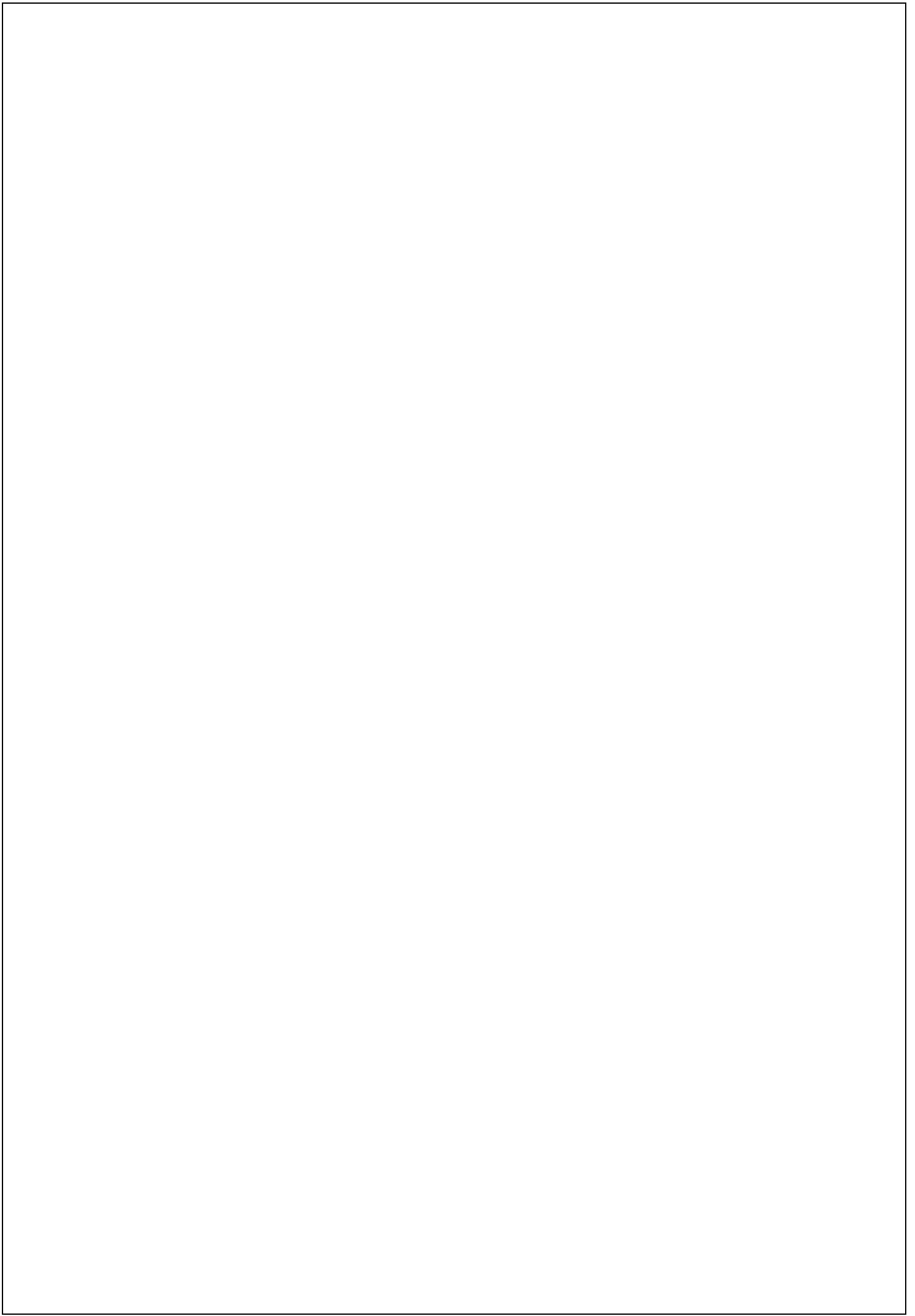
Sujet

Contrôle de qualité en temps réel des processus de soudage

Soutenu publiquement, le 19/06/2025, devant le jury composé de :

Mr. GUEZZEN Samir	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mr. HADJOUÏ Fethi	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. GHERNAOUT M.E.A	PR	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. KARA ALI Djamal	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire: 2024 /2025



Abstract

Welding is a key thermal process in industry, but it locally alters the structure of the material, especially in the heat-affected zone (HAZ). These alterations can lead to defects, variations in hardness, and mechanical changes. This work aims to analyze the effects of MIG welding using flux-cored wire without shielding gas on low-carbon S235 steel plates, by combining several quality control techniques to better understand the impact of the thermal cycle on the material.

The implemented methodology is based on three complementary experimental approaches. A thermal analysis using infrared thermography was used to visualize heat propagation and estimate the HAZ. A Rockwell hardness test, converted to Brinell, made it possible to detect mechanical variations depending on the distance from the weld bead. Finally, a metallographic study revealed the microstructural transformations in the different weld zones

Keywords: MIG Welding. Flux cored wire. Infrared thermography. Low carbon steel S235. Heat-affected zone (HAZ). Hardness testing. Metallographic examination. Quality control

Résumé

Le soudage est un procédé thermique essentiel dans l'industrie, mais il modifie localement la structure du matériau, notamment au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT). Ces modifications peuvent entraîner des défauts, des variations de dureté et des altérations mécaniques. Ce travail vise à analyser les effets du soudage MIG avec fil fourré sans gaz sur des tôles en acier doux S235, en combinant plusieurs techniques de contrôle qualité pour mieux comprendre l'impact du cycle thermique sur le matériau.

La méthodologie mise en œuvre repose sur trois axes expérimentaux complémentaires. Une analyse thermique par thermographie infrarouge a été utilisée pour visualiser la propagation de la chaleur et estimer la ZAT. Un essai de dureté Rockwell, converti en Brinell, a permis de détecter les variations mécaniques selon la distance au cordon de soudure. Enfin, une étude métallographique a révélé les transformations microstructurales dans les différentes zones de la soudure.

Mots clé : Soudage MIG. Fil fourré sans gaz. Acier doux S235. Zone affectée thermiquement. Thermographie infrarouge. Essai dureté. Micrographie. Contrôle de qualité

ملخص

يُعدّ اللحام من العمليات الحرارية الأساسية في الصناعة، لكنه يسبب تغيرات موضعية في بنية المادة، وخصوصاً في منطقة قد تؤدي هذه التغيرات إلى ظهور عيوب، وتفاوت في الصلابة، وتغيرات في الخصائص (ZAT) التأثير الحراري باستخدام سلك مملوء بدون غاز واقٍ على صفائح من الفولاذ MIG الميكانيكية. يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير لحام ، وذلك بالاعتماد على عدة تقنيات لمراقبة الجودة من أجل فهم أفضل لتأثير الدورة الحرارية على المادة S235 الطري

تعتمد المنهجية المستخدمة على ثلاثة محاور تجريبية متكاملة. تم إجراء تحليل حراري باستخدام كاميرا التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء لرصد انتقال الحرارة وتقدير منطقة التأثير الحراري. كما أُجري اختبار صلابة بنظام روكويل، تم تحويل نتائجه إلى مقياس برينل، من أجل تحديد التغيرات الميكانيكية حسب المسافة من خط اللحام. وأخيراً، تم إجراء دراسة مجهرية للكشف عن التحولات في البنية المجهرية لمناطق اللحام المختلفة

الكلمات المفتاحية: لحام MIG. سلك مملوء دون غاز واقٍ. فولاذ طري S235. منطقة التأثير الحراري (ZAT). التصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء. اختبار الصلابة. الفحص المجهرية. تقنيات الفحص وضمان الجودة

Remerciements

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, mes sincères remerciements vont à nos encadreurs **Mr KARA ALI Djamal** et **Mr GHERNAOUT Mohammed El Amine** pour leur encadrement précieux, leurs conseils avisés et leur disponibilité constante. La rigueur scientifique et leur encouragement ont été essentiels pour réussir ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude au **Mr BENHADJI SERRADJ Nasr-eddine** pour ses conseils lors de l'expérience que nous avons réalisée, son expertise et sa gentillesse ont été un guide inestimable.

Nous remercions **Mr GUEZZEN Samir** d'avoir accepté de présider notre jury ainsi que **Mr HADJOUI Fethi** pour l'évaluation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi au personnel de l'usine de Soremep de Tlemcen pour avoir facilité l'accès aux ressources et aux ateliers nécessaires.

On n'oublie pas nos enseignants de l'université Aboubakr Belkaïd, département de génie mécanique.

Enfin, on remercie nos familles et nos amis pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements tout au long de cette période. Leur présence a été une source de motivation constante.

Dédicaces

À mon père, pour sa force, sa sagesse et son amour inconditionnel.

À ma mère, dont la tendresse, le soutien et les prières ont toujours été un guide dans ma vie.

À mes grands-mères, pour leur douceur, leur affection et les souvenirs précieux qu'elles m'ont laissés.

À mon grand-père, exemple de bienveillance, de patience et de générosité.

À ma sœur, à son époux et à leur fille, rayon de lumière dans notre famille.

À ma petite sœur, avec tout mon amour et mes vœux de réussite.

À mon grand frère, pour son soutien, sa présence et ses conseils.

À tous mes amis et collègues, pour leur présence, leur aide et les bons moments partagés.

À vous tous, je dédie ce mémoire avec gratitude et affection.

Dédicaces

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices qui ont rendu ce parcours possible. Votre confiance en moi a été ma plus grande force.

À mes frères , pour leur présence constante, nos rires et leur encouragement.

À mes amis, pour leur amitié précieuse et les moments de répit qu'ils m'ont offerts.

Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont inspiré tout au long de ce chemin.

Liste des symboles

ZAT : Zone affectée thermiquement.

ZL : Zone de liaison.

ZF : Zone de fusion.

MB : Métal de base.

NLU : Ultrasons non linéaires.

ZATGG : Zone affectée thermiquement à gros grains.

ZATGF : Zone affectée thermiquement à grains fins.

ZATSC : Zone sous-critique de la zone affectée thermiquement.

CND : Contrôle Non Destructif.

CD : Contrôle Destructif.

GTAW: Stands for Gas Tungsten Arc Welding.

GMAW: Stands for Gas Metal Arc Welding.

SAW: Stands for Submerged Arc Welding.

Spt : Spot.

Table des matières

Liste des symboles	I
LISTE DES FIGURES.....	II
LISTE DES TABLEAUX	III
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur le soudage.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Historique de soudage.....	2
1.2.1 Retracer l'histoire du soudage de l'âge du bronze à l'âge du fer	2
1.2.2 Histoire du soudage du Moyen Âge au 19e siècle	2
1.2.3 Avancées au 20e siècle	3
1.2.4 Soudage moderne	3
1.3 Définition de soudage	4
1.4 Procèdes de soudages	4
1.4.1 Procédé de soudage MIG	5
1.4.2 Avantages et Inconvénients de soudage MIG	6
1.4.3 Applications courantes de la soudure MIG	7
1.5 Différentes zones de soudage	7
1.5.1 Zone de liaison (ZL).....	8
1.5.2 Zone affectée thermiquement (ZAT).....	8
1.5.3 Zone de fusion (ZF)	8
1.5.4 Métal de base (MB)	8
1.6 Propriétés de soudage.....	8
1.6.1 Soudabilité.....	8
1.6.2 Dilatation thermique	9
1.6.3 Conductivité thermique.....	9
1.6.4 Fusion et fluidité.....	9
1.6.5 Réaction à la chaleur	9
1.6.6 Résistance mécanique	9
1.6.7 Ductilité	9
1.6.8 Dureté.....	9
1.7 Joints de soudure	10
1.7.1 Types de joints en soudage	10
1.8 Conclusion	11

Chapitre II : Analyse de la zone affectée thermiquement..... 12

2.1	Introduction.....	12
2.2	Zone affectée thermiquement : Etat de l'art	12
2.3	Influence des facteurs sur la Zone Affectée Thermiquement.....	13
2.4	Teintes de chaleurs.....	13
2.5	Microstructure et propriétés de la ZAT par le soudage	15
2.6	Normes qui référencent les informations sur la Zone Affectée Thermiquement.....	17
2.7	Méthodes d'analyse de la zone affectée thermiquement	18
2.7.1	Méthodes Destructives	18
2.7.2	Méthodes Non Destructives.....	18
2.8	Conclusion	19

Chapitre III : Défauts de soudage..... 20

3.1	Introduction.....	20
3.2	Défauts de soudages	20
3.3	Type de défaut de soudage	20
3.3.1	Les fissures.....	20
3.3.2	Manque de fusion.....	23
3.3.3	Inclusions.....	25
3.3.4	Manque de pénétration	27
3.3.5	Excès de matière	29
3.3.6	Surépaisseur	30
3.3.7	Recouvrements non fusionnés (débordements).....	31
3.3.8	Dénivellement	31
3.3.9	Brûlure à travers.....	32
3.3.10	Défauts de surface – Morsures / Caniveaux.....	32
3.3.11	Effondrement	33
3.4	Conclusion	34

Chapitre IV : Techniques de Contrôle Qualité des Assemblages Soudés.... 35

4.1	Introduction.....	35
4.2	Généralités sur le Contrôle Qualité en Soudage	35
4.2.1	Enjeux du contrôle qualité	35
4.2.2	Importance du contrôle de la qualité en soudage	35
4.3	Techniques de Contrôle Avant Soudage	36
4.4	Techniques de Contrôle Pendant le Soudage	36
4.5	Techniques de Contrôle Après Soudage.....	36

4.5.1	Contrôle Non Destructif (CND)	36
4.5.2	Contrôle Destructif (CD)	40
4.6	Conclusion	44
Chapitre V : Etude expérimentale		45
5.1	Introduction.....	45
5.2	Expérience	45
5.2.1	Matériaux Utilisé	45
5.2.2	Equipement	48
5.2.3	Préparation de la tôle.....	50
5.2.4	Procéder au lancement du soudage.....	51
5.2.5	Conséquences attendues sur les essais expérimentaux	52
5.2.6	Défauts constatés visuellement	52
5.2.7	Thermographie	53
5.2.8	Essai de dureté	66
5.2.9	Essai de micrographie.....	70
5.3	Conclusion	73
Conclusions générales		74
Références bibliographiques		75
Annexes.....		77

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Classification des procédés de soudage.....	5
Figure 1.2 Schéma du soudage MIG.....	6
Figure 1.3 Schéma d'installation nécessaire.....	6
Figure I.4 Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion.....	8
Figure I.5 Schéma de joint bout à bout.....	10
Figure I.6 Types de joints bout à bout.....	11
Figure II.1 Teintes de chaleurs.....	14
Figure II.2 Illustration simple de la ZAT et de la variation de température.....	15
Figure II.3 Différentes parties de la zone d'une soudure	16
Figure III.1 Fissurer longitudinale et transversale.....	21
Figure III.2 Fissure transversale.....	21
Figure III.3 Fissure à chaud.....	22
Figure III.4 Fissure froide.....	22
Figure III.5 Types de fissures.....	23
Figure III.6 Localisation possible de manquer de fusion.....	24
Figure III.7 Manque de fusion à la racine.....	24
Figure III.8 Porosités vermiculaires.....	25
Figure III.9 Porosités uniformes.....	26
Figure III.10 Inclusions de laitier.....	26
Figure III.11 Inclusions de tungstène.....	27
Figure III.12 Inclusions de cuivre.....	27
Figure III.13 Manque de pénétration dans la soudure en V.....	28
Figure III.14 Manque de pénétration dans la soudure avec reprise à revers.....	28
Figure III.15 Manque de pénétration.....	29
Figure III.16 Positions des excès de pénétration.....	30
Figure III.17 Excès de pénétration.....	30
Figure III.18 Convexité excessive & surépaisseur excessive.....	30
Figure III.19 Débordements.....	31

Figure III.20 Dénivellement.....	31
Figure III.21 Brûlure à travers.....	32
Figure III.22 Défaut de surface.....	33
Figure III.23 Défaut de surface Caniveaux.....	33
Figure III.24 Effondrement.....	33
Figure III.25 Effondrement à plat ou au plafond.....	34
Figure III.26 Effondrement en corniche.....	34
Figure IV.1 Synoptiques schématise l'analyse par CND.....	37
Figure IV.2 Principe de la thermographie.....	39
Figure IV.3 Différents types d'éprouvettes de traction	40
Figure IV.4 Courbe de traction.....	41
Figure IV.5 Essai de résilience.....	41
Figure IV.6 Essai de pliage.....	43
Figure V.1 Diagramme FER-CARBONE.....	47
Figure V.2 Poste de soudure utiliser	49
Figure V.3 Tôles avant et après peinture.....	50
Figure V.4 Meuleuse pour le chanfreinage et les tôles après traitement de chanfrein.....	50
Figure V.5 Fil employé pour le soudage les tôles après soudage.....	52
Figure V.6 Caméra infrarouge FLIR A305sc.....	54
Figure V.7 Interface du logiciel de la caméra FLIR 305 sc.....	55
Figure V.8 Position de caméra infrarouge en poste de soudure.....	57
Figure V.9 Position des mesures de la température.....	57
Figure V.10 Photo thermographie T=9s.....	58
Figure V.11 Photo thermographie T=33s.....	58
Figure V.12 Photo thermographie T=47s.....	58
Figure V.13 Photo thermographie T=66s.....	58
Figure V.14 Photo thermographie T=80s.....	59
Figure V.15 Photo thermographie T=97s.....	59
Figure V.16 Courbes de température des spt 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15.....	60
Figure V.17 Courbes de température des spt 1,2,3,4,5.....	60

Figure V.18 Courbes de température des spt 6,7,8,9,10.....	60
Figure V.19 Courbes de température des spt 11,12,13,14,15.....	61
Figure V.20 Duromètre pour l'essai de dureté et la Charge appliquée de la machine.....	67
Figure V.21 Schéma explicatif contient les Positionnement des points d'essai.....	68
Figure V.22 Courbes d'essai dureté.....	69
Figure V.23 Machine-outil de coupe avec lubrification.....	70
Figure V.24 Polisseuse métallographique.....	71
Figure V.25 Acide utilisé pour nettoyage.....	71
Figure V.26 Microscope optique utilisé.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1 Types d'essais de dureté.....	43
Tableau V.1 Propriétés mécaniques.....	46
Tableau V.2 Caractéristique chimiques.....	46
Tableau V.3 Données techniques de WF5.....	48
Tableau V.4 Données techniques de MAXI405.....	49
Tableau V.5 Paramètres de soudage.....	51
Tableau V.6 Caractéristique de détecteur de camera.....	53
Tableau V.7 Électronique et imagerie.....	53
Tableau V.8 Mesures de camera.....	53
Tableau V.9 Variable de la formule.....	62
Tableau V.10 Températures seuil.....	62
Tableau V.11 Valeurs des variables.....	63
Tableau V.12 Données utilisées pour calculer.....	64
Tableau V.13 Résultats de distance de AC1 et AC3.....	65

Introduction générale

Le soudage est un procédé de fabrication incontournable dans l'industrie moderne, utilisé pour assembler de manière permanente des pièces métalliques. En plus de son efficacité technique, il permet de garantir la continuité mécanique, électrique et thermique des structures, ce qui en fait une solution de choix dans les domaines de la construction métallique, de l'énergie, du transport et de l'aéronautique. Toutefois, cette technique reste complexe à maîtriser, car elle induit des modifications profondes dans la structure des matériaux soudés, tant sur le plan thermique que mécanique.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette problématique et a pour objectif d'étudier en détail les effets thermiques et métallurgiques du soudage sur un acier doux de type S235, en s'appuyant à la fois sur une approche théorique et expérimentale.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le soudage, où sont présentés les principaux procédés, les conditions de mise en œuvre, et les paramètres influents. Ce socle de connaissances permet de mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent lors de l'assemblage.

Le deuxième chapitre traite de la zone affectée thermiquement (ZAT), région intermédiaire entre le métal fondu et le métal de base, qui subit des transformations métallurgiques importantes en raison du cycle thermique du soudage. Cette zone est souvent critique, car elle peut devenir un point faible en service.

Le troisième chapitre présente les défauts de soudage courants, leurs origines et leurs conséquences sur l'intégrité des assemblages. Comprendre ces défauts est essentiel pour maîtriser la qualité d'un joint soudé.

Dans le quatrième chapitre, les techniques de contrôle qualité des soudures sont abordées. On y distingue les méthodes destructives et non destructives (CND), permettant d'évaluer la conformité des soudures sans compromettre la pièce.

Enfin, le cinquième chapitre est consacré à une étude expérimentale réalisée sur des tôles d'acier S235 soudées par procédé MIG avec fil fourré sans gaz. Cette partie comporte la préparation des échantillons, la mesure des températures par thermographie infrarouge, et l'évaluation de la dureté par essai Rockwell, avec conversion en dureté Brinell (HB) pour une meilleure interprétation.

Ce travail a pour but de comprendre l'impact du soudage sur les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux, et d'évaluer les méthodes permettant de garantir la fiabilité des assemblages.

Enfin, le dernier chapitre développe une étude expérimentale complète : soudage MIG avec fil fourré sans gaz, analyse thermique par thermographie infrarouge, essais de dureté Rockwell convertis en Brinell, et observation métallographique pour analyser la microstructure de la ZAT. Ce travail expérimental permet de mieux comprendre les effets du soudage sur les propriétés thermiques, mécaniques et microstructurales du matériau.

Chapitre I : Généralités sur le soudage

1.1 Introduction

Le soudage, procédé d'assemblage permanent de matériaux par fusion, avec ou sans apport de matière, sous l'effet de la chaleur et/ou de la pression, occupe une place prépondérante dans de nombreux secteurs industriels, allant de la construction métallique à l'aérospatiale, en passant par l'automobile et l'électronique. Sa capacité à créer des liaisons structurales robustes et durables en fait une technique incontournable pour la fabrication, la réparation et l'assemblage d'une vaste gamme de composants et de structures. Au fil des décennies, le soudage a connu des évolutions technologiques significatives, avec l'émergence de nouveaux procédés, de matériaux d'apport innovants et de techniques de contrôle qualité sophistiquées. Ces avancées ont permis d'améliorer considérablement l'efficacité, la précision et la fiabilité des assemblages soudés, tout en répondant aux exigences croissantes en termes de performance mécanique, de résistance à la corrosion et de légèreté des structures.

Ce chapitre se propose d'explorer en détail les aspects fondamentaux du soudage. À travers une analyse approfondie des principes physiques et métallurgiques impliqués, ce chapitre vise à fournir une compréhension claire et complète des enjeux et des défis liés à cette technique d'assemblage essentielle.

1.2 Historique de soudage

Le soudage a une longue et riche histoire, marquée par son importance pour le développement humain. Des forgerons d'antan aux soudeurs hautement qualifiés d'aujourd'hui, qui œuvrent dans des domaines comme l'automobile et la construction, cette compétence spécialisée s'est révélée cruciale. Aujourd'hui, les techniques de soudage sont fondamentales à la fabrication de nombreux objets, des plus petits composants aux structures les plus imposantes. Connaître cette trajectoire historique nous permet d'apprécier pleinement la place et l'influence du soudage dans notre monde actuel.

1.2.1 Retracer l'histoire du soudage de l'âge du bronze à l'âge du fer

Durant l'âge du bronze et du fer, l'assemblage des métaux se faisait par forgeage, où deux morceaux étaient frappés ensemble jusqu'à ne plus en former qu'un. Les Égyptiens excellaient dans le soudage de l'or, et les Grecs ainsi que les Romains employaient cette technique pour façonner des statues et des armures de bronze. Au Moyen-Orient, les artisans du fer se servaient du soudage pour orner dagues et épées de motifs élaborés.

1.2.2 Histoire du soudage du Moyen Âge au 19^e siècle

Si la soudure était déjà utilisée par les forgerons médiévaux pour l'armement, elle n'a réellement progressé en termes de précision et d'efficacité qu'au XIX^e siècle. La découverte de l'arc électrique en 1800 par Sir Humphry Davy a été déterminante pour le développement des techniques modernes. Ce siècle a ensuite été marqué par l'invention de procédés comme le soudage oxyacétylénique et par résistance, offrant un assemblage plus précis et trouvant des applications dans des domaines tels que la construction navale et le bâtiment.

- **Développements du 19e siècle**

L'histoire du soudage à l'arc a connu plusieurs étapes clés. En 1800, Sir Humphrey Davy a inventé la batterie, produisant ainsi un arc électrique. Plus tard, en 1831, Eugène Desbassys de Richemont a breveté un procédé de soudage par fusion.

Une avancée significative a eu lieu en 1836 lorsque Edmond Davy a découvert le soudage à l'arc métallique, utilisant une électrode de carbone pour créer la chaleur nécessaire entre les métaux à assembler. 1881 a vu August De Meritens et Nikolai Benardos perfectionner l'utilisation de la chaleur de l'arc, généré par des électrodes de carbone, pour souder. Vers 1885, Nikolay Benardos, un inventeur russe, et Stanisław Olszewski, un scientifique polonais, ont indépendamment inventé l'électrode métallique, en 1888, Nikolai Slavyanov et C.L. Coffin ont développé l'application pratique des électrodes métalliques dans le processus de soudage. [1]

1.2.3 Avancées au 20e siècle

Au début du 20ème siècle, durant la Première Guerre mondiale, le soudage au gaz s'est imposé comme une technique rapide et efficace pour fabriquer du matériel militaire, notamment grâce à l'utilisation de l'Ox acétylène qui permettait d'atteindre des températures élevées et d'accélérer la production d'armes et de véhicules. Plus tard, au milieu du siècle, le soudage a connu des avancées majeures avec l'apparition du TIG (GTAW) dans les années 40, offrant des soudures plus nettes et précises, et du MIG (GMAW) dans les années 50, qui permettait d'assembler plus rapidement des matériaux épais. C'est également à cette période que le soudage laser et le soudage par faisceau d'électrons ont fait leur apparition, suivis dans les années 60 par le soudage à l'arc submergé, une méthode utilisant un flux protecteur.

- **Développements du 20e siècle**

Ce texte retrace l'évolution du soudage au XXe siècle. Il commence avec l'invention de la première torche oxyacétylénique commerciale en 1900, suivie par le développement du soudage à la thermitte en 1903 et le brevet de l'électrode enrobée pour le soudage à l'arc manuel en 1907. La Première Guerre mondiale a ensuite popularisé le soudage à l'arc pour la construction navale et aéronautique. Les années 1920 ont vu l'apparition du soudage automatique et les premières recherches sur le blindage gazeux. Le soudage à l'arc submergé a été inventé en 1930. Après la Seconde Guerre mondiale, le soudage à l'arc avec gaz métallique (GMAW) a été développé en 1948 et est devenu plus économique dans les années 1950, avec des améliorations comme la technique de l'arc court. La fin des années 1950 a également vu l'invention du soudage à l'arc sous flux et du soudage au plasma, ainsi que le début du soudage sous laitier et l'application industrielle du soudage par faisceau d'électrons. Enfin, le soudage par impulsion magnétique a fait son apparition dans l'industrie automobile en 1967, et le soudage par friction-malaxage a été inventé en 1991. [2]

1.2.4 Soudage moderne

Au XIXe siècle, d'importantes avancées technologiques dans le domaine du soudage ont marqué la naissance des techniques modernes. La découverte de l'arc électrique fut une innovation majeure, ouvrant la voie au développement du soudage à l'arc.

- **Développement de méthodes de soudage modernes**

Une évolution marquante dans le domaine du soudage est l'adoption du soudage laser, qui utilise des lasers de forte puissance pour fondre et lier les métaux. Cette méthode s'avère très pratique pour l'assemblage de matériaux de faible épaisseur, fréquemment utilisés dans le secteur de l'électronique. Par ailleurs, le soudage par friction-malaxage représente une approche novatrice.

Il consiste à utiliser un outil en rotation pour brasser et joindre deux pièces métalliques, se montrant particulièrement adapté à l'assemblage de métaux de nature différente, tels que l'aluminium et le cuivre. [1]

1.3 Définition de soudage

Le soudage est une méthode d'assemblage définitif où l'on unit des composants, typiquement en métal ou en thermoplastique, en les faisant fondre ensemble au niveau de leur jonction. Cette fusion est obtenue grâce à la chaleur, à la pression, ou aux deux combinées, ce qui permet aux matériaux de s'entremêler et de former une seule entité en refroidissant. Un métal d'apport (baguette, fil, etc.) peut être ajouté pour faciliter la création d'une soudure solide et uniforme. Différentes techniques de soudage utilisent diverses sources d'énergie, allant de la flamme à l'arc électrique, en passant par le laser et les ultrasons.

L'assemblage par soudure représente une compétence fondamentale pour de multiples secteurs industriels, incluant la construction, la production automobile, l'aérospatiale, la construction de bateaux et la remise en état de machines. Grâce à lui, on obtient des ouvrages solides, de longue durée et aptes à supporter des sollicitations mécaniques et environnementales. Cependant, sa mise en œuvre demande une grande rigueur, une connaissance approfondie des matériaux et des techniques employées, ainsi que des précautions de sécurité importantes pour se prémunir des risques associés à la chaleur, aux gaz et aux émissions. [3]

1.4 Procédés de soudages

De nombreuses méthodes d'assemblage permanent de pièces métalliques existent, tout comme les recherches scientifiques et technologiques dans ce domaine. Pour assurer une liaison continue entre deux éléments, divers procédés de soudage sont disponibles. Ces procédés peuvent être regroupés en quatre catégories principales, en fonction de la source de chaleur :

- Procédés électriques (à l'arc) : Cette catégorie inclut des techniques couramment employées telles que le soudage TIG (Tungsten Inert Gas), MAG (Metal Active Gas) / MIG (Metal Inert Gas), ainsi que le soudage à l'électrode enrobée.
- Procédés à énergie focalisée (haute densité d'énergie) : Cette catégorie regroupe les techniques utilisant une concentration importante d'énergie, comme le soudage laser et le soudage par faisceau d'électrons (Electron Beam Welding).
- Procédés chimiques : Cette catégorie comprend les méthodes qui utilisent une réaction chimique pour produire la chaleur nécessaire au soudage, à l'exemple du soudage au chalumeau.
- Procédés mécaniques : Cette catégorie englobe les techniques qui utilisent l'énergie mécanique pour réaliser l'assemblage, comme le procédé par friction-malaxage (Friction Stir Welding).

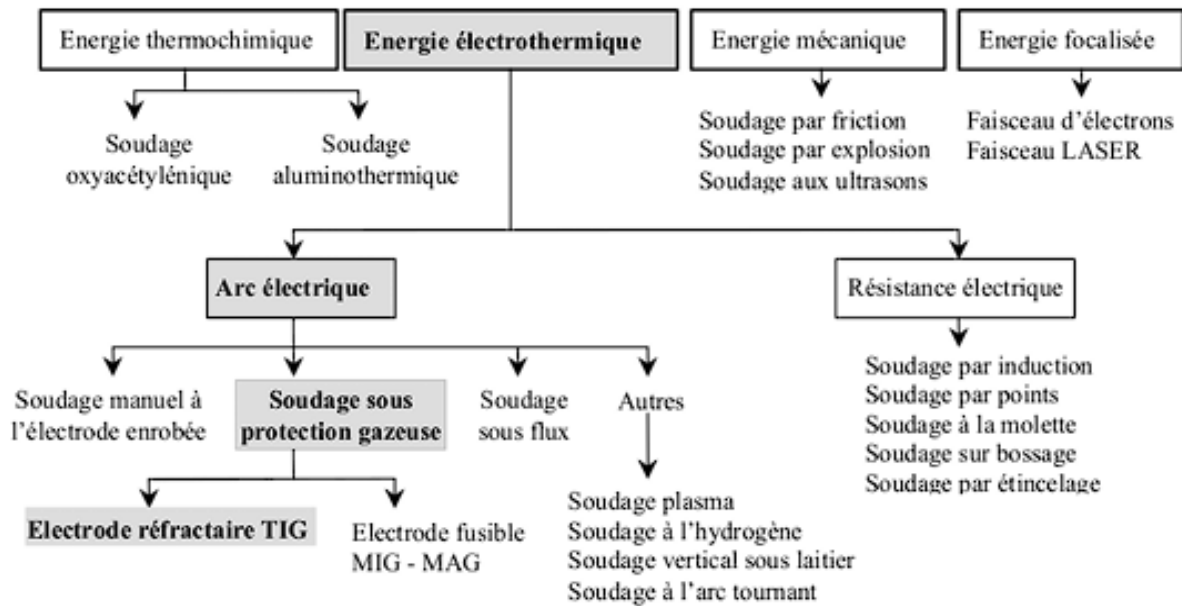


Figure I.1 Classification des procédés de soudage [4]

De plus, l'assemblage par soudage s'étend au-delà des matériaux métalliques. Il est également possible de réaliser des soudures sur le verre, les céramiques ou les polymères.

Cette section expose les aspects fondamentaux du soudage MIG, en mettant l'accent sur les matériaux utilisés et les divers modes de transfert de matière qui se manifestent selon les réglages opératoires. Ensuite, les principes physiques sous-jacents seront examinés afin d'analyser les mécanismes en jeu. [4]

1.4.1 Procédé de soudage MIG

Le soudage MIG (Metal Inert Gas) est un procédé de soudure à l'arc avec apport de métal. L'énergie calorifique est fournie par un arc électrique qui jaillit entre une électrode consumable et la pièce à souder ; c'est cette électrode qui, par fusion, fournit le métal d'apport.

L'arc s'amorce lorsque, après avoir mis en contact la pièce à souder et l'électrode, on écarte cette dernière. La chaleur dégagée par le passage du courant fait fondre le métal de l'électrode. L'électrode peut être une simple baguette de métal, mais on obtient un meilleur résultat en utilisant une baguette enrobée d'un produit peu fusible qui la protège de l'oxydation.

De plus, en soudage MIG, un arc est entretenu entre une pièce et une électrode consommable qui consiste en un fil fourni par une bobine. Ce fil de métal d'apport traverse un guide-fil ou il reçoit le courant de soudage. Le fil de métal d'apport, l'arc et le cordon de soudure sont protégés de l'air ambiant par un gaz tel que l'argon ou l'anhydride carbonique. Cela est nécessaire pour empêcher l'oxydation du métal déposé ou l'absorption d'azote par celui-ci. (Voir **Figure I.2** et **Figure I.3**) [5]

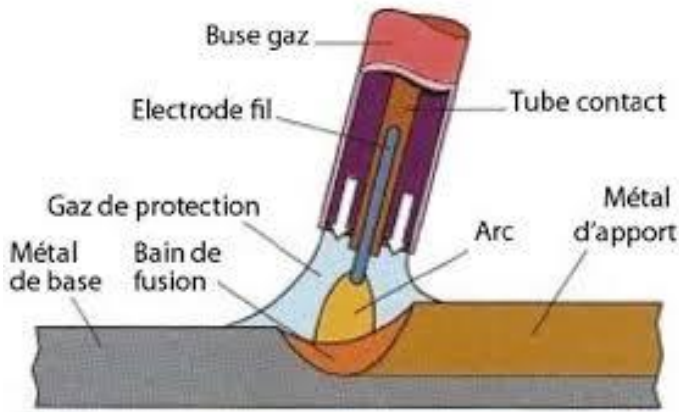


Figure 1.2 Schéma du soudage MIG [5]

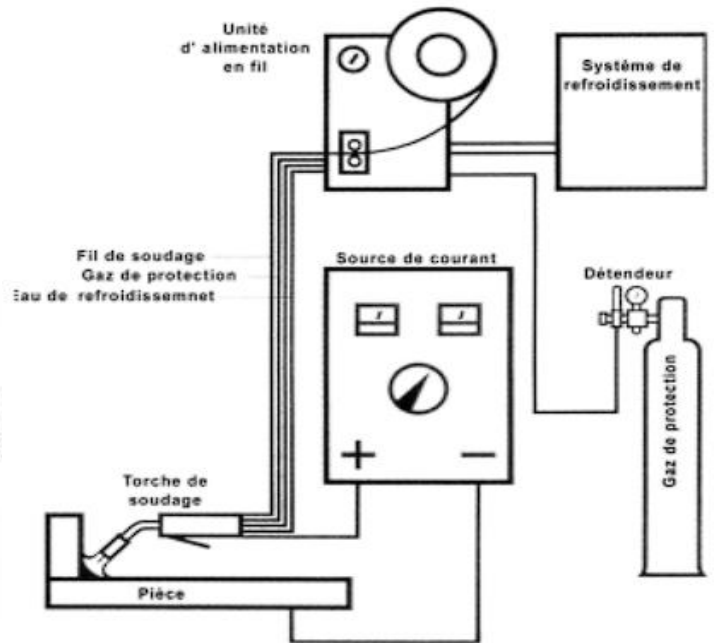


Figure 1.3 Schéma d'installation nécessaire [5]

1.4.2 Avantages et Inconvénients de soudage MIG

Le soudage MIG comme toute technique, il présente des avantages et des inconvénients

- **Avantages :**

Le processus de soudage MIG présente un ensemble significatif d'atouts, contribuant notablement à son adoption répandue au sein du secteur industriel. Les principaux sont les suivants :

- Rapide grâce à son fil-électrode continu et à la possibilité d'assembler de grandes pièces en une seule passe, ce qui optimise le temps d'opération.
- Augmente la productivité en atelier grâce à sa rapidité, permettant d'assembler plus de pièces en moins de temps et de réduire les délais entre les soudures.
- Le soudage MIG produit des joints de haute qualité avec une bonne pénétration, une faible distorsion et des cordons uniformes.
- Une technique polyvalente qui permet d'assembler différents métaux comme l'acier, l'aluminium, le cuivre, le laiton et l'acier inoxydable, grâce au choix adapté du gaz de protection et du fil-électrode.
- Caractérise par un faible taux de rejets, ce qui réduit la pollution, améliore l'environnement de travail et minimise les coûts de production. [6]

- **Inconvénients :**

Après avoir exploré les atouts du soudage MIG, examinons maintenant ses désavantages potentiels.

- Vulnérable aux facteurs environnementaux tels que les courants d'air et les impuretés, nécessitant un environnement propre et stable pour des soudures de qualité.
- Ce genre de soudure représente un coût élevé, cependant cet investissement initial donc dans l'équipement de soudage MIG se justifie sur le long terme par sa vitesse et sa productivité
- Présente des défis de positionnement, particulièrement pour les soudures verticales et au plafond, ce qui limite la capacité du soudeur dans les configurations complexes.
- Il est crucial de nettoyer méticuleusement les surfaces afin d'assurer une bonne adhérence et d'éviter la contamination. [6]

1.4.3 Applications courantes de la soudure MIG

Le procédé de soudage MIG trouve son application dans divers secteurs industriels et manufacturiers, incluant l'automobile, l'aérospatiale, la construction navale, la fabrication de structures métalliques, et bien d'autres.

Dans le secteur automobile : le soudage MIG est fréquemment employé pour l'assemblage des carrosseries de voitures et de poids lourds. Cette méthode assure un assemblage rapide et précis de tôles fines et de structures complexes en acier, en aluminium et en alliages légers. Elle est également mise à profit dans la production de composants tels que les ossatures de sièges et les systèmes de suspension.

Dans l'industrie aérospatiale : cette technique est utilisée pour la fabrication de pièces en aluminium et en alliages de titane, comme les conduits d'air, les collecteurs d'admission et les supports de moteur.

Dans la construction navale : la soudure MIG est exploitée pour l'assemblage des coques et des superstructures en acier, en aluminium et en alliages de cuivre-nickel. Les atouts majeurs de cette méthode résident dans sa rapidité d'exécution, sa productivité et la qualité des joints soudés obtenus.

Dans la fabrication de structures métalliques : le soudage MIG est utilisé pour l'assemblage de poutres en acier, d'ossatures et de structures complexes en acier. Il permet un assemblage rapide et efficace de pièces de grande taille tout en garantissant une qualité de soudure élevée. [6]

1.5 Différentes zones de soudage

L'objectif du soudage est de créer une liaison ininterrompue entre les pièces à assembler. Dans le cas des métaux, cette liaison se fait au niveau de leurs atomes. Hormis le scénario idéal d'un contact total entre des surfaces compatibles et non contaminées, où les forces atomiques et la diffusion suffiraient à souder lentement, l'application d'une énergie est indispensable pour réaliser rapidement la continuité souhaitée.

Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones :

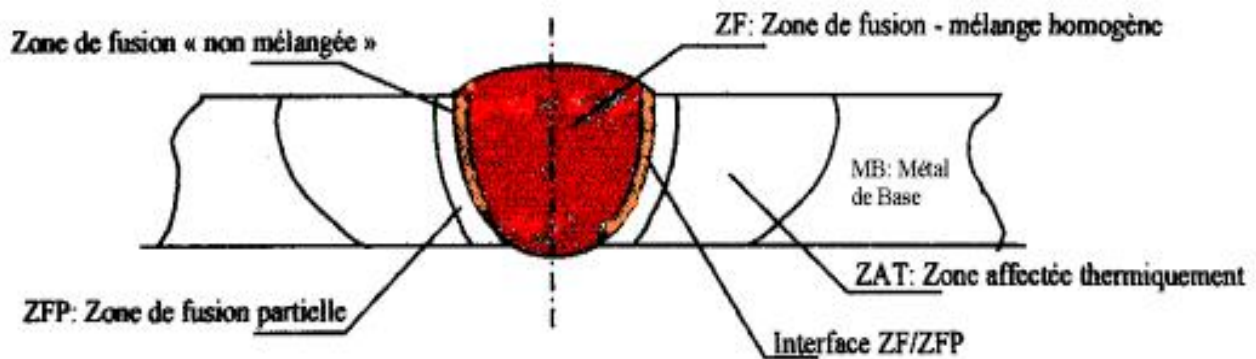


Figure I.4 Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion

1.5.1 Zone de liaison (ZL)

Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

1.5.2 Zone affectée thermiquement (ZAT)

Est une région adjacente à la zone de fusion. Sa largeur peut varier et elle a subi une augmentation de température sans toutefois atteindre le point de fusion. Les caractéristiques de cette zone, telles que le chauffage subi, sa composition chimique et la vitesse à laquelle elle refroidit, entraînent des transformations plus ou moins significatives de sa microstructure métallurgique. [7]

1.5.3 Zone de fusion (ZF)

La zone de fusion désigne la portion de matériau portée à une température excédant le liquidus. Au sein de cette région, la microstructure initiale du métal de base subit une transformation due aux phénomènes de fusion et de solidification. De plus, la teneur en certains constituants de l'alliage peut être altérée par vaporisation. Un brassage homogène des éléments constitutifs est assuré par les mouvements de convection forcés. À l'extrémité du bain de fusion se trouve une zone de faible étendue, qualifiée de « non mélangée », où l'intensité des forces de convection est inférieure aux forces de friction internes au fluide. En conséquence, la composition chimique y demeure inchangée par rapport à celle du métal de base.

1.5.4 Métal de base (MB)

C'est la seule partie de la pièce qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que métallurgiquement inchangé, le métal de base, tout comme le joint de soudure global, est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure. [8]

1.6 Propriétés de soudage

1.6.1 Soudabilité

L'aptitude d'un matériau à être joint par soudage, tout en préservant ses caractéristiques mécaniques et structurales intrinsèques, est désignée par le terme de soudabilité. Cette propriété est intrinsèquement liée à divers facteurs inhérents au matériau lui-même, notamment :

Sa composition chimique, en particulier la présence d'éléments spécifiques tels que le carbone et le soufre. Sa capacité à conduire la chaleur, ou conductivité thermique. Son comportement dimensionnel en réponse aux variations de température, ou dilatation thermique. A titre d'illustration, les aciers présentant une faible concentration en carbone manifestent une soudabilité supérieure comparativement aux aciers à haute teneur en carbone.

1.6.2 Dilatation thermique

Les matériaux présentent une expansion volumique lors d'une élévation de température et une contraction lors d'un refroidissement. Une distribution non uniforme de la dilatation thermique au sein de la zone soudée peut induire des déformations ou des contraintes résiduelles.

Les matériaux caractérisés par un faible coefficient de dilatation thermique, tel que l'acier inoxydable, sont moins susceptibles de manifester ces problématiques.

1.6.3 Conductivité thermique

La conductivité thermique d'un matériau régit la vitesse à laquelle la chaleur se propage à travers sa structure. Les matériaux dotés d'une conductivité thermique élevée, comme l'aluminium, requièrent un apport calorifique plus important pour atteindre leur température de fusion. Inversement, une conductivité thermique élevée peut engendrer un refroidissement rapide, susceptible d'altérer la microstructure du joint de soudure.

1.6.4 Fusion et fluidité

La température à laquelle un matériau transite de l'état solide à l'état liquide, ou température de fusion, détermine l'énergie thermique nécessaire pour initier le processus de soudage. La capacité du métal en fusion à s'écouler, ou fluidité, influence directement la morphologie du cordon de soudure et la profondeur de pénétration. Les matériaux présentant une faible fluidité, à l'instar de certains alliages d'aluminium, peuvent nécessiter l'application de techniques de soudage spécifiques.

1.6.5 Réaction à la chaleur

L'exposition à la chaleur induite par le soudage peut entraîner des modifications microstructurales au sein de certains matériaux, ce qui peut subséquemment impacter leurs propriétés mécaniques. Par exemple, les aciers ayant subi un traitement de trempe peuvent perdre leur dureté dans la zone affectée thermiquement (ZAT) en raison de l'apport calorifique.

1.6.6 Résistance mécanique

Après le processus de soudage, le joint doit impérativement maintenir une résistance mécanique adéquate, incluant la résistance à la traction et à la compression. Cette résistance est tributaire de la qualité de l'assemblage soudé, du degré de pénétration et de l'absence de discontinuités telles que les porosités et les fissures.

1.6.7 Ductilité

La ductilité représente l'aptitude d'un matériau à subir une déformation plastique significative sans initiation de rupture. Un joint soudé doit posséder une ductilité suffisante pour supporter les contraintes mécaniques et thermiques inhérentes à son environnement d'utilisation sans manifester de fissuration.

1.6.8 Dureté

La dureté de la zone soudée peut varier en fonction de la vitesse de refroidissement et des transformations microstructurales induites par le cycle thermique de soudage. Un

refroidissement rapide peut entraîner une augmentation de la dureté, mais potentiellement au détriment de la ténacité du joint. [9]

1.7 Joints de soudure

Une jonction soudée représente l'assemblage de deux surfaces métalliques unies par un procédé de soudage. Cette union peut impliquer des matériaux identiques ou distincts et peut être réalisée avec ou sans l'ajout d'un matériau d'apport. Conformément à la définition de l'American Welding Society, une configuration de joint soudé spécifie la manière dont deux composants sont agencés pour être assemblés. Dans le contexte de la fabrication de pièces, la pertinence des joints soudés réside dans leur influence sur la qualité, la robustesse et la longévité du produit fini. Le choix et la mise en œuvre adéquats des joints de soudure conditionnent l'efficacité et la fiabilité des produits à usage industriel et commercial.

Le présent article propose une vue d'ensemble exhaustive des diverses typologies de joints de soudure, en examinant leurs attributs et leurs domaines d'application. Les joints de soudure sont fondamentaux pour l'intégrité structurelle et les performances des assemblages. [10]

1.7.1 Types de joints en soudage

Le type de joint choisi dépend de plusieurs facteurs, notamment la configuration des pièces, les contraintes auxquelles l'assemblage sera soumis, l'épaisseur des matériaux et le procédé de soudage utilisé. L'American Welding Society reconnaît cinq types de joints de base :

- **Soudage bout à bout**

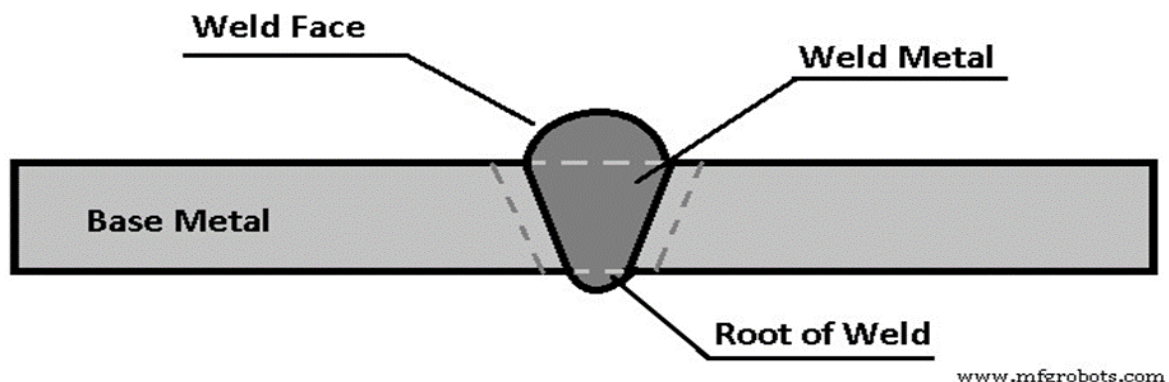


Figure I.5 Schéma de joint bout à bout [11]

Ces types d'assemblages soudés sont créés en positionnant deux pièces métalliques sur un même plan, une configuration appelée soudage bout à bout. C'est le type de joint le plus fréquemment utilisé en soudage. Le soudage bout à bout est couramment employé pour la fabrication de structures, de conduits soudés, de raccords et d'autres composants. Sa préparation est simple et de multiples variations peuvent être mises en œuvre pour atteindre le résultat souhaité. Ces variations incluent l'angle du biseau, la largeur de l'intervalle entre les pièces, la forme du chanfrein, la pénétration à la racine et la dimension de la soudure. Les exemples typiques de joints soudés bout à bout sont nombreux dans le domaine du soudage.

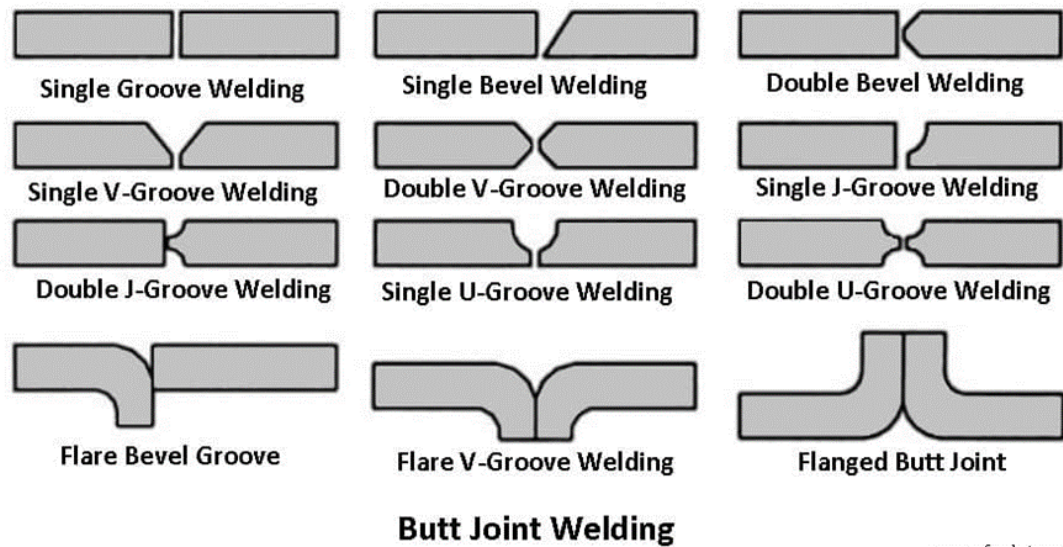


Figure I.6 Types de joints bout à bout. [11]

- Soudure carrée
- Soudage biseau unique
- Soudure à double biseau
- Soudage rainure en V
- Soudure à double rainure en V
- Soudage en U
- Soudure à double rainure en U
- Soudage en J
- Soudage double rainure en J

Il existe plusieurs types de soudage qu'on peut trouver facilement dans la littérature. Comme :

- **Soudage par recouvrement**
- **Soudage des joints de bord**
- **Soudage des joints en T**
- **Soudage des joints d'angle**

1.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases fondamentales du soudage, en présentant ses principes, ses différentes techniques, ainsi que les paramètres influençant la qualité des soudures. Nous avons mis en évidence l'importance de ce procédé dans de nombreux secteurs industriels, où il représente une méthode d'assemblage à la fois fiable, économique et performante. En outre, les contraintes liées au choix des matériaux, aux conditions opératoires et aux exigences de sécurité ont également été abordées, soulignant la complexité et la technicité de cette opération. Cette synthèse constitue ainsi une étape essentielle pour comprendre les aspects plus spécifiques qui seront développés dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Analyse de la zone affectée thermiquement

2.1 Introduction

Le soudage représente une étape cruciale dans la fabrication, servant à l'assemblage permanent de composants métalliques. Ce procédé implique l'application de chaleur aux pièces afin d'établir une liaison intermétallique durable. L'énergie thermique apportée doit atteindre une intensité suffisante pour provoquer la fusion tant du matériau d'apport que du métal de base. Les régions contiguës aux soudures subissent une élévation de température suffisante pour induire des modifications microstructurales et métallurgiques, sans toutefois atteindre le point de fusion. Les variations des propriétés des matériaux dans cette région peuvent également découler de processus du coupage à haute température. Cette zone spécifique est désignée sous le terme ZAT. [13]

2.2 Zone affectée thermiquement : Etat de l'art

Il est largement établi par la recherche que la zone affectée thermiquement (ZAT) subit diverses altérations de ses propriétés physiques, lesquelles ont une incidence directe sur la qualité de la soudure.

- L'Association canadienne de normalisation définit la ZAT comme la portion du métal de base d'un assemblage soudé qui, sans avoir subi de fusion, présente une microstructure ou des propriétés mécaniques modifiées sous l'effet de l'apport thermique du processus de soudage (2014).
- En soudage, l'évaluation de la qualité d'un joint s'effectue généralement par des mesures ciblant à la fois la zone fondue et la zone affectée thermiquement (ZAT) (Benyounis & Olabi, 2008).
- La configuration géométrique de la zone fondue et du cordon de soudure exerce une influence significative sur les caractéristiques mécaniques de l'assemblage (Kanti & Rao, 2008).
- La zone affectée thermiquement (ZAT), caractérisée par des transformations microstructurales et métallurgiques induites par la chaleur de soudage, constitue un autre indicateur fondamental de la qualité du joint.
- Les études indiquent que la microstructure à gros grains typique de cette zone est souvent associée à une ductilité et une ténacité réduites (M. Azadi, Golmezergi, & Kolahan, 2016).
- De plus, la ZAT est un lieu privilégié pour l'apparition de défauts tels que la fissuration par l'hydrogène et représente fréquemment la région la plus critique en termes de potentielles ruptures (Hutchinson, Komenda, Rohrer, & Beladi, 2015). [13]

2.3 Influence des facteurs sur la Zone Affectée Thermiquement

Divers facteurs peuvent induire des altérations au sein de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Premièrement, la présence d'hétérogénéités ou de contaminants au sein du matériau de base peut initier des discontinuités telles que la porosité ou la fissuration dans la ZAT. Deuxièmement, le régime thermique post-soudage ou post-traitement thermique module les caractéristiques de la ZAT. Des vitesses de refroidissement réduites favorisent des transformations microstructurales plus significatives et étendues au sein de cette zone. La ZAT constitue un domaine critique pour l'intégrité des assemblages soudés ou des pièces ayant subi un traitement thermique, soulevant des problématiques notables, parmi lesquelles :

- **Réduction de la résistance et de la ténacité** : La zone affectée thermiquement (ZAT) peut présenter des caractéristiques mécaniques distinctes du matériau de base, notamment une diminution de sa limite d'élasticité et de sa résistance à la rupture. Cette fragilisation potentielle de la ZAT peut initier ou propager des discontinuités telles que des fissures, menaçant la solidité de l'assemblage soudé ou de la pièce ayant subi un traitement thermique.
- **Augmentation de la susceptibilité à la corrosion** : De plus, la ZAT peut manifester une sensibilité accrue aux phénomènes corrosifs comparativement au matériau non affecté. Ces changements microstructuraux et de composition chimique induits thermiquement favorisent une dégradation accélérée par corrosion, réduisant la durée de vie de la composante.
- **Distorsion** : Le cycle thermique inhérent aux procédés de soudage ou de traitement thermique engendre des phénomènes de dilatation et de contraction du matériau. Ces variations dimensionnelles peuvent induire des distorsions et des déformations permanentes au niveau de la pièce finale, compromettant son aptitude à l'assemblage et sa fonctionnalité, et pouvant nécessiter des opérations de rectification ultérieures.
- **Fissuration** : Enfin, la fissuration constitue une problématique fréquente au sein de la ZAT des matériaux soudés. L'amorce et la propagation de ces fissures peuvent être attribuées à divers facteurs, incluant la présence d'éléments exogènes ou de souillures dans le matériau, des niveaux importants de contraintes internes résiduelles, ou encore des paramètres de soudage non optimaux.

Comment prévenir ces risques ?

Afin de restreindre ces difficultés, une maîtrise rigoureuse de l'énergie calorifique introduite pendant le soudage ou les traitements thermiques s'avère cruciale. De même, une gestion méticuleuse de la vitesse de refroidissement est nécessaire pour diminuer l'étendue et la sévérité de la zone affectée thermiquement (ZAT). Par ailleurs, un recuit post-soudage et d'autres opérations de traitement peuvent également être mis en œuvre pour amoindrir les conséquences de la ZAT sur le matériau joint ou traité. [14]

2.4 Teintes de chaleurs

Les 'couleurs de revenu' signalent des températures significativement inférieures à celles observées dans la zone affectée thermiquement, et ces couleurs s'étendent au-delà des limites précises de cette zone. Ces variations chromatiques, aussi désignées sous le terme de teintes de chaleur, fournissent une estimation de la température maximale atteinte par le matériau.

Pour l'acier inoxydable de nuance 1.4301 (AISI 304) chauffé en atmosphère ambiante, les colorations superficielles et leurs températures correspondantes sont les suivantes :

- Jaune clair 290 °C / 550 °F
- Jaune paille 340 °C / 640 °F
- Jaune 370 °C / 700 °F
- Marron 390 °C / 735 °F
- Marron pourpre 420 °C / 790 °F
- Violet foncé 450 °C / 840 °F
- Bleu 540 °C / 1000 °F
- Bleu foncé 600 °C / 1110 °F

Voici une image qui illustre les teintes de chaleur en soudure:



Figure II.1 Teintes de chaleurs [14]

L'intensité des couleurs de revenu est directement liée à la capacité d'un matériau à résister à l'oxydation. Les alliages métalliques avec une concentration supérieure en chrome présentent des teintes moins prononcées. L'application de gaz de protection et de revêtements sur les électrodes contribue également à minimiser la coloration thermique en offrant une protection partielle contre l'oxydation du métal. Inversement, les états de surface plus rugueux favorisent une oxydation accélérée, ce qui se traduit par des couleurs de revenu plus foncées. Par ailleurs, la présence de substances telles que la peinture, l'huile, la rouille et même les empreintes digitales peut modifier l'aspect des couleurs de revenu, sans pour autant influencer la dimension de la zone affectée thermiquement. [14]

2.5 Microstructure et propriétés de la ZAT par le soudage

La zone affectée thermiquement (ZAT) d'une liaison soudée présente une hétérogénéité structurale, caractérisée par la présence de régions distinctes (Lomozik & Zielinska-Lipiec, 2008). Les mécanismes de transfert thermique induits par le processus de soudage varient en fonction de la distance par rapport à l'axe de soudure. Classiquement, la ZAT est subdivisée en quatre zones distinctes (Liu, Gao, & Ding, 2007). La figure II.2, montre une illustration simple de la zone affectée thermiquement et de la variation de température.

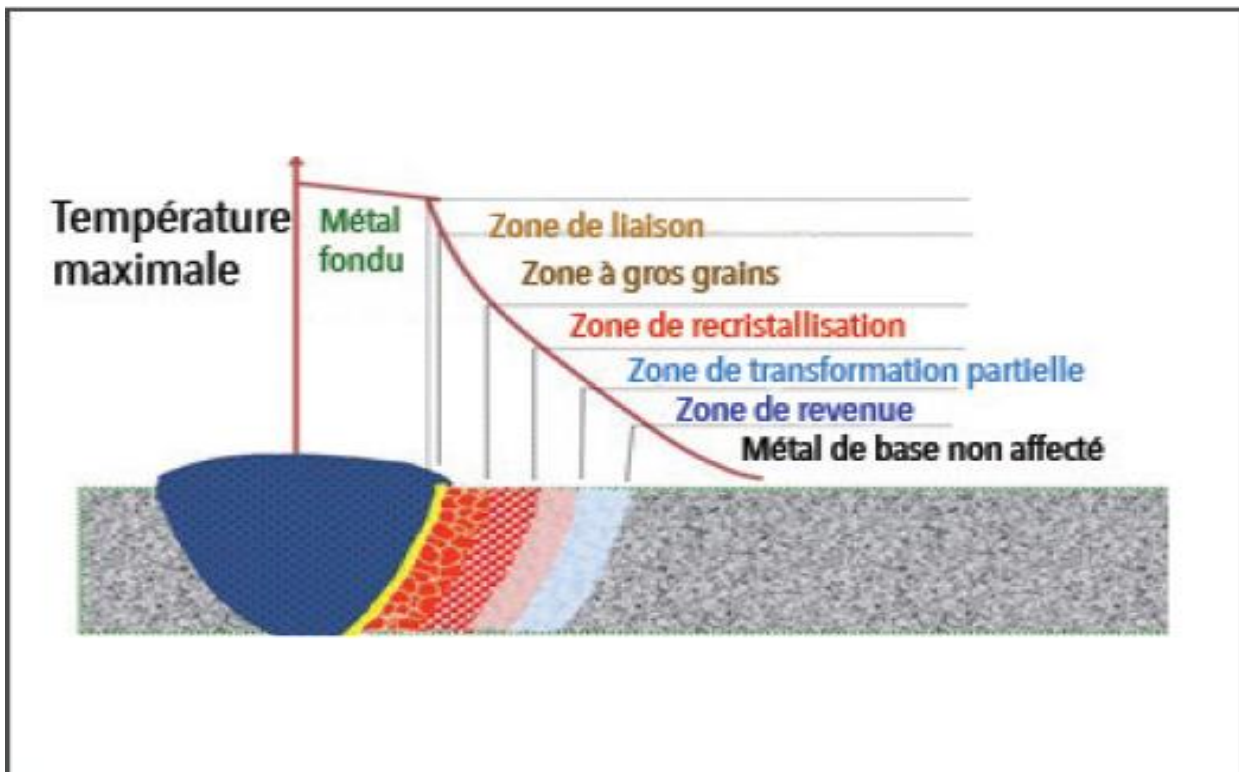


Figure II.2 Illustration simple de la ZAT et de la variation de température [13]

La configuration spatiale de la ZAT dans un assemblage soudé réalisé sur un acier à faible teneur en carbone (ou faiblement allié) est représentée à la Figure II.3. Ces différentes sous-régions sont couramment désignées par les sigles présentés dans cette même figure.

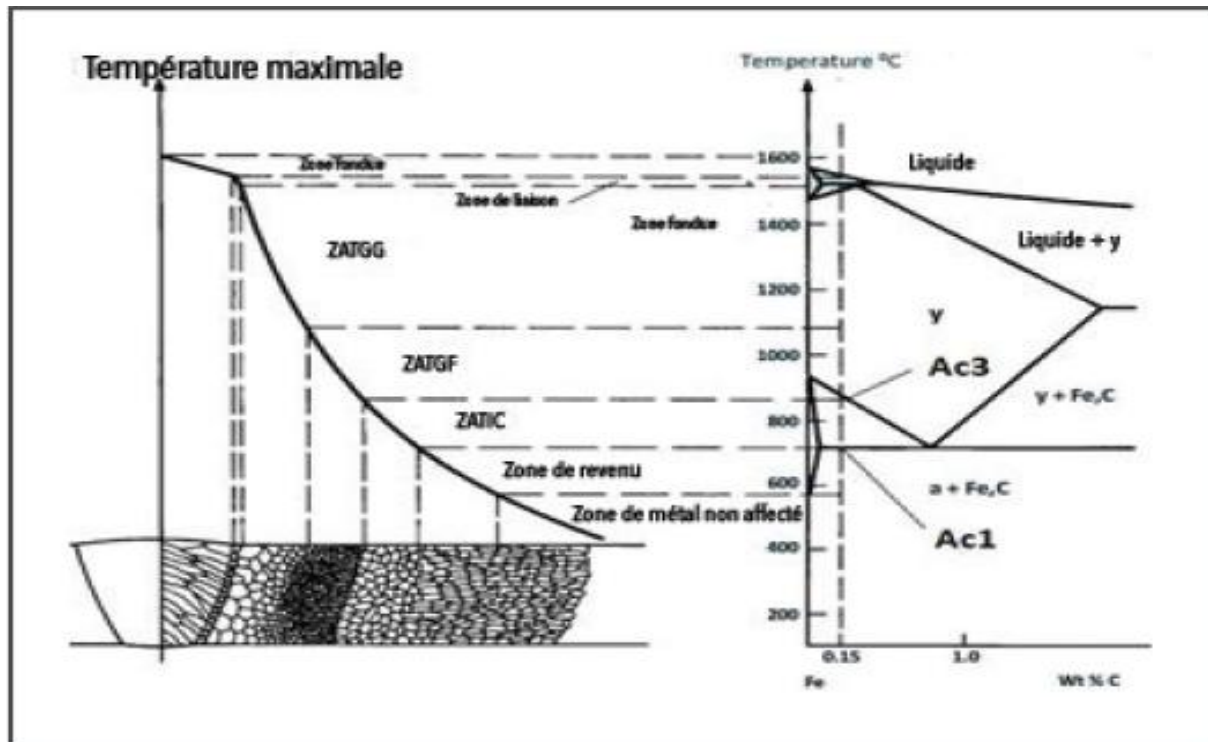


Figure II.3 Différentes parties de la zone d'une soudure. [13]

La zone affectée thermiquement à gros grains (ZATGG) : désigne la portion de la ZAT caractérisée par une microstructure à gros grains. Dans cette région, bien que le métal n'ait pas atteint son point de fusion, la température maximale atteinte durant le processus de soudage a induit une austénitisation complète de l'acier, entraînant une croissance notable de la taille des grains d'austénite. Les températures excèdent les 1100 °C dans cette zone. Cette microstructure spécifique est corrélée à une résistance aux chocs relativement faible à basses températures, ainsi qu'à une susceptibilité accrue à l'amorçage de fissures au sein de la ZATGG. Considérée comme le point critique de l'assemblage soudé, cette zone fait l'objet d'investigations approfondies par de nombreux chercheurs dans le but d'améliorer ses propriétés.

$$\text{ZATGG : } (1100\text{ °C} \leq T_{\text{max}} \leq T_{\text{m}})$$

avec T_{m} – température de fusion de l'acier.

La zone affectée thermiquement à grains fins (ZATGF) : représente une portion spécifique de la ZAT caractérisée par une microstructure à grains affinés. Dans cette zone, bien que le métal de base n'ait pas subi de fusion, le cycle thermique induit par le soudage a permis d'atteindre une température suffisante pour provoquer une transformation complète en austénite sans engendrer de grossissement significatif des grains austénitiques initiaux. Cette température maximale est typiquement comprise entre la température A_{c3} et 1100 °C. Ce cycle thermique est analogue à un traitement de normalisation métallurgique, résultant en la formation d'une microstructure constituée de ferrite et de perlite fines, conférant ainsi à cette région des propriétés mécaniques améliorées en termes de résistance et de ténacité.

$$\text{ZATGF : } (A_{c3} \leq T_{\text{max}} \leq 1100\text{ °C})$$

La région inter critique de la zone affectée thermiquement (ZATIC) : se caractérise par une transformation incomplète en austénite, les températures maximales atteintes se situant entre les points critiques Ac1 et Ac3. Durant le refroidissement, la perlite subit une transformation complète en austénite, tandis qu'une fraction limitée de la ferrite se dissout et se distribue finement au sein de l'austénite néoformée. Il en résulte une hétérogénéité marquée des propriétés mécaniques au sein de cette zone.

$$\text{ZATIC : } (Ac1 \leq T_{max} \leq Ac3)$$

La zone de revenu, également désignée comme zone sous-critique de la zone affectée thermiquement (ZATSC) : représente la portion de la ZAT qui a été exposée à des températures inférieures à Ac1, tel que schématisé à la Figure II.3. Cette température correspond essentiellement à la température de revenu à haute température. La microstructure observée dans cette région est similaire à la structure en grains allongés caractéristique du matériau de base après le processus de laminage. Les propriétés mécaniques, qui demeurent comparables à celles du matériau de base, ne subissent que des variations minimales au sein de cette zone. Par conséquent, la zone sous-critique exerce une influence limitée sur les propriétés intrinsèques du matériau de base (Hao, Niu et Gao, 2006). [13]

$$\text{ZATSC : } (600\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{max} \leq Ac1)$$

2.6 Normes qui référencent les informations sur la Zone Affectée Thermiquement

Les spécifications normatives qui documentent les informations relatives à la Zone Affectée Thermiquement

De nombreuses normes techniques abordent la ZAT. Ci-après, quelques-unes de celles qui proposent des directives pour la maîtrise des conséquences de la ZAT sur les matériaux ayant subi un soudage ou un traitement thermique. Parmi les normes fondamentales, on retrouve :

American Welding Society D1.1 : Cette spécification normative établit les exigences pour la conception, la fabrication et le contrôle des structures soudées. Elle propose des directives pour la gestion de la dimension et de l'étendue de la ZAT, ainsi que pour la minimisation des discontinuités telles que les fissures et la porosité.

ISO 9606-1 : Cette norme internationale fournit les directives pour la qualification des soudeurs pour le soudage par fusion des aciers. Elle inclut des exigences pour la maîtrise des effets de la ZAT sur les propriétés du matériau soudé et pour la réalisation d'essais non destructifs visant à la détection des défauts au sein de la ZAT.

Norme européenne EN 1011-2 : Cette norme européenne fournit les directives pour le soudage des matériaux métalliques, incluant les exigences pour la gestion de la taille et de l'étendue de la ZAT et la minimisation de l'apparition de défauts tels que le manque de fusion et la porosité.

Code ASME pour chaudières et récipients sous pression : Ce code de spécifications établit les exigences pour la conception, la fabrication et le contrôle des chaudières, des récipients sous pression et des composants des centrales nucléaires. Il inclut des directives pour la maîtrise des effets de la ZAT sur les propriétés des matériaux soudés et pour la réalisation d'examen non destructifs afin d'identifier les défauts dans la ZAT.

Ces normes constituent des référentiels précieux pour la gestion des conséquences de la ZAT sur les matériaux soudés ou ayant subi un traitement thermique, garantissant ainsi l'intégrité et la sécurité des structures et des composants assemblés par soudage. [14]

2.7 Méthodes d'analyse de la zone affectée thermiquement

La zone affectée thermiquement (ZAT) désigne la portion du matériau de base qui, bien que n'ayant pas atteint son point de fusion, a subi des modifications de ses propriétés intrinsèques sous l'effet de l'apport thermique induit par les procédés de soudage, brasage fort, brasage ou coupage. La détermination de l'étendue spatiale et des caractéristiques spécifiques de la ZAT représente une étape cruciale dans l'évaluation de l'intégrité structurelle et des performances fonctionnelles des assemblages soudés. Plusieurs approches méthodologiques sont employées pour caractériser la ZAT :

2.7.1 Méthodes Destructives

- **Essai de micrographie** : Constituant la technique la plus répandue et la plus précise, elle implique le prélèvement d'un échantillon transactionnel de la soudure, suivi d'un polissage et d'une attaque chimique sélective afin de révéler la microstructure. L'observation microscopique, qu'elle soit optique ou électronique, permet de visualiser les différentes microstructures constitutives (métal fondu, ZAT, métal de base) et de quantifier la largeur de la ZAT. Des sous-régions spécifiques au sein de la ZAT (telles que la zone à gros grains, la zone à grains fins, la zone partiellement transformée) peuvent également être identifiées en fonction de leurs microstructures distinctes. [15]
- **Essais de dureté** : Des micro-indentations (Vickers ou Knoop) sont réalisées à travers les différentes zones de l'assemblage soudé, incluant le métal de base et la ZAT. La ZAT se manifeste fréquemment par une variation de la dureté par rapport au matériau de base. L'établissement d'un profil de dureté permet de délimiter la ZAT comme les régions où l'on observe des changements significatifs de dureté.
- **Essais mécaniques** : Des essais de traction, de pliage ou de résilience peuvent être effectués sur des éprouvettes englobant la soudure et la ZAT. Les résultats obtenus de ces essais peuvent indirectement renseigner sur l'étendue de la ZAT en mettant en évidence des modifications de la résistance mécanique, de la ductilité ou de la ténacité résultant des transformations microstructurales survenues dans cette zone. [16]

2.7.2 Méthodes Non Destructives

- **Inspection visuelle et évaluation des couleurs de revenu** : Bien que présentant une précision limitée, l'examen visuel peut fournir une indication approximative de l'étendue de la ZAT par l'observation des changements chromatiques (couleurs de revenu) à la surface du métal adjacent à la soudure. Ces colorations résultent de l'oxydation à haute température et peuvent être corrélées à des intervalles de température approximatifs. Néanmoins, cette méthode ne fournit pas d'informations concernant les modifications microstructurales internes.
- **Thermographie infrarouge** : Cette technique permet de cartographier la distribution thermique pendant et après le processus de soudage. L'analyse des gradients thermiques et des cycles thermiques permet d'estimer la région ayant été exposée à des températures suffisamment élevées pour induire des transformations microstructurales.
- **Ultrasons non linéaires (NLU)** : Des études ont démontré la sensibilité des ultrasons non linéaires aux modifications microstructurales, incluant la formation de précipités et les dislocations au sein de la ZAT des aciers inoxydables austénitiques. Cette technique offre un potentiel pour évaluer les caractéristiques de la ZAT de manière non destructive.

- **Essais par courants de Foucault** : Cette méthode électromagnétique est capable de détecter des variations de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique, qui peuvent être affectées par les transformations microstructurales au sein de la ZAT. Principalement utilisée pour la détection de défauts de surface et su superficiels, elle pourrait potentiellement être adaptée à la caractérisation de la ZAT.
- **Essais par ressuage et magnétoscopie** : Bien que principalement employés pour la détection de discontinuités de surface (fissures, porosités), ces méthodes peuvent indirectement contribuer à l'identification de problèmes potentiels au sein de la ZAT qui pourraient se manifester par des défauts.
- **Mesure de dureté par méthodes non destructives** : Il existe des techniques de mesure de dureté non destructives (par exemple, les méthodes ultrasoniques ou à impact) qui peuvent être utilisées pour évaluer les variations de dureté à travers la soudure et la ZAT sans altérer l'intégrité de la pièce.

Le choix de la méthode d'investigation dépendra du niveau de précision requis, de la tolérance à l'endommagement de la pièce soudée et des informations spécifiques recherchées concernant la ZAT. Fréquemment, une approche combinatoire de plusieurs techniques est privilégiée pour obtenir une caractérisation exhaustive. [17]

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une analyse approfondie de la zone affectée thermiquement (ZAT), une région critique située entre le métal de base et le métal fondu, dont les propriétés mécaniques et microstructurales sont fortement modifiées par l'effet thermique du soudage. Après avoir défini les caractéristiques générales de la ZAT, nous avons étudié les transformations métallurgiques susceptibles d'y apparaître, telles que la croissance du grain, la formation de phases fragiles ou encore les variations de dureté.

Nous avons également souligné l'influence des paramètres de soudage, du matériau de base et du cycle thermique sur l'étendue et la nature des altérations dans cette zone. L'ensemble de ces éléments met en évidence l'importance d'un contrôle rigoureux des conditions de soudage afin de limiter les défauts potentiels et d'assurer la fiabilité de l'assemblage.

Cette analyse de la ZAT constitue ainsi un fondement essentiel pour mieux comprendre les phénomènes de défaillance ou de dégradation à long terme dans les assemblages soudés, et servira de point d'appui pour les chapitres suivants.

Chapitre III : Défauts de soudage

3.1 Introduction

Lors d'un procédé de soudage, différents types de défauts peuvent apparaître dans la soudure ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Ces défauts sont généralement le résultat de conditions de soudage mal maîtrisées, d'un choix inadapté des paramètres, ou encore de l'environnement de travail. Ils se présentent sous différentes formes : porosités, inclusions, manque de fusion, fissures, etc. Certains sont tolérés dans certaines limites, mais d'autres, comme les fissures, sont considérés comme critiques. Ces défauts peuvent nuire à la qualité de l'assemblage, compromettre la résistance mécanique, et provoquer des défaillances en service.

Dans ce chapitre, nous allons définir les principaux défauts rencontrés lors des opérations de soudage et identifier les causes qui peuvent les engendrer.

3.2 Défauts de soudages

Il existe une grande diversité de défauts de soudage, qui se distinguent par leur nature (solide, gazeuse), leur forme géométrique, ainsi que par leur origine. Lors des opérations de contrôle, il est essentiel de différencier clairement les types de défauts présents, car cette distinction permet souvent d'évaluer le risque de fissuration ou de rupture du matériau.

De manière générale, un défaut est défini comme une anomalie dans la matière susceptible de compromettre l'intégrité de l'assemblage soudé.

En soudage, un défaut correspond à une discontinuité dans le cordon ou à une déviation par rapport à la géométrie attendue de l'assemblage.

3.3 Type de défaut de soudage

On peut classer les défauts de soudage en plusieurs catégories principales :

3.3.1 Les fissures

Les fissures, qui correspondent à des fractures planes situées dans le métal fondu ou le métal de base, sont considérées comme les défauts de soudage les plus critiques. Elles peuvent être internes ou externes, et résultent d'une rupture localisée causée par les contraintes de solidification, le refroidissement rapide, ainsi que la contraction du métal et l'évolution de la structure granulaire dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

En raison de leur forme allongée et pointue, les fissures créent une forte concentration de contraintes à leur extrémité, ce qui augmente considérablement le risque de propagation et de rupture.

Les fissures de soudure peuvent se manifester sous différentes tailles, formes et orientations, parmi lesquelles on distingue notamment :

- **Longitudinal**

Les fissures longitudinales apparaissent fréquemment dans les petits cordons de soudure reliant des pièces de forte section. Elles résultent généralement de vitesses de refroidissement rapides combinées à des contraintes résiduelles importantes. Dans le cas du soudage à l'arc submergé, ces fissures sont souvent causées par des vitesses de soudage trop élevées ou peuvent être liées à la présence de porosités internes invisibles en surface.

- **Transversal**

Les fissures transversales sont orientées perpendiculairement à l'axe du cordon de soudure. Elles peuvent être de petite taille et localisées uniquement dans le métal déposé, ou au contraire, se propager vers la zone affectée thermiquement (ZAT), puis atteindre le métal de base. Leur développement dépend principalement des contraintes thermiques et de la configuration de l'assemblage.

- **Cratère**

Ces fissures apparaissent au niveau du cratère formé à l'extrémité d'un cordon de soudure, généralement lorsque l'arc est interrompu de manière trop brusque. Également appelées fissures en étoile, elles sont souvent classées parmi les fissures à chaud et présentent un aspect ramifié, formant un réseau étoilé. Ce type de défaut est particulièrement fréquent dans les matériaux à fort coefficient de dilatation thermique, comme l'acier inoxydable austénitique ou l'aluminium. Pour limiter leur apparition, il est recommandé de terminer la soudure par un cordon légèrement convexe avant de couper l'arc. À noter que ces fissures peuvent parfois évoluer et déclencher des fissures longitudinales plus profondes. [19]

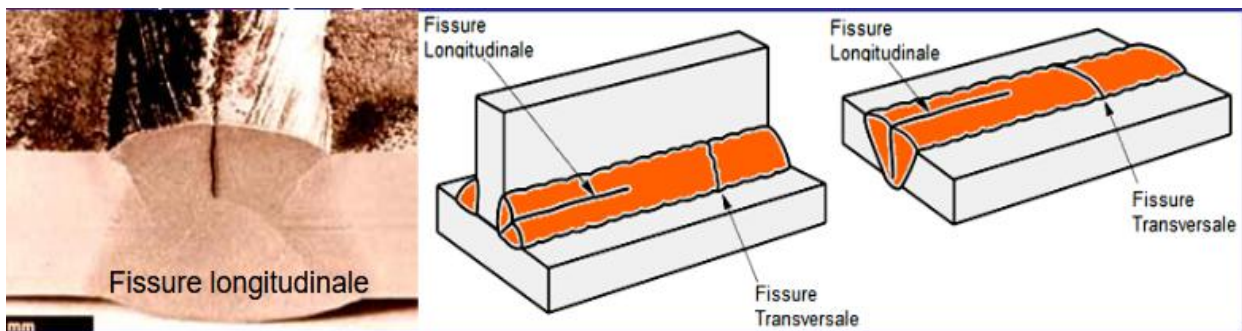


Figure III.1 Fissurer longitudinale et transversale [19]



Figure III.2 Fissure transversale [19]

Selon la température à laquelle elles se produisent, les fissures peuvent être :

- **Fissures à chaud**

Ces fissures apparaissent au moment de la solidification et de la cristallisation du joint soudé, lorsque la température peut dépasser les 10 000 °C. On distingue principalement deux types de fissures à ce stade :

Les fissures de solidification et les fissures de liquation. Les fissures de solidification se forment lorsque le métal possède une teneur élevée en impuretés ou en carbone, ou encore en cas de perturbation du flux thermique durant le refroidissement. Quant aux fissures de liquation, elles surviennent en raison d'une élévation excessive de la température dans certaines zones, entraînant la fusion partielle de phases à bas point de fusion. Cette liquéfaction locale affaiblit la structure du joint, favorisant ainsi la formation de fissures

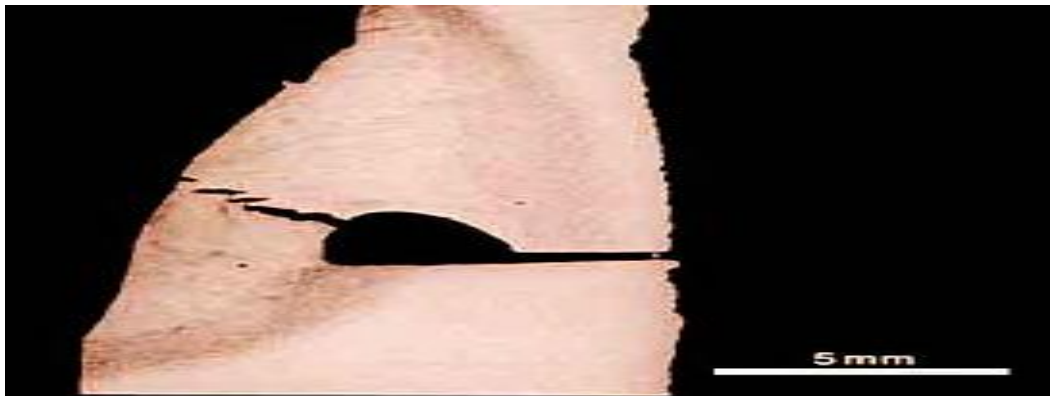


Figure III.3 Fissure à chaud [19]

- **Fissures froides**

Ces défauts correspondent à des fissures retardées qui apparaissent après la solidification complète du métal fondu, parfois même plusieurs jours après la fin du soudage. Elles sont généralement parallèles à la limite de fusion, mais peuvent également se développer plus loin sous l'effet des contraintes résiduelles de traction.

Les fissures à froid sont principalement causées par un manque de préchauffage, des contraintes internes élevées, une basse température ambiante, une présence excessive d'hydrogène diffusible, ou encore une sensibilité métallurgique du matériau (par exemple, structures martensitiques fragiles). Ces facteurs combinés favorisent l'initiation et la propagation des fissures après soudage



Figure III.4 Fissure froide

• Causes de la fissure de soudure

- Mauvaise ductilité ou contamination de métaux de base donnés.
- Combinant une vitesse de soudage élevée avec un faible courant.
- Solidification à haute contrainte résiduelle due au retrait.
- Manque de préchauffage avant de commencer le soudage.
- La teneur élevée en soufre et en carbone des métaux communs.
- Utilisation de l'hydrogène comme gaz de protection pour le soudage des métaux ferreux.
- Contrainte articulaire excessive, limitant les mouvements pendant le refroidissement.
- Rapport profondeur/largeur des cordons de soudure incorrect.
- Sélection incorrecte des consommables (par exemple, mauvais métal d'apport, taille d'électrode incorrecte). [18]

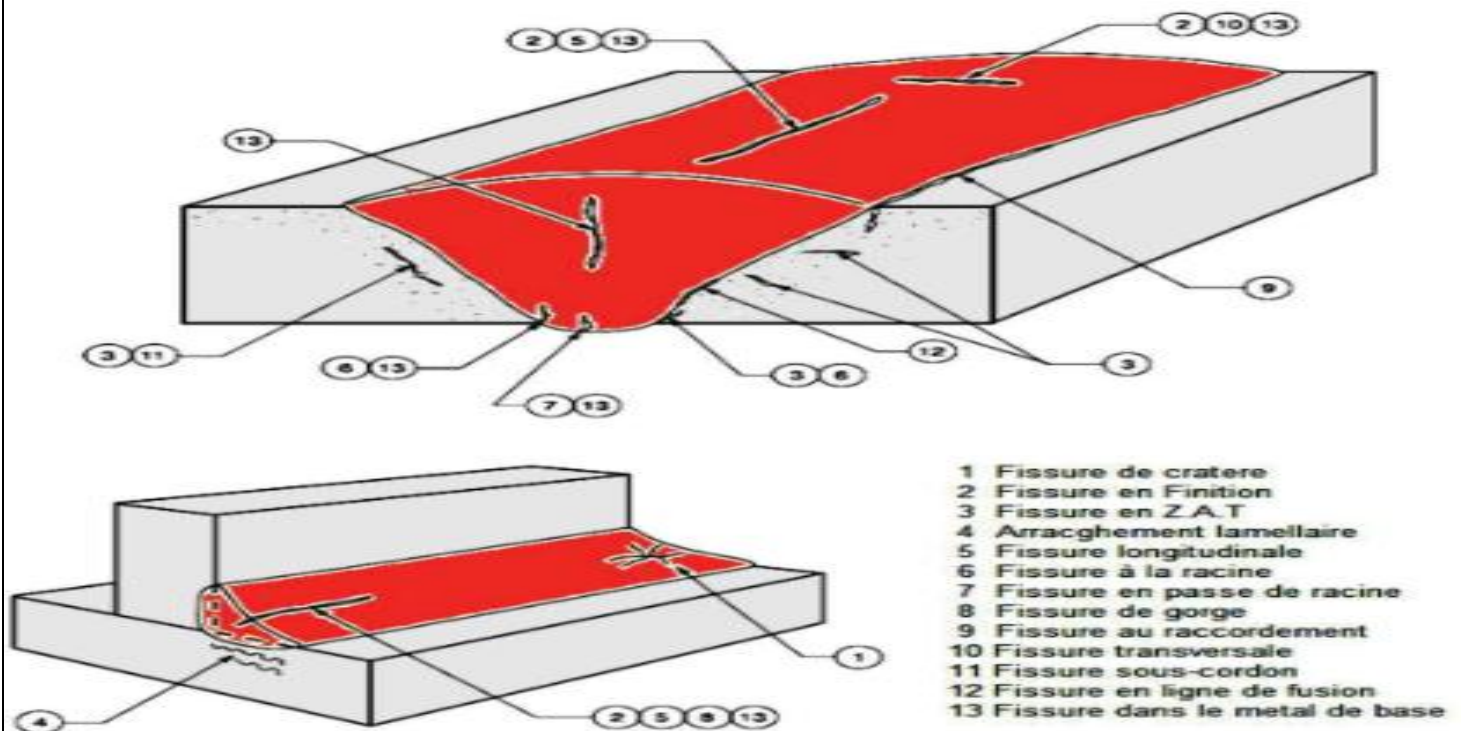


Figure III.5 Types de fissures [19]

3.3.2 Manque de fusion

Le manque de fusion désigne une absence d'adhérence entre le métal de base et le métal d'apport. Ce défaut forme une entaille vive qui peut agir comme point d'amorçage pour une fissure de fatigue, compromettant ainsi la résistance mécanique de l'assemblage.

Les zones où le manque de fusion peut apparaître sont les suivantes :

- Sur le flanc du cordon, entre le métal de base et le métal fondu,
- Entre deux passes de soudage, en cas de mauvaise liaison entre les couches successives,
- À la racine de la soudure, lorsque la pénétration est insuffisante et que la liaison entre les deux pièces n'est pas assurée.

- **Sur le flanc de la soudure, entre le métal de base et le métal déposé (manque de fusion des bords ou collages)**

Ce type de défaut correspond à un manque de cohésion moléculaire entre le métal d'apport et le métal de base au niveau des bords du cordon. Il traduit une absence de fusion correcte dans cette zone, ce qui peut affaiblir l'intégrité de l'assemblage.

- **Causes possibles**

- Énergie d'arc insuffisante
- Vitesse de soudage excessive
- Mauvais angle d'attaque de l'électrode
- Écoulement du métal d'apport devant l'arc, dû à une position de soudage inadaptée
- Inductance trop élevée en soudage MAG
- Mauvais nettoyage des bords à souder

- **Manque de fusion entre passes**

Ce défaut se manifeste par des zones non fusionnées situées le long de la surface du cordon ou aux interfaces entre deux passes successives. Il résulte le plus souvent d'un apport thermique insuffisant, empêchant une liaison correcte entre les couches de métal fondu.

- **Manque de fusion à la racine de la soudure**

Ce défaut correspond à une absence de fusion moléculaire entre le métal d'apport et le métal de base au niveau de la racine du joint soudé. Il est fréquemment associé à un manque de pénétration, ce qui fragilise l'assemblage, en particulier dans les efforts en traction ou flexion.

- **Causes possibles**

- Apport thermique insuffisant entre les passes
- Vitesse de soudage trop élevée
- Mauvais positionnement de la torche ou de l'électrode
- Paramètres de soudage mal réglés (intensité, tension, etc.)

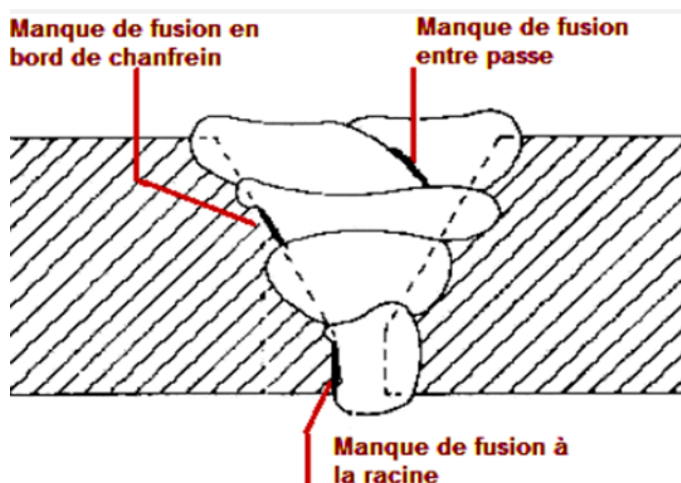


Figure III.6 Localisation possible de manquer de fusion [19]

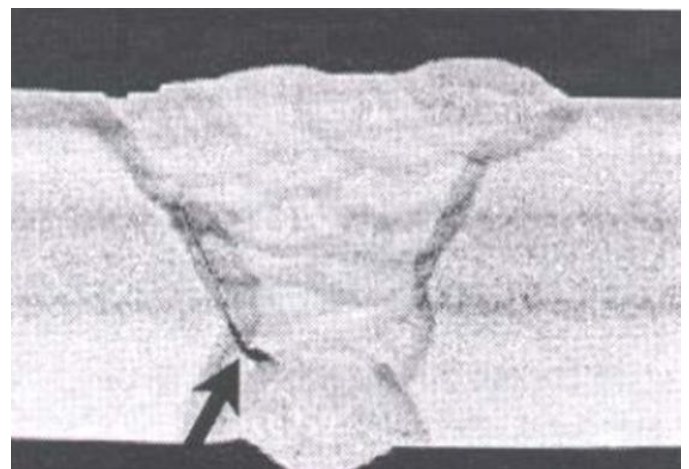


Figure III.7 Manque de fusion à la racine [19]

3.3.3 Inclusions

Les inclusions sont des éléments étrangers (gaz ou solides) emprisonnés dans le métal fondu au cours du soudage. Elles peuvent altérer la qualité du joint et réduire sa résistance mécanique. On distingue notamment :

- **Inclusions gazeuses**
 - Porosités vermiculaires
 - Porosités de reprise
 - Porosités uniformes
- **Porosités vermiculaires**

Ce sont des cavités allongées causées par l'emprisonnement de gaz lors de la solidification du métal fondu. Elles peuvent apparaître de manière isolée ou regroupée, et présentent souvent une forme caractéristique en arête de poisson, suivant l'orientation des dendrites lors de la solidification.

- **Causes possibles**
 - Contamination de la surface à souder (huile, rouille, poussière, etc.)
 - Présence d'ouvertures, comme celles entre une tôle verticale et une tôle horizontale soudées en double cordon d'angle
 - Présence de doublures ou d'espaces entre tôles débouchant en surface

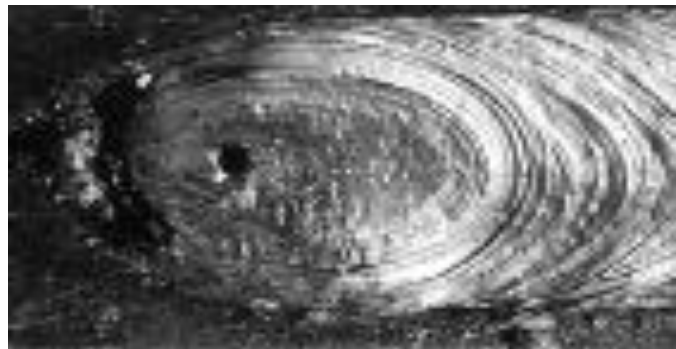


Figure III.8 Porosités vermiculaires [19]

- **Porosités de reprise**

Il s'agit de petites cavités localisées dans une zone restreinte du cordon de soudure. Elles apparaissent généralement lors de l'amorçage d'une passe, que ce soit en soudage manuel ou automatique, en raison d'un mauvais amorçage de l'arc électrique.

- **Causes possibles**
 - Retard dans l'activation de la protection gazeuse au début d'une passe
 - Mauvais amorçage de l'arc par le soudeur en soudage manuel
- **Porosités uniformes**

Ce sont des petites cavités gazeuses réparties de manière homogène dans l'ensemble du cordon de soudure. Elles résultent d'un dégazage insuffisant du bain de fusion pendant la solidification.

- **Causes possibles**

- Électrodes ou baguettes de soudage oxydées ou corrodées
- Présence d'air dans le gaz de protection
- Traces d'huile ou d'hydrocarbures sur les pièces (résidus de nettoyage)
- Débit insuffisant du gaz de protection
- Fuites d'eau dans les équipements de soudage avec refroidissement liquide
- Insuffisance d'éléments désoxydants dans l'électrode ou la baguette
- Courants d'air perturbant l'arc (notamment en soudage de tuyauteries en extérieur)

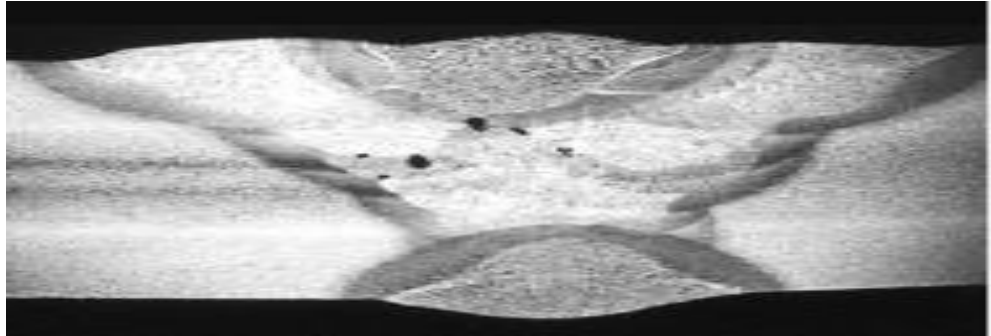


Figure III.9 Porosités uniformes [19]

- **Inclusions solides**

- **Laitier**
- **Tungstène**
- **Cuivre**

- **Inclusions de laitier**

Les inclusions de laitier correspondent à des résidus de laitier emprisonnés dans le cordon de soudure lors de la solidification. Elles peuvent compromettre la continuité métallurgique et affaiblir la résistance mécanique du joint.

Ces inclusions peuvent se présenter sous deux formes :

- Aspect linéaire : les inclusions sont regroupées parallèlement à l'axe du cordon, souvent entre les passes, formant une discontinuité allongée.
- Aspect isolé : les inclusions sont dispersées de manière irrégulière, sans orientation spécifique.

- **Causes possibles**

- Mauvais contrôle du laitier, notamment lorsqu'il précède le bain de fusion en raison d'une position de soudage inadaptée.
- Absence ou insuffisance de nettoyage entre les passes dans le cas d'une soudure multi-passes, entraînant l'enfermement du laitier résiduel.

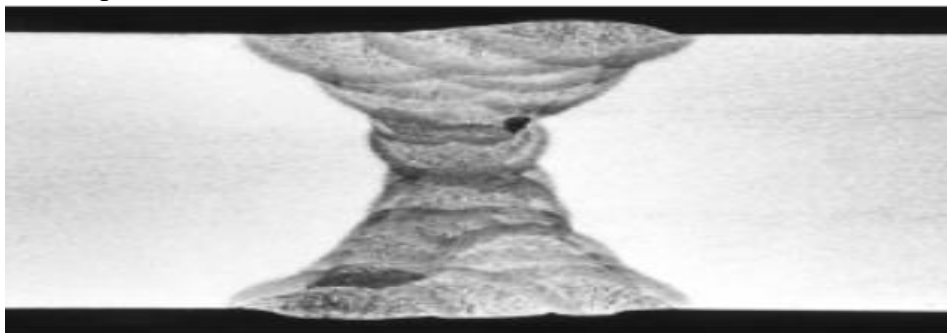


Figure III.10 Inclusions de laitier [19]

- **Inclusions de tungstène**

Ces défauts correspondent à la présence de fragments de tungstène issus de l'électrode utilisée dans le procédé TIG (GTAW). Ils apparaissent lorsque l'extrémité de l'électrode entre en contact accidentel avec le bain de fusion ou fond partiellement sous l'effet d'un courant excessif, entraînant ainsi son incorporation dans le métal déposé.

- **Causes possibles**

- Electrode trop pointue
- Intensité de courant trop élevée
- Débit de gaz de protection trop faible.
- Coupure trop rapide du gaz de protection à la fin du soudage.

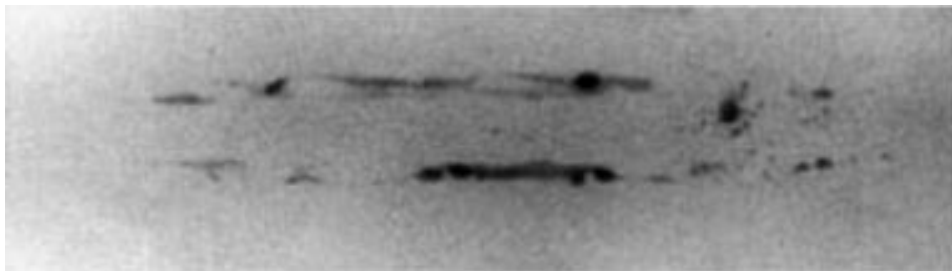


Figure III.11 Inclusions de tungstène [19]

- **Inclusions de cuivre**

Ce type de défaut résulte de la présence accidentelle de particules de cuivre dans le bain de fusion. Leur incorporation dans la soudure peut provoquer la formation de fissures, en particulier dans la zone fondue ou affectée thermiquement, en raison de la différence de comportement métallurgique entre le cuivre et l'acier.

- **Causes possibles**

- Fusion au niveau des points de contact lors du soudage MIG, généralement due à un arc instable
- Défaillance du système de refroidissement à eau, entraînant la surchauffe et la fusion partielle de certains composants de la torche



Figure III.12 Inclusions de cuivre [19]

3.3.4 Manque de pénétration

En soudage, la pénétration désigne la profondeur atteinte par le métal fondu à l'intérieur du métal de base. Un manque de pénétration survient lorsque la rainure est trop étroite ou mal préparée, empêchant le métal fondu de remplir complètement le joint jusqu'à sa base. Ce défaut limite la continuité de la liaison métallique, ce qui réduit considérablement la résistance mécanique de la soudure et augmente le risque de rupture sous contrainte.

- **Localisations possibles des manques de pénétration**

Le manque de pénétration peut être localisé :

- A la racine de la soudure (soudure en « V »)



Figure III.13 Manque de pénétration dans la soudure en V [19]

- A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X »)

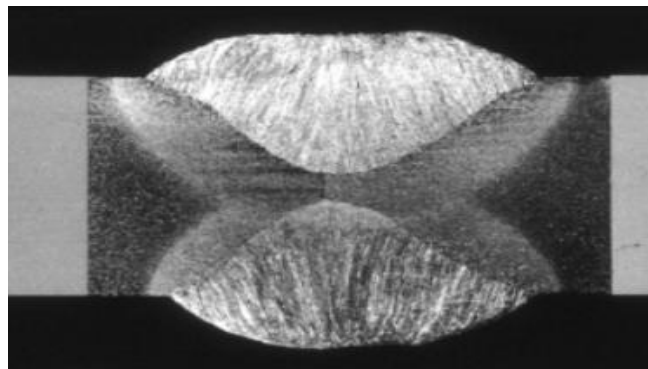


Figure III.14 Manque de pénétration dans le soudeur avec reprise à revers [19]

- **Manque de pénétration à la racine**

Ce défaut se produit lorsque le métal d'apport ne parvient pas à atteindre la racine du chanfrein, c'est-à-dire la partie la plus profonde du joint. Il en résulte une liaison incomplète entre les pièces, compromettant la solidité de la soudure, notamment dans les assemblages soumis à des efforts de traction ou de flexion.

- **Causes possibles**

- Écartement trop réduit entre les pièces
- Méplat trop large sur le chanfrein
- Soudage vertical descendant au lieu de montant
- Apport de chaleur insuffisant
- Vitesse de soudage trop rapide
- Mauvais diamètre d'électrode en soudage manuel
- Inductance excessive en soudage MAG

Laitier présent devant le bain de fusion

- **Manque de pénétration dans la soudure**

Ce défaut survient lorsque le métal d'apport ne pénètre pas jusqu'au centre du chanfrein, laissant une zone non soudée entre les deux biseaux. Cette absence de liaison au cœur du joint compromet l'intégrité mécanique de l'assemblage et peut entraîner des ruptures prématurées en service.

- **Causes possibles**

- Préparation inadéquate du chanfrein (angle trop fermé ou fond de chanfrein irrégulier)
- Intensité de soudage insuffisante
- Vitesse de soudage excessive
- Mauvais positionnement de l'électrode ou du fil d'apport
- Mauvais réglage de la hauteur de l'arc ou du décalage axial

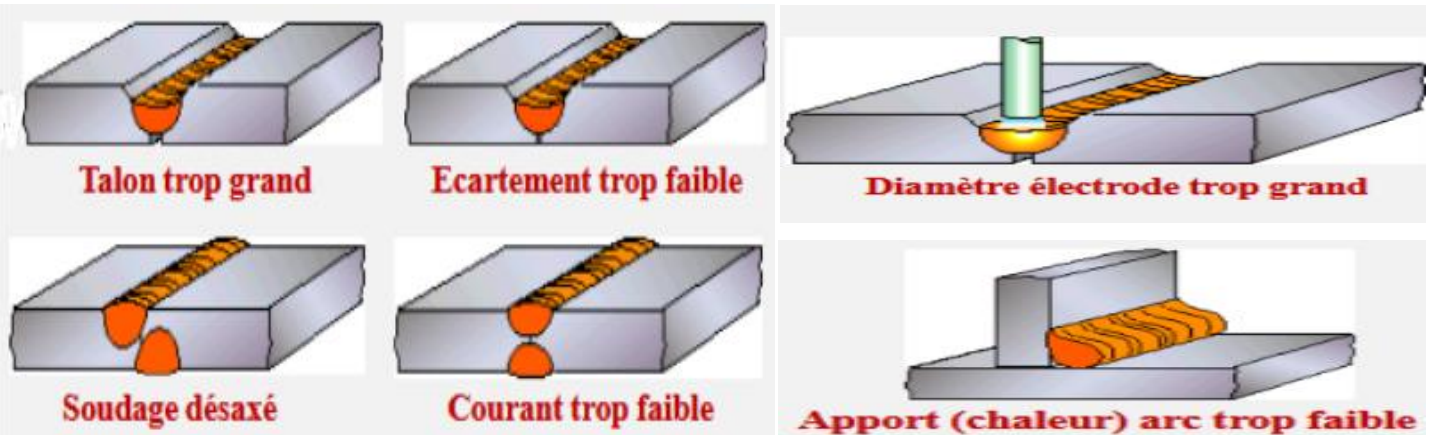


Figure III.15 Manque de pénétration [19]

3.3.5 Excès de matière

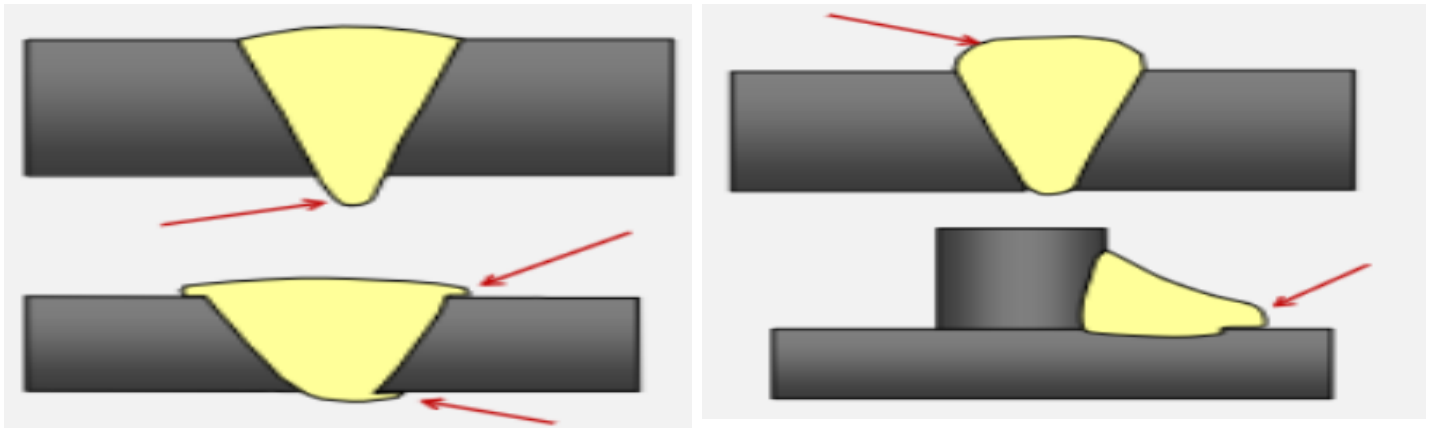
Ce défaut se manifeste par une quantité excessive de métal fondu déposée soit à la racine du cordon (on parle alors d'excès de pénétration), soit à la surface sous forme de surépaisseur. Dans certains cas, cet excès s'accompagne de recouvrements du métal de base non fusionnés, ce qui peut créer des zones de faiblesse ou favoriser l'apparition d'autres défauts (manques de fusion, fissures, etc.).

- **Excès de pénétration**

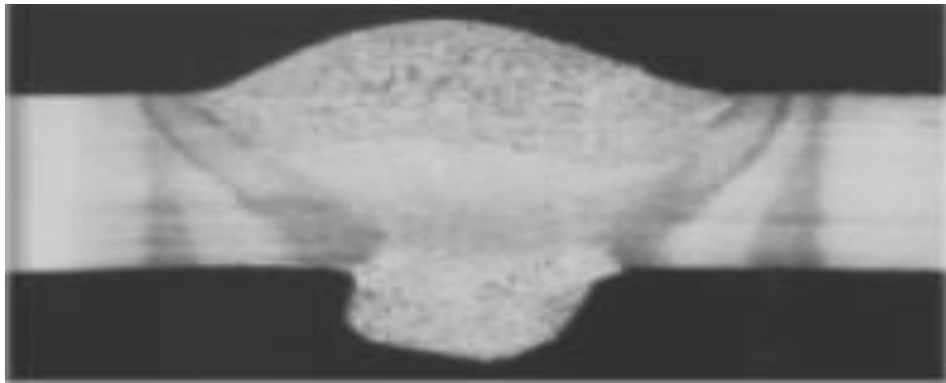
Ce défaut correspond à une pénétration excessive du métal d'apport à la racine du cordon de soudure. Il se traduit par un dépassement excessif du métal fondu à travers le joint, pouvant créer une surépaisseur interne non contrôlée qui nuit à l'aspect ou à la performance mécanique de l'assemblage.

- **Causes possibles**

- Écartement excessif entre les pièces
- Jeu trop important entre l'anneau-support et le métal de base
- Apport thermique trop élevé
- Vitesse de soudage trop lente
- Manque d'expérience du soudeur



• **Figure III.16** Positions des excès de pénétration [19]



• **Figure III.17** Excès de pénétration [19]

3.3.6 Surépaisseur

Ce défaut se caractérise par un excès de métal déposé qui entraîne une convexité excessive dans les soudures d'angle, ou une épaisseur supérieure à celle du métal de base dans le cas des soudures bout à bout. Il peut nuire à l'aspect visuel, à l'aérodynamisme (dans certains cas), et à la bonne répartition des contraintes dans l'assemblage.

- **Causes possibles**
 - Énergie d'arc trop élevée, notamment en soudage MIG, MAG ou sous flux
 - Mauvais choix du diamètre d'électrode dans les soudures multi-passes
 - Manipulation incorrecte de l'électrode pendant l'exécution

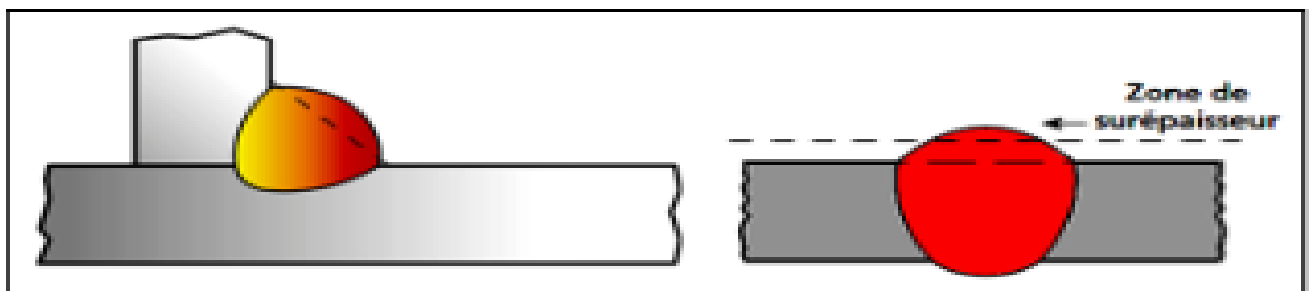


Figure III.18 Convexité excessive & surépaisseur excessive [19]

3.3.7 Recouvrements non fusionnés (débordements)

Ce défaut apparaît lorsque l'excès de métal d'apport s'écoule sur la surface du métal de base, soit au niveau de la racine, soit sur la face supérieure de la soudure, sans qu'il y ait fusion avec ce métal de base. Ce manque de liaison crée une discontinuité qui peut agir comme amorce de fissure sous contraintes.

- **Causes possibles**

- Mauvaise manipulation de l'électrode, notamment en soudage vertical (balancement excessif)
- Apport thermique insuffisant
- Vitesse de soudage trop lente combinée à un apport thermique trop élevé
- Position de soudage inadaptée

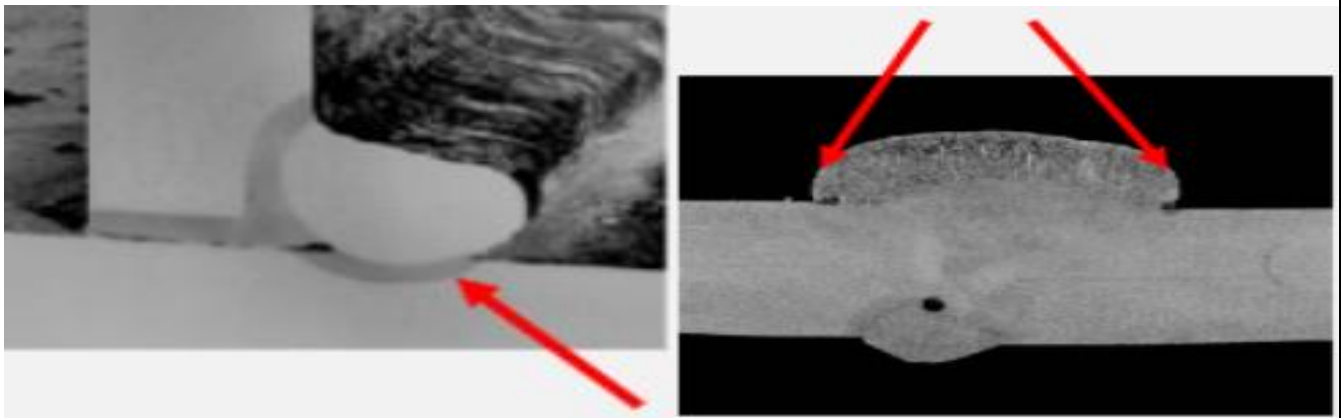


Figure III.19 Débordements [19]

3.3.8 Dénivellement

Ce défaut correspond à un mauvais alignement des bords à assembler dans une soudure bout à bout. Cette irrégularité géométrique engendre des concentrations de contraintes locales, ce qui peut être particulièrement néfaste en cas de sollicitations cycliques, favorisant ainsi la fatigue du matériau. [19]

- **Causes possibles**

- Déformations provoquées par d'autres soudures voisines
- Ovalisation excessive de tôles formées, notamment sur les cordons circulaires

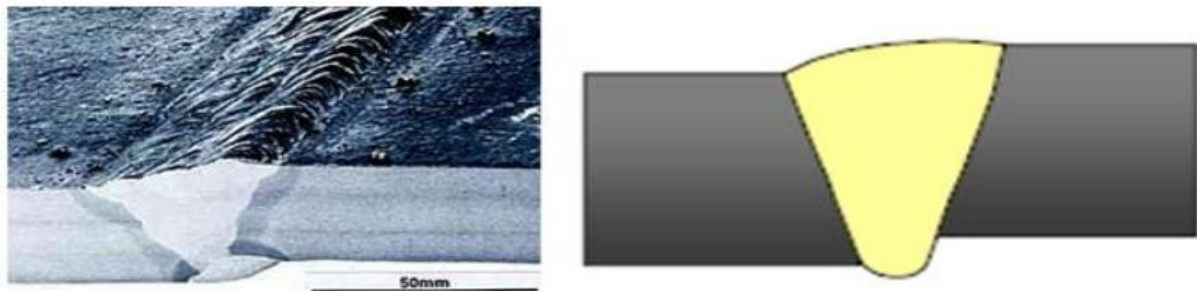


Figure III.20 Dénivellement [19]

3.3.9 Brûlure à travers

Ce défaut se produit lorsqu'une chaleur excessive est appliquée lors du soudage, provoquant la perforation du métal de base au centre du joint. Il est particulièrement fréquent lors du soudage de tôles minces (généralement inférieures à 6 mm d'épaisseur), mais peut également se manifester sur des pièces plus épaisses si les paramètres de soudage sont trop élevés ou si la vitesse de déplacement de la torche est trop faible. La brûlure à travers compromet gravement l'intégrité de l'assemblage.

- **Causes possibles**

- Paramètres de soudage trop élevés pour les métaux épais.
- Écarts considérablement importants entre les pièces métalliques.
- Le mouvement trop lent de la torche.
- Utiliser des tailles de fils incorrectes. [18]



Figure III.21 Brûlure à travers [18]

3.3.10 Défauts de surface – Morsures / Caniveaux

Il s'agit de creux irréguliers situés à la jonction entre le cordon de soudure et le métal de base. Ces défauts apparaissent sous forme de rainures ou d'entailles longitudinales, généralement causées par un mauvais contrôle de la fusion ou un déplacement incorrect de l'arc. Ils peuvent agir comme des concentrateurs de contraintes et favoriser l'amorçage de fissures, notamment en fatigue.

- **Causes possibles**

- Fusion du bord supérieur d'une soudure d'angle ou bout-à-bout due à une intensité trop élevée
- Cordon d'angle avec une section trop importante (côté > 9 mm)
- Balancement excessif de l'électrode, notamment en position verticale
- Vitesse de soudage trop faible
- Gaz de protection inadapté (procédés MIG/TIG)

Mauvais angle d'attaque de l'électrode, surtout en soudage de pièces d'épaisseurs différentes [19]

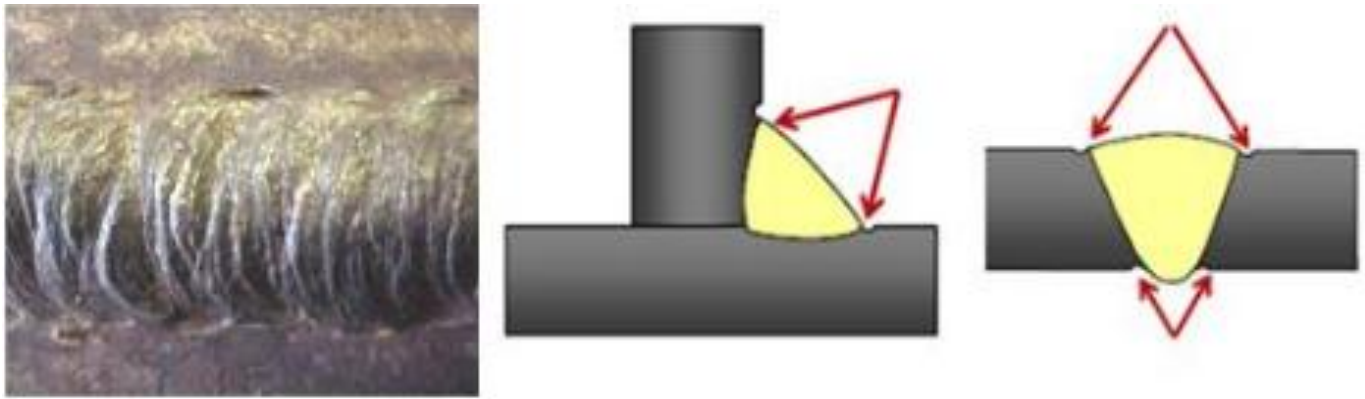


Figure III.22 Défaut de surface [19]



Figure III.23 Défaut de surface Caniveaux [19]

3.3.11 Effondrement

L'effondrement correspond à un affaissement du métal déposé, causé par une fusion excessive lors du soudage. Ce défaut altère le profil du cordon et peut compromettre la résistance mécanique de l'assemblage. Il existe plusieurs formes d'effondrement, selon la position de soudage, la géométrie du joint et les paramètres utilisés.

- **Causes possibles**
 - Vitesse de soudage insuffisante
 - Apport thermique excessif



Figure III.24 Effondrement [25]

Lorsque l'effondrement du bain de fusion devient suffisamment important pour provoquer une perforation de la soudure, on parle alors de trou ou de perçage. Ce défaut survient souvent lorsque la vitesse d'avance est trop faible, laissant le métal fondu s'accumuler et percer le métal de base. Ce phénomène est particulièrement critique lors du soudage de plaques minces, où un courant trop élevé accentue le risque de perçage.



Figure III.25 Effondrement à plat ou au plafond **Figure III.26** Effondrement en corniche [19]

3.4 Conclusion

Les opérations de soudage font partie des procédés spéciaux pouvant engendrer divers défauts tels que les fissures longitudinales et transversales, les cavités, les inclusions solides, les manques de fusion, ainsi que des défauts de forme.

Pour garantir la qualité des soudures et la fiabilité des assemblages, il est essentiel de mettre en place un suivi rigoureux à chaque étape : avant, pendant et après le soudage.

Chapitre IV : Techniques de Contrôle Qualité des Assemblages Soudés

4.1 Introduction

Le secteur du soudage est confronté à un impératif de maîtrise accrue de la qualité des produits et des assemblages soudés, dans le but d'assurer leur intégrité structurale et leur fonctionnalité. La détection prompte, fiable et économiquement viable des discontinuités constitue une préoccupation prédominante. Néanmoins, les méthodes d'inspection conventionnelles engendrent des coûts substantiels et des délais considérables. L'avènement de nouveaux procédés de soudage disruptifs et l'évolution des développements vers l'assemblage de matériaux hétérogènes, voire réputés difficilement soudables, complexifient davantage l'assurance qualité. Une inspection en temps réel représente la solution. [20]

4.2 Généralités sur le Contrôle Qualité en Soudage

Les processus de soudage constituent des étapes fondamentales dans la fabrication de nombreux équipements métalliques. Indépendamment du domaine industriel, la qualité des assemblages soudés est cruciale car elle assure l'intégrité structurale et la résistance mécanique des constructions ou composants fabriqués, ainsi que la sûreté des installations ou des équipements. À l'instar de toute activité industrielle, le soudage est soumis à des impératifs de qualité spécifiques. [21]

4.2.1 Enjeux du contrôle qualité

L'absence d'intégration de technologies modernes dans la gestion du processus de production induit une régression de l'efficacité et une majoration des coûts opérationnels. Une problématique analogue se manifeste dans le domaine du soudage lorsque l'évolution technologique est négligée et que des équipements obsolètes sont maintenus en service. Par ailleurs, le facteur humain demeure critique pour une croissance soutenue. Dans les contextes où l'automatisation intégrale de la production est irréalisable, la présence de personnel qualifié, conjuguée à des technologies spécifiques de prévention et de prédiction des défauts, s'avère indispensable. Dans un environnement de marché dynamique et hautement concurrentiel, un dirigeant d'entreprise ne peut s'abstenir d'investir dans les technologies émergentes, sous peine de compromettre sa compétitivité. [22]

4.2.2 Importance du contrôle de la qualité en soudage

Plusieurs facteurs peuvent motiver la réalisation d'une inspection de soudures, parmi lesquels on distingue principalement :

La conformité réglementaire : De nombreux secteurs industriels sont soumis à des normes de qualité rigoureuses. L'inspection de soudures par un spécialiste en contrôle qualité assure l'adhérence de ces assemblages aux prescriptions normatives établies par les autorités compétentes. L'inspecteur en soudage est également en mesure de valider la conformité des procédés de soudage mis en œuvre (tels que le soudage à l'arc, plasma, laser, etc.) avec les exigences de ces mêmes instances.

La garantie de fiabilité : Des soudures présentant des défauts d'exécution ou ayant subi une dégradation peuvent induire des ruptures prématurées des équipements. Une inspection méthodique et régulière permet l'identification de ces anomalies avant qu'elles n'engendrent des dysfonctionnements significatifs, contribuant ainsi à prévenir des interruptions de production.

La prévention des risques : La présence de discontinuités dans les soudures de structures ou d'équipements industriels est susceptible de compromettre leur intégrité structurelle et leur stabilité, engendrant par conséquent des dangers pour le personnel évoluant à proximité de ces installations. [23]

4.3 Techniques de Contrôle Avant Soudage

Durant la phase de préparation au soudage, une analyse exhaustive de tous les composants du processus est effectuée, visant à identifier les points critiques potentiels au niveau de la conception, de la spécification des modes opératoires, de la documentation, des compétences du personnel, des caractéristiques des matériaux et de l'état des équipements. [21]

4.4 Techniques de Contrôle Pendant le Soudage

Durant l'opération de soudage, il est impératif de porter une attention particulière aux paramètres opératoires, à la maîtrise thermique, au décrassage des passes de soudure, ainsi qu'aux inspections visuelles exhaustives visant à identifier toute discontinuité superficielle. [21]

4.5 Techniques de Contrôle Après Soudage

Postérieurement à l'exécution de l'assemblage soudé, une évaluation de l'intégrité doit être réalisée par le biais d'investigations (essais destructifs et essais non destructifs) : [21]

4.5.1 Contrôle Non Destructif (CND)

Le Contrôle Non Destructif représente un ensemble de techniques d'évaluation des produits visant à identifier, localiser spatialement, quantifier dimensionnellement et caractériser la nature de discontinuités potentielles au sein de leur architecture.

À cette fin, il est fait usage de transducteurs dont l'opération repose sur des fondements physiques, incluant notamment l'électromagnétisme, les émissions radiatives et corpusculaires, la propagation d'ondes, et le champ électrique. [24]

Différents types du Contrôles Non Destructifs :

La section suivante vise à présenter une vue d'ensemble des différentes méthodes de (CND), en mettant l'accent sur celles qui sont prédominantes dans le secteur industriel, notamment :

- L'examen visuel
- Le ressuage
- La magnétoscopie
- La radiographie
- L'ultrason
- La thermographie

Principes fondamentaux du CND :

L'objet d'analyse est défini par un ensemble de variables que l'on cherche à déterminer afin d'établir un diagnostic d'intégrité structurelle. La mise en œuvre d'un système de CND approprié génère un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres d'intérêt. Une phase d'inversion, dont la complexité peut varier, est fréquemment indispensable pour extraire les caractéristiques initiales de la pièce examinée. [24]

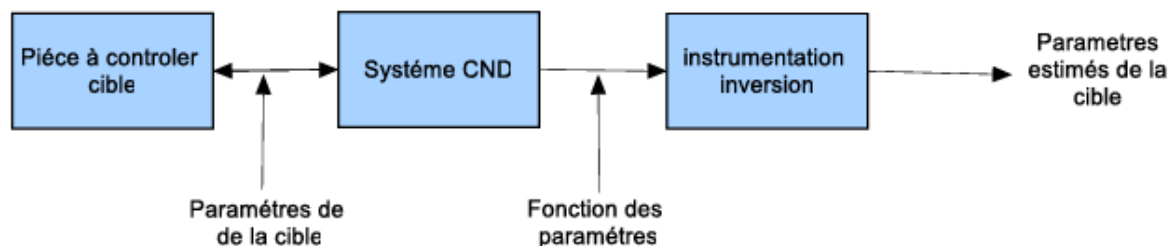


Figure IV.1 Synoptiques schématise l'analyse par CND [24]

- **Examen visuel**

Le contrôle visuel non destructif est une technique d'évaluation de l'intégrité d'un matériau ou d'un objet par l'acquisition de données visuelles, sans en altérer la structure. C'est la méthode la plus élémentaire pour inspecter un élément sans le modifier.

Méthodes d'exécution des tests visuels

L'inspection visuelle peut être effectuée directement par des opérateurs qualifiés, qui examinent le matériau ou l'actif à l'œil nu. En environnement intérieur, des sources lumineuses telles que des lampes de poche sont employées pour optimiser la perception des détails. Alternativement, ces inspections peuvent être réalisées à l'aide d'outils d'inspection visuelle à distance, tels que des caméras spécialisées. Le déploiement de ces caméras peut s'opérer via des systèmes robotisés, des drones, ou une simple suspension par câble. [17]

- **Ressuage**

Le contrôle non destructif par ressuage, également appelé contrôle par ressuage liquide, est une méthode qui emploie un liquide pour identifier les défauts d'un matériau. Il s'agit de détecter les discontinuités de surface du matériau en observant les ruptures dans la couche de liquide appliquée.

Comment réaliser un test de ressuage ?

Pour effectuer un test de ressuage, les inspecteurs procèdent comme suit :

1. **Application du pénétrant** : Le matériau à inspecter est d'abord recouvert d'une solution appelée pénétrant, laquelle contient un colorant, soit visible, soit fluorescent.
2. **Élimination de l'excès de pénétrant** : L'excès de pénétrant est ensuite retiré de la surface du matériau. Le pénétrant reste uniquement dans les défauts de surface.
3. **Application du révélateur** : Un révélateur est appliqué sur la surface. Son rôle est d'extraire le pénétrant des défauts.
4. **Observation des indications** :
 - Si un colorant fluorescent a été utilisé, les imperfections deviennent visibles sous une lumière ultraviolette.
 - Si un colorant visible a été employé, les défauts apparaissent grâce au contraste de couleur entre le pénétrant et le révélateur. [17]

- **Magnétiques**

Le contrôle non destructif par particules magnétiques consiste à identifier les défauts d'un matériau en étudiant les altérations du flux du champ magnétique interne.

Réaliser une inspection par particules magnétiques

Pour effectuer une inspection par particules magnétiques, les inspecteurs commencent par créer un champ magnétique dans un matériau très sensible à la magnétisation.

Une fois le champ magnétique induit, des particules de fer sont appliquées sur la surface du matériau. Cela permet de visualiser les perturbations du flux du champ magnétique, qui se manifestent sous forme d'indicateurs visuels signalant l'emplacement des imperfections dans le matériau. [17]

- **Radiographie**

Le contrôle non destructif (CND) par radiographie est une méthode qui consiste à exposer des matériaux à des rayons gamma ou rayons X afin de déceler d'éventuels défauts.

Réalisation des tests CND par radiographie

La radiographie implique la projection de rayonnements (émis par un isotope radioactif ou un générateur de rayons X) à travers le matériau à inspecter. Ces rayonnements sont ensuite capturés par un film ou un autre type de détecteur. Les données recueillies par le détecteur génèrent une ombrogramme, qui permet de visualiser les caractéristiques internes du matériau.

Le CND par radiographie est capable de mettre en évidence des particularités, telles que des variations de densité, qui ne seraient pas apparentes à l'œil nu. [17]

- **Thermographie**

La thermographie, en tant que méthode de quantification thermique à distance, scrute la surface d'un objet via l'analyse de son émission infrarouge. L'existence d'anomalies structurales au sein de cet objet induit des variations dans sa distribution thermique superficielle, lesquelles rendent possible l'identification de ces anomalies.

Principe de la thermographie:

La thermographie est basée sur le principe schématisé sur la **Figure IV.2**:

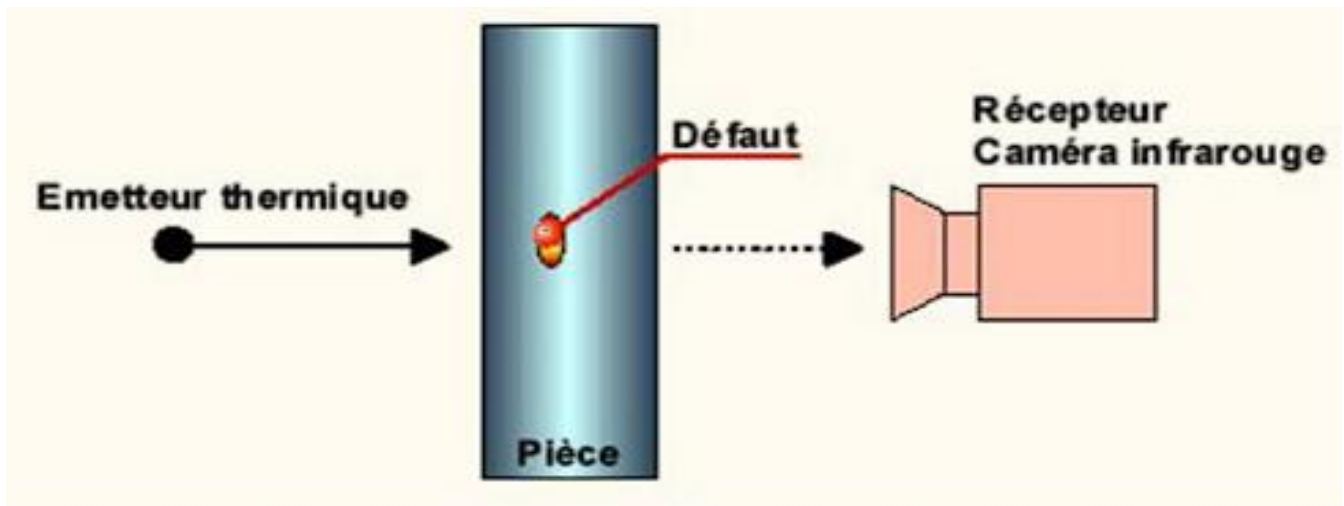


Figure IV.2 Principe de la thermographie. [24]

En contrôle non destructif (CND), l'hétérogénéité de la propagation ou de la diffusion d'une impulsion thermique, consécutive aux discontinuités structurales de l'éprouvette analysée, constitue le principe de la méthode. L'efficacité de cette dernière dépend significativement du mode de transfert du flux thermique vers la pièce.

L'amplitude de la perturbation de la propagation thermique est tributaire de :

1. La composition et les propriétés intrinsèques de l'objet testé.
2. Les caractéristiques dimensionnelles, la nature physique et la localisation spatiale du défaut.

L'évaluation est conduite en régime transitoire, étant donné qu'à l'état d'équilibre thermique, les variations de rayonnement induites par la présence de défauts potentiels deviennent fréquemment indétectables.

Le chauffage uniforme de composants de grandes dimensions peut s'avérer complexe. Dans de telles situations, une source d'apport thermique localisé est employée, dont le mouvement est asservi à celui du système de détection.

4.5.2 Contrôle Destructif (CD)

Les évaluations primaires comprennent les tests de texture, les analyses mécaniques, les études de corrosion, les paramètres opératoires, ainsi que l'inspection de la qualité des assemblages soudés. Cette vérification est effectuée soit sur l'ensemble des soudures, soit de manière ciblée dans les zones les plus susceptibles de présenter des défauts. Alternativement, lorsque cela est réalisable, des essais peuvent être menés sur des éprouvettes intégrées à l'extrémité du joint, simulant une partie constitutive de l'assemblage global. [25]

- **Essais de texture**

Ces essais d'atelier rudimentaires ont pour but de confirmer la compacité et la bonne pénétration d'une soudure. La méthode consiste à fracturer l'éprouvette au niveau de la soudure afin d'examiner les défauts visibles sur la section de rupture.

Essais mécaniques :

Visent à évaluer la robustesse et les propriétés mécaniques des assemblages, tout en s'assurant que les techniques de soudage employées ne compromettent pas la solidité générale de la structure. Ces évaluations mécaniques comprennent divers essais tels que la traction, la dureté Vickers, le pliage et la résilience. Il est fréquent que ces analyses soient approfondies par des examens macrographiques, qui permettent de détecter des défauts comme les fissures ou le manque de pénétration, ou par des examens micrographiques, qui analysent la structure de la zone de fusion et de la zone affectée thermiquement.

Principe de l'essai mécanique :

Les essais mécaniques constituent des investigations expérimentales visant à définir les relations constitutives des matériaux (mécanique des milieux continus). Ces relations établissent un lien entre les contraintes (pression = force/surface) et les déformations (allongement unitaire adimensionnel). Il est crucial de distinguer une déformation d'un déplacement ou d'une dilatation.

Néanmoins, la déformation d'un composant est tributaire de sa configuration géométrique et du mode d'application des forces externes. Par conséquent, une standardisation des essais s'avère nécessaire.

- **Essais de traction**

Une épreuve de traction implique l'application d'une force graduelle et ascendante sur une éprouvette de forme cylindrique ou prismatique jusqu'à sa fracture. Cette procédure expérimentale est effectuée à l'aide d'un équipement spécifique qui enregistre la force appliquée et l'allongement résultant. L'essai a pour but la détermination des caractéristiques mécaniques d'un matériau ductile. La norme de référence pour cette procédure est la NF EN 10002-1 d'Octobre 1990.

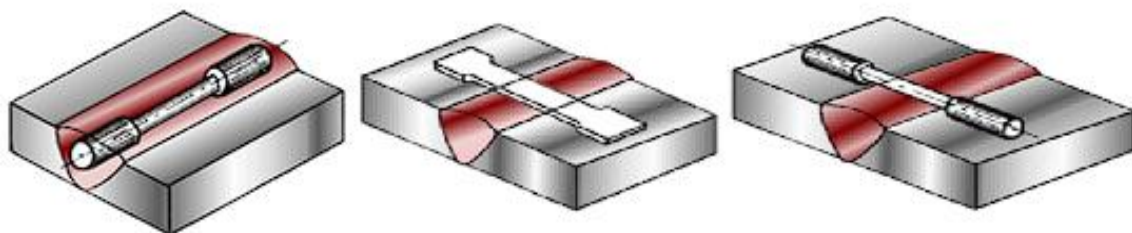


Figure IV.3 Différents types d'éprouvettes de traction [25]

La zone élastique est illustrée par le segment OB. Dans cette région, l'échantillon subit une déformation sous l'effet de la force appliquée, et il retrouve approximativement sa dimension initiale une fois la force retirée. La zone plastique est indiquée par le segment BC, où les déformations subies par l'échantillon sont permanentes et ne peuvent être annulées. La phase de striction est visualisée par la courbe allant de la force maximale (F_m) jusqu'au point D. La rupture de l'échantillon est finalement marquée par le point D.

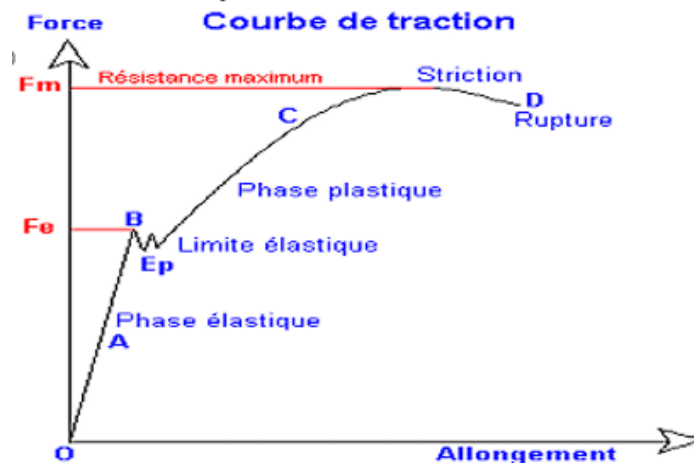


Figure IV.4 Courbe de traction [25]

• Essais de résilience

L'évaluation de la résistance aux chocs d'un matériau s'effectue via l'essai de flexion par choc, également désigné comme essai de résilience ou de rupture fragile. Cette méthode détermine l'énergie requise pour fracturer une éprouvette prismatique de section carrée (1 cm^2), préalablement entaillée en son centre et supportée par deux points d'appui, au moyen d'une masse pendulaire. L'expérimentation est menée sur un équipement spécifique, un mouton pendule rotatif, qui quantifie l'énergie absorbée lors de la rupture. Cet essai permet de caractériser la sensibilité d'un matériau à la rupture sous sollicitation dynamique. Les normes de référence pour cet essai sont la NF EN 10045-1 d'Octobre 1990 et la NF EN 875 de Novembre 1995.

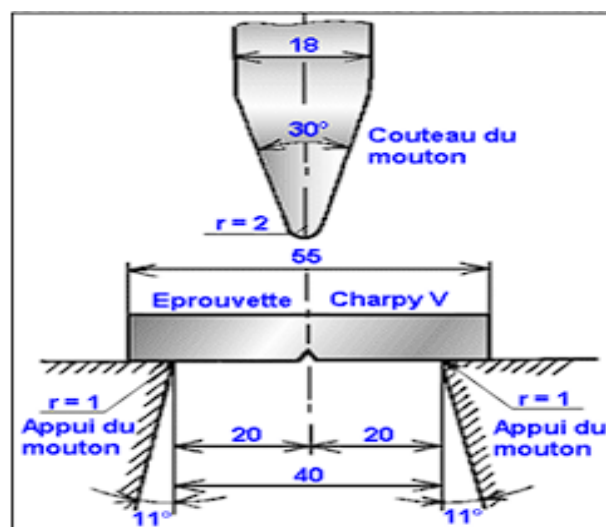


Figure IV.5 Essai de résilience [25]

- **Températures d'essais des résiliences :**

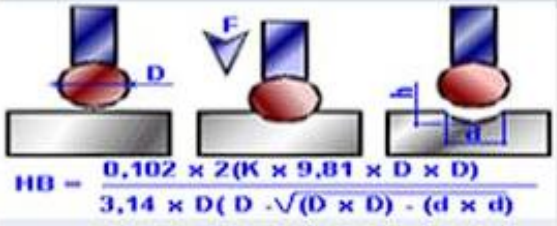
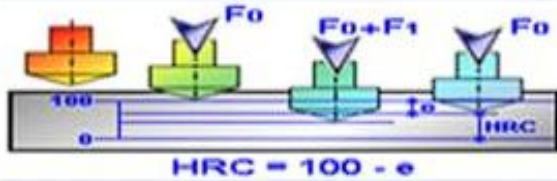
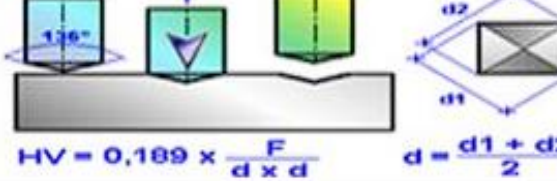
Les essais de résilience sont principalement effectués à température ambiante et à des températures cryogéniques, allant de -20°C à -196°C. Pour atteindre ces basses températures, on utilise divers fluides réfrigérants : l'alcool permet de refroidir les échantillons jusqu'à -80°C, le fréon jusqu'à -155°C, et l'azote liquide couvre la plage de -155°C à -196°C. Il est à noter que plus la température d'essai diminue, plus la microstructure de l'éprouvette évolue vers un comportement fragile au détriment de sa ductilité.

- **Essais de dureté**

La méthode d'essai implique l'application d'un pénétrateur sur l'échantillon à évaluer, sous une force d'appui F spécifiée. La détermination de la dureté s'effectue en fonction des dimensions de l'indentation résultante du pénétrateur sur la surface du matériau analysé. L'étendue de cette indentation est inversement proportionnelle à la dureté du matériau. Les essais de dureté permettent de quantifier la résistance d'un matériau à la pénétration.

- Les différents types d'essais de dureté :

- **Tableau IV.1** Types d'essais de dureté [25]

Différents types d'essais de dureté	
Type d'essai	Observation
 $HB = \frac{0,102 \times 2(K \times 9,81 \times D \times D)}{3,14 \times D(D - \sqrt{D \times D - (d \times d)})}$	Essai Brinell – HB Le pénétrateur est une bille en acier trempé ou carbure de tungstène de $\varnothing D$ sous une charge F en newtons maintenue 5 seconde . on mesure le (D) de l'empreinte (d doit être compris entre 0.2 à 0.5 . D) . $K= 30$ pour les aciers
 $HRC = 100 - e$	Essai Rockwell C –HRC Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° d'angle et de charge égale à 1373 N. on mesure l'accroissement (e) en profondeur ou enfoncement rémanent .
 $HRB = 100 - e$	Essai Rockwell B-HRB Le pénétrateur est une bille en acier trempé de 1.6 mm de diamètre et de charge égale à 883N. on mesure l'accroissement e en profondeur ou enfoncement rémanent
 $HV = 0,189 \times \frac{F}{d \times d}$ $d = \frac{d1 + d2}{2}$	Essai Vickers – HV Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F . on mesure les diagonales (d) de l'empreinte .

- **Essais de pliage**

L'expérimentation implique la déformation plastique d'une pièce test via un dispositif de cintrage comprenant un poinçon et deux rouleaux.

On identifie différentes configurations:

- Le pliage transversal (poinçon parallèle à la soudure)
- Le pliage longitudinal (poinçon perpendiculaire à la soudure),
- Le pliage envers (poinçon à l'endroit de la soudure),
- Le pliage endroit (poinçon à l'envers de la soudure). La mise en œuvre du pliage est donnée par les normes NF A 89-203 et NF A 89-204.

L'intensité de l'essai est déterminée par les dimensions relatives du poinçon et de l'épaisseur de l'éprouvette, ainsi que par la distance séparant les rouleaux. Un critère d'assemblage réussi est l'obtention d'un angle de pliage de 180°. Une fracture prématurée peut survenir en présence d'irrégularités (porosités, inclusions, etc.) ou si le métal d'apport présente une fragilité.

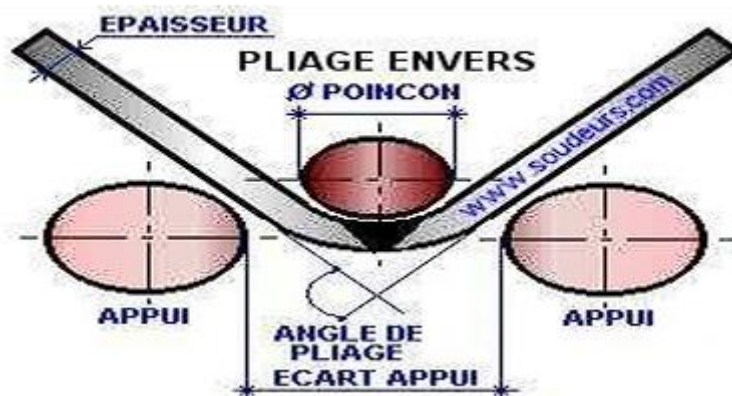


Figure IV.6 Essai de pliage [25]

- **Autres essais**

Diverses évaluations peuvent être mises en œuvre en fonction de l'usage prévu pour l'assemblage soudé et du procédé de soudage employé. À titre d'exemple, on peut citer :

- Des essais de mécanique de la rupture
- Des essais de résistance à la fatigue.
- Des essais de débouffonnage pour l'évaluation du soudage par points.
- Des essais de torsion pour caractériser les soudures par points.
- Un examen macrographique. [25]

4.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en lumière la diversité et la criticité des techniques de contrôle qualité appliquées aux assemblages soudés. De l'inspection visuelle, première ligne de défense contre les défauts apparents, aux méthodes d'essais non destructifs sophistiquées telles que la radiographie, l'ultrason et la magnétoscopie, il apparaît clairement que l'assurance qualité est un processus multidimensionnel et indispensable. Ces techniques, chacune avec ses spécificités, ses avantages et ses limites, concourent à garantir l'intégrité, la fiabilité et la durabilité des structures soudées, éléments fondamentaux pour la sécurité et la performance dans de nombreux secteurs industriels.

La sélection judicieuse de ces méthodes de contrôle, en fonction du type d'assemblage, des exigences normatives et des conditions d'exploitation, représente un enjeu majeur. Une application rigoureuse et une interprétation experte des résultats sont essentielles pour détecter précocement les anomalies et prévenir les défaillances potentielles. En définitive, la maîtrise des techniques de contrôle qualité des assemblages soudés constitue un pilier central de l'ingénierie des matériaux et de la fabrication, contribuant significativement à l'avancement technologique et à la sécurité des ouvrages.

Chapitre V : Etude expérimentale

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions le transfert de chaleur au sein d'une plaque métallique soudée, à travers une analyse thermique par caméra infrarouge. Cette étude permet de visualiser la propagation de la chaleur pendant le soudage, d'estimer la taille de la zone affectée thermiquement (ZAT), et d'identifier les gradients thermiques générés.

En complément, deux essais ont été réalisés :

- Un essai de dureté, afin d'évaluer les changements mécaniques induits par le cycle thermique du soudage, notamment les variations de dureté dans le métal de base, la ZAT et le cordon,
- Et un essai de micrographie, visant à observer les éventuelles modifications de structure dans les différentes zones métallurgiques de la tôle soudée.

Ces trois approches croisées permettent une meilleure compréhension de l'effet du soudage sur le matériau, tant du point de vue thermique, mécanique que microstructural.

5.2 Expérience

5.2.1 Matériaux Utilisé

On a choisi L'acier doux S235. C'est un acier non allié de construction largement utilisé dans le domaine de la mécano-soudure, des structures métalliques, des charpentes, et de la chaudronnerie. Il est particulièrement adapté pour les applications où la résistance moyenne, la bonne soudabilité et le coût réduit sont recherchés.

- **Raisons du choix**
 - Bonne aptitude au soudage, sans préchauffage obligatoire
 - Bonne disponibilité commerciale et prix économique
 - Facilité d'usinage et de formage à froid
 - Propriétés mécaniques suffisantes pour des structures non soumises à des charges extrêmes
 - Utilisation fréquente dans la fabrication de composants comme les supports, structures, mâts, etc.

- **Propriétés mécaniques (valeurs moyennes)**

Tableau V.1 Propriétés mécaniques

Propriété	Valeur typique
Limite d'élasticité Re	235 MPa (d'où le nom S235)
Résistance à la traction Rm	360 – 510 MPa
Allongement à la rupture A (%)	≥ 20 %
Densité	$\sim 7.85 \text{ g/cm}^3$
Module d'élasticité (E)	$\approx 210 \text{ GPa}$
Conductivité thermique	$\approx 54 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Capacité thermique spécifique	$\approx 440 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

- **Caractéristiques chimiques typiques (% en masse)**

Tableau V.2 Caractéristiques chimiques

Element	C (max)%	Mn (max)%	Si (max)%	P (max)%	S (max)%
S235	0.17	1.40	0.50	0.035	0.035

- **Soudabilité**

L'acier S235 possède une très bonne soudabilité, car sa teneur en carbone est faible ($< 0,22$ %). Il peut être soudé sans traitement thermique préalable, sauf en cas d'épaisseurs importantes ou de conditions spécifiques.

- Adapté à tous les procédés courants : MIG/MAG, TIG, électrode enrobée, SAW
- Faible risque de fissuration à froid
- Aucune nécessité de préchauffage pour les épaisseurs $\leq 25 \text{ mm}$

- **Diagramme fer-carbone**

Définition

Le diagramme fer-carbone représente les différentes phases et transformations des alliages fer-carbone en fonction de la température et de la teneur en carbone. Il couvre généralement une plage de 0 à 6,67 % de carbone en masse, correspondant à la cémentite (Fe_3C). Ce diagramme est fondamental pour comprendre les comportements thermiques et structuraux des aciers (jusqu'à $\sim 2,1$ % de C) et des fontes (au-delà).

Importance du diagramme fer-carbone

Ce diagramme est crucial pour :

- Identifier les phases présentes : ferrite (α), austénite (γ), cémentite (Fe_3C), perlite, lédéburite, etc.
- Comprendre les transformations de phase lors des traitements thermiques tels que le recuit, la trempe ou le revenu.

- Déterminer les températures critiques (Ac_1 , Ac_3) essentielles pour les procédés de soudage et de traitement thermique.
- Optimiser les propriétés mécaniques des aciers en contrôlant leur microstructure.

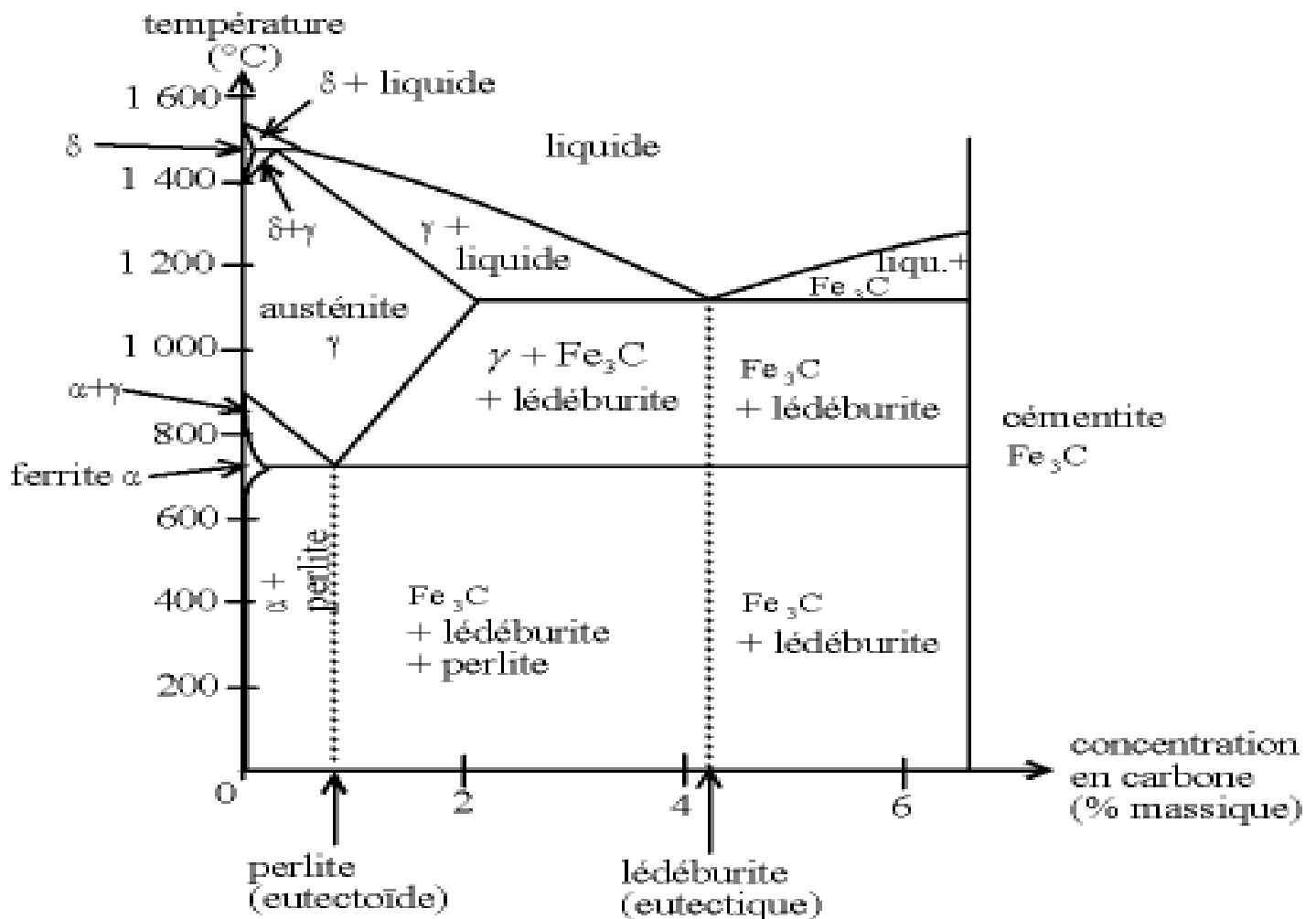


Figure V.1 Diagramme FER-CARBONE [25]

Dans le cadre de notre étude, le diagramme de phase fer-carbone a été utilisé pour déterminer les températures critiques liées à l'acier S235.

Grâce à ce diagramme, nous avons retenu les valeurs suivantes :

- $Ac_1 = 723\text{ °C}$ (début de transformation austénitique),
- $Ac_3 = 880\text{ °C}$ (fin de transformation),
- Et une température de fusion d'environ 1530 °C .

Ces températures sont essentielles pour :

- Le calcul de la longueur de la ZAT,
- L'analyse thermique du soudage,
- Et l'interprétation des essais expérimentaux (thermographie, micrographie, dureté). [25]

5.2.2 Equipement

- **Poste de soudure utilisé**

Pour notre expérience, nous avons eu recours à un poste de soudage MIG comprenant un dévidoir de fil et une source de courant MAXI, chacun possédant ses propres caractéristiques

CARACTÉRISTIQUES WF 5

- Rouleaux doubles permettant d'utiliser deux types de fils différents sur un même mécanisme d'entraînement, remplaçables sans outil
- Bouton gradué pour régler précisément la pression du fil, qui reste constante même après ouverture/fermeture du bras
- Réglage électronique de la vitesse d'avance du fil
- Réglages externes du Burn-Back et de la rampe moteur pour un amorçage d'arc précis
- Sélecteur 2/4 temps
- Fonction purge gaz et avancement du fil sans arc
- Excellente stabilité en fonctionnement
- Logement incliné pour les bobines de fil (jusqu'à Ø 300 mm / 20 kg)
- Poignée robuste et anneau de levage intégré

Données techniques – WF 5

Tableau V.3 Données techniques de WF5 [26]

Données techniques	WF 5
Alimentation monophasée 50/60 Hz	48 V
Puissance moteur	100 W
Nombre de galets	4
Vitesse d'alimentation du fil	0,5 à 20 m/min
Fil plein (acier) – diameter	0,6 à 2,4 mm
Bobine – diameter	300 mm
Bobine – poids maximum	20 kg
Dimensions (L x l x H)	570 x 275 x 400 mm
Poids	17 kg

Caractéristiques MAXI 405

- Excellentes performances de soudage sur tout type de matériau et avec n'importe quel gaz
- Idéal pour le soudage de tous les métaux dans toutes les applications industrielles
- Grande poignée ergonomique pour une manipulation facile
- Double connexion d'inductance permettant un meilleur contrôle du bain de fusion, quelle que soit la position de soudage

Données techniques – MAXI 405**Tableau V.4** Données techniques de MAXI405

Paramètre	Valeur
Alimentation triphasée 50/60 Hz	230 / 400 V
Puissance absorbée (I_2 max)	19 kVA
Fusible temporisé (I_2 @ 60 %)	35 / 20 A
Facteur de puissance ($\cos \varphi$)	0,96
Rendement	0,77
Tension à vide	20 – 44 V
Nombre de positions de réglage	20
Plage de courant	60 – 400 A
Facteur de marche à 100 %	230 A
Facteur de marche à 60 %	300 A
Facteur de marche à 35 %	400 A
Diamètre du fil utilisable	0,6 – 1,6 mm
Normes	EN 60974-1 – EN 59019
Classe de protection	IP 23 S
Dimensions (L x l x H)	1060 x 600 x 780 mm
Poids	99 kg

**Figure V.2** Poste de soudure utiliser

5.2.3 Préparation de la tôle

Le matériau utilisé pour les essais de soudage est une tôle en acier doux, de forme rectangulaire, avec les dimensions suivantes :

- Épaisseur : 4,8 mm
- Longueur : 250 mm (25 cm)
- Largeur : 120 mm (12 cm)

Nous avons appliqué une peinture noire de type thermo-Paint sur les tôles afin de réduire l'émissivité de surface. Cette opération permet à la caméra thermique de capter le rayonnement infrarouge de manière plus précise et ainsi d'améliorer la fiabilité des mesures de température pendant le soudage.

Après l'application de la peinture, les tôles ont été laissées à sécher au soleil pendant environ 30 minutes, afin d'assurer une bonne fixation de la couche de peinture.

Une fois le séchage terminé, nous avons procédé à l'usinage des chanfreins sur les bords des tôles, en préparation pour l'opération de soudage.



Figure V.3 Tôles avant et après peinture



Figure V.4 Meuleuse pour le chanfreinage et les tôles après traitement de chanfrein.

5.2.4 Procéder au lancement du soudage

- **Soudage MIG avec fil fourré**

Pour la réalisation des soudures, nous avons utilisé le procédé MIG (Metal Inert Gas) dans sa version simplifiée sans gaz de protection externe, grâce à l'utilisation d'un fil fourré auto-protégé (self-shielded flux-cored wire).

Paramètres de soudage utilisés :

- Tension (U) : 20 V
- Intensité (I) : 100 A
- Fil utilisé : Fil fourré TOPARC Ø 1,2 mm
- Épaisseur de la tôle : 4,8 mm

- **Fil utilisé**

Le fil est un fil fourré sans gaz (type E71T-GS), conforme aux normes EN ISO 17632-A et AWS A5.20. Il contient en son cœur un flux qui produit les gaz de protection nécessaires à la fusion, ce qui permet de souder sans apport externe de gaz inerte (argon ou CO₂).

Caractéristiques du fil utilisé :

- Ø 1,2 mm : adapté aux épaisseurs entre 3 et 6 mm
- Auto-protégé : pas besoin de bouteille de gaz
- Bonne pénétration et stabilité d'arc
- Réduction du matériel auxiliaire = gain en simplicité et mobilité

- **Pourquoi ces paramètres ont été choisis ?**

Tableau V.5 Paramètres de soudage

Paramètre	Choix
Tension: 20 V	Moyenne
Intensité: 100 A	Adaptée au fil Ø1,2 mm
Procédé MIG sans gaz	Pratique et économique
Fil E71T-GS	Auto-protégé, 1,2 mm

L'utilisation du soudage MIG avec fil fourré auto-protégé, combinée à des réglages de 20 V et 100 A, permet une exécution simple, économique et efficace des soudures sur des tôles d'acier doux de 4,8 mm d'épaisseur.

Ces réglages assurent un bon compromis entre qualité de soudure, pénétration, et facilité d'utilisation, notamment en contexte de formation ou de fabrication standard.



Figure V.5 Fil employé pour le soudage, les tôles après soudage

5.2.5 Conséquences attendues sur les essais expérimentaux

Essai de dureté :

- La présence de défauts (porosités, cratères, manque de fusion) conduit à des valeurs de dureté non homogènes.
- Certaines zones montreront une dureté excessive (zone surchauffée/refroidie brutalement) ou au contraire très faible (zone mal soudée ou soufflée).

Mesure thermographie :

- Le fil fourré sans gaz produit un cordon à émissivité irrégulière, ce qui fausse la lecture des températures sur la surface.
- Les défauts de surface (creux, bosses, scories résiduelles) altèrent la précision des relevés thermographiques.
- La ZAT ne peut pas être identifiée clairement si la surface réfléchit mal ou si la répartition de la chaleur est perturbée.

5.2.6 Défauts constatés visuellement

Étant donné qu'il s'agissait de notre première expérience pratique de soudage, plusieurs défauts ont été observés à l'œil nu sur le cordon réalisé. Ces imperfections reflètent un manque d'expérience, mais elles nous ont permis de mieux comprendre les exigences du procédé. Les défauts relevés sont les suivants :

1. Cordons irréguliers : le cordon est non uniforme en largeur et en hauteur, ce qui révèle un mauvais contrôle de la vitesse d'avance et de la stabilité du geste.
2. Présence importante de porosités et cratères : typique d'un fil fourré sans gaz mal stabilisé, avec :
 - Vitesse de soudage mal adaptée.
 - Mauvais angle de torche ou distance irrégulière.
 - Pénétration insuffisante ou excessive par endroits.
3. Aspect rugueux du cordon : signe de mauvais réglages énergétiques (soit trop faible, soit trop élevé), combiné à une mauvaise maîtrise de la fusion.

5.2.7 Thermographie

- **Caméra**

Pour mesurer la température pendant l'usinage, on utilise une caméra infrarouge FLIR de type A305sc présentant une gamme spectrale de 7,5 à 13,0 μm , avec une plage de température de 0 à +350°C et une précision $\pm 2\%$ ou 2°C. Elle utilise un système d'analyse micro bolomètre non refroidi et sans entretien. Le tableau IV.5 montre ses spécifications.

Le logiciel de la caméra infrarouge est FLIR Quick Plot (Version 1.2.10173.1002). Il offre la possibilité de transfert et de gestion des fichiers en tout confort à partir de la caméra infrarouge ainsi que la possibilité d'analyse ultérieure offerte par les données radiométriques disponibles dans les images infrarouges. Les informations relatives à la température peuvent être affichées dans chaque point d'image individuel. L'affectation ultérieure d'autres palettes de couleurs ainsi que le réglage de l'échelle de couleurs permettent d'adapter les données aux exigences respectives de l'analyse.

Détecteur

Tableau V.6 Caractéristique de détecteur de camera

Caractéristique	Valeur
Type de détecteur	Microbolomètre non refroidi
Gamme spectrale	7,5 à 13,0 μm
Résolution	320 x 240
Pas du détecteur	25 μm
Sensibilité thermique (NETD)	< 50 mK

Électronique / Imagerie

Tableau V.7 Electronique et imagerie

Caractéristique	Valeur
Fréquence d'images	60 Hz
Plage dynamique	> 14 bits
Flux de données numériques	Gigabit Ethernet (60 Hz)
Commande et contrôle	Gigabit Ethernet

Mesures

Tableau V.8 Mesures de camera

Caractéristique	Valeur
Plage de température standard	-20 °C à 120 °C (-4 °F à 248 °F) 0 °C à 350 °C (32 °F à 662 °F)
Plage de températures optionnelle	Jusqu'à 2 000 °C (3 632 °F)
Précision	± 2 °C ou ± 2 % de la valeur affichée



Figure V.6 Caméra infrarouge FLIR A305sc.

- **Nature du contrôle : Contrôle Non Destructif (CND)**

L'essai réalisé à l'aide de la caméra thermique pendant le soudage est classé comme un Contrôle Non Destructif (CND). En effet, ce type de contrôle permet d'évaluer l'état d'un matériau ou d'un assemblage sans l'endommager ni altérer ses propriétés mécaniques ou géométriques.

Le principal avantage du CND est qu'il permet de détecter des défauts internes ou superficiels, de surveiller un procédé en temps réel, ou de vérifier la conformité d'un assemblage, tout en conservant l'intégrité de la pièce contrôlée

Dans notre cas, le contrôle non destructif utilisé est la thermographie infrarouge, qui consiste à enregistrer et analyser la distribution de température à la surface d'un matériau.

Ce contrôle permet de :

- Suivre en temps réel l'évolution thermique pendant le soudage.
- Détecter d'éventuelles anomalies (zones froides, manque de fusion, déséquilibres thermiques).
- Contrôler la qualité du cordon sans contact avec la pièce.
- Observer la zone affectée thermiquement (ZAT) et les variations de température sur toute la tôle.

- **Utilisation du logiciel de la caméra infrarouge**

Une unité de traitement des données est branchée à la caméra par un câble internet haut débit. Le logiciel est utilisé en deux étapes :

- La première étape est l'enregistrement des séquences de tournage longitudinal.
- La deuxième étape est dédiée à l'exploitation des scènes enregistrées.

Présentation de l'interface du logiciel

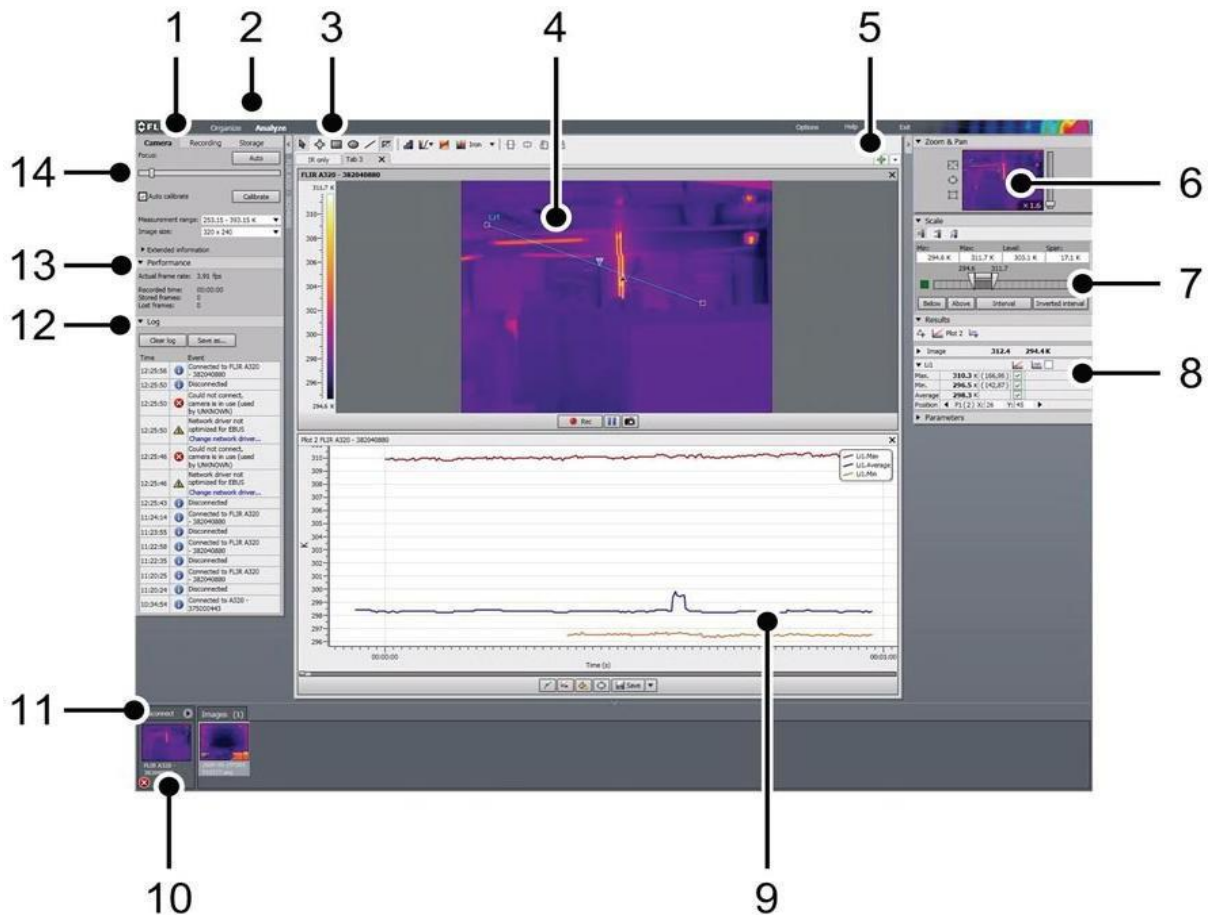


Figure V.7 Interface du logiciel de la caméra FLIR 305 sc

Nous présentons sommairement les différents points :

1. **Sous-onglets** : appareil photo, enregistrement, espace de rangement.
2. **Barre d'onglets principale** : organiser, analyser.
3. **Barre d'outils** : on utilise cette barre pour ajouter des outils de mesure à l'image, tels que des points, des zones, des isothermes, etc.
4. **Fenêtre image** : cette fenêtre est l'endroit où l'image de la caméra est connectée, un fichier image sur l'ordinateur ou réseau, est affiché.
5. **Fenêtre ajout** : boutons pour ajouter d'autres onglets de fenêtre d'image et pour sélectionner les différents onglets.
6. **Volet zoom et panoramique** : on l'utilise pour modifier le facteur de zoom et pour effectuer un panoramique sur les images.
7. **Volet échelle** : elle est utilisée pour effectuer divers réglages sur l'image. On peut choisir entre plusieurs méthodes de réglage et également attribuer une couleur pour afficher les parties de l'image qui se situent au-dessus ou en dessous d'un niveau de température défini ou à l'intérieur d'un intervalle de température défini.

8. **Volet résultat** : affiche les résultats de tous les outils de mesure qui sont disposés dans l'image. Il affiche également la position de chaque outil de mesure et contrôle la manière dont on souhaite tracer les températures.
9. **Fenêtre de tracé** : affiche l'évolution de la température au fil du temps dans un fichier de séquence enregistré. Dans cette zone, on peut définir diverses options, telles que la couleur d'arrière-plan et de premier plan, etc...
10. **Contrôle de la source en direct** : (également visible dans l'onglet Organiser), le contrôle de la source en direct affiche une vignette de l'image de la caméra actuellement connectée, ainsi que le nom de la caméra.
11. **Bouton connecter/déconnecter** : (également visible sur l'onglet Analyser), on l'utilise pour connecter ou déconnecter les caméras de l'application. Pour voir toutes les caméras du réseau, on clique sur le bouton dans le coin inférieur gauche.
12. **Zone journal** : affiche tous les événements qui se produisent pendant que la caméra est connectée. On peut effacer, exporter, les données du journal sous forme de fichier HTML ou XML.
13. **Zone performance** : elle affiche les performances de la caméra connectée. Ici, on peut consulter la fréquence d'images, la durée d'enregistrement, le nombre d'images stockées et perdues, etc...
14. **Zone paramètre** : affiche les paramètres tels que la mise au point, l'étalonnage, la plage de mesure, la taille de l'image, etc...

- **Mise en place de la caméra pour mesure thermographie**

Dans le cadre de la surveillance thermique pendant le soudage, une caméra infrarouge a été utilisée pour réaliser la mesure thermographie. Afin d'optimiser la qualité des données collectées tout en assurant la sécurité du matériel, la caméra a été positionnée avec soin selon les critères suivants :

- Angle d'observation : 90° par rapport à la surface de la tôle, afin d'avoir une vue perpendiculaire garantissant une mesure homogène et précise sur l'ensemble de la zone de soudage.
- Distance de la tôle : 112 cm, ce qui permet de couvrir toute la surface de la tôle (longueur : 25 cm ; largeur : 12 cm) dans le champ de vision de la caméra, sans perte de résolution thermique.
- Positionnement sécurisé : La caméra a été placée hors du cône d'émission des étincelles produites par le soudage, dans le but d'éviter tout dommage au capteur infrarouge ou à l'objectif. Cette précaution est indispensable pour préserver l'intégrité de l'équipement, particulièrement sensible à la chaleur directe et aux projections de métal.



Figure V.8 Position de caméra infrarouge en poste de soudure

Le choix des positions de mesure de la température

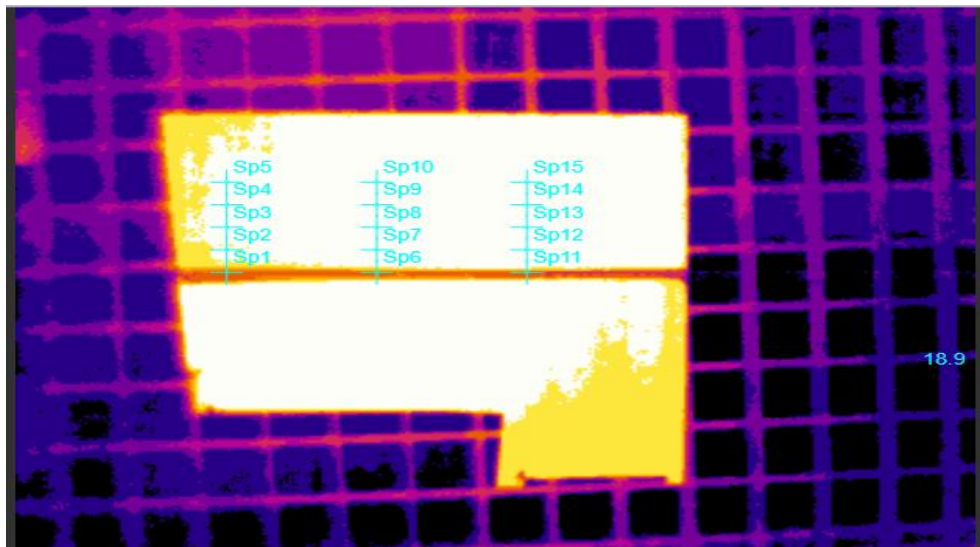


Figure V.9 Positions de mesure de la température

Dans la mesure thermographie, les points de mesure ont été disposés de façon régulière sur la surface de la tôle :

- La distance verticale entre deux points consécutifs d'une même colonne Sp1 → Sp2 est de 13 mm, permettant d'analyser le gradient thermique vertical.
- La distance horizontale entre les colonnes de points (Sp1, Sp6, Sp11) est de 62,71 mm, afin de suivre la répartition latérale de la chaleur sur la tôle.

Température ambiante

Lors de mesure thermographie, la température ambiante était de 25 °C.

Cette valeur a été prise en compte comme référence de base pour évaluer les écarts de température sur la tôle soudée. Elle permet de calibrer les mesures infrarouges et de distinguer clairement les zones chauffées par le soudage de la température du métal au repos.

RESULTATS OBTNUE :

Les photos de thermographie dans

Dans le temps de T=9s

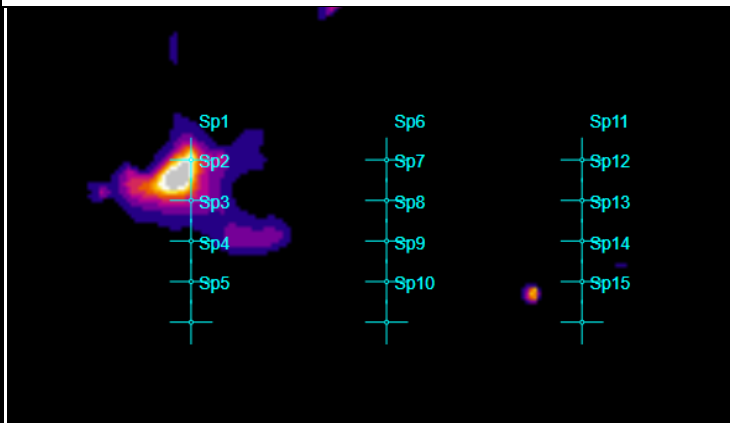


Figure V.10 Photo thermographie T=9s

Dans le temps de T= 33s

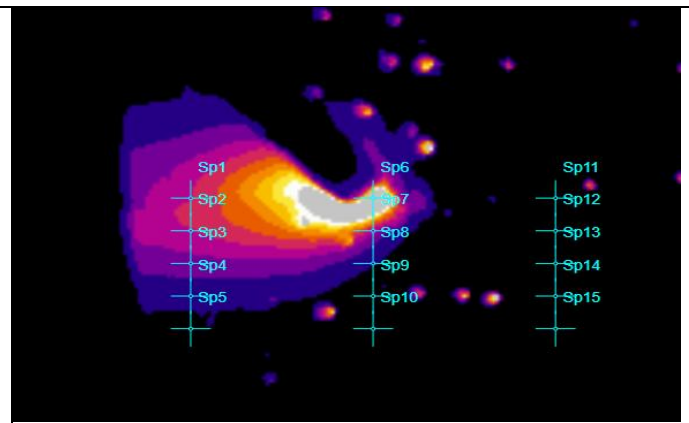


Figure V.11 Photo thermographie T=33s

Dans le temps de T=47s

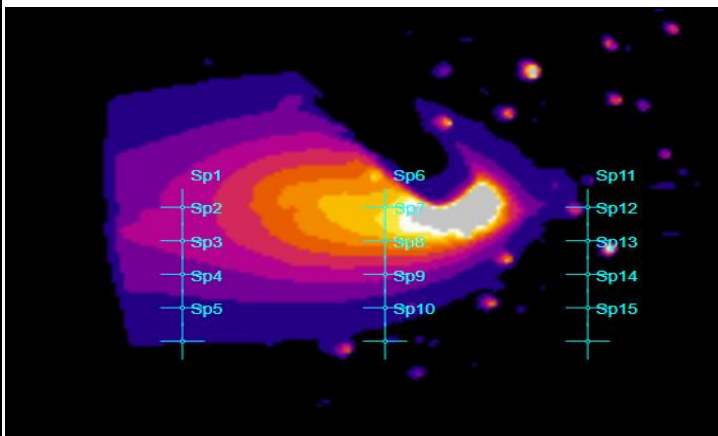


Figure V.12 Photo thermographie T=47s

Dans le temps de T=1min 6s

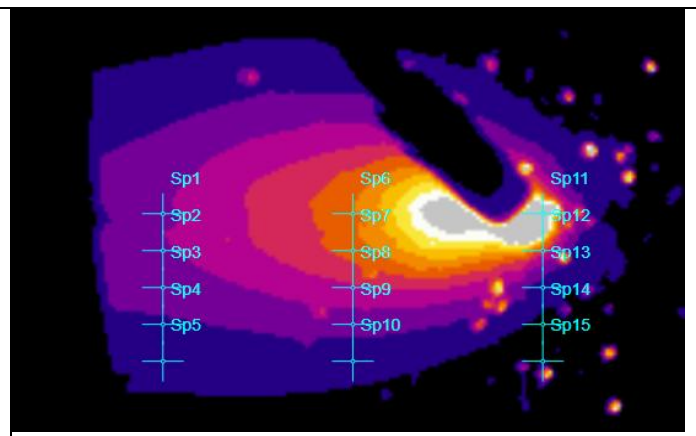


Figure V.13 Photo thermographie T=66s

Dans le temps de T=1min 20S

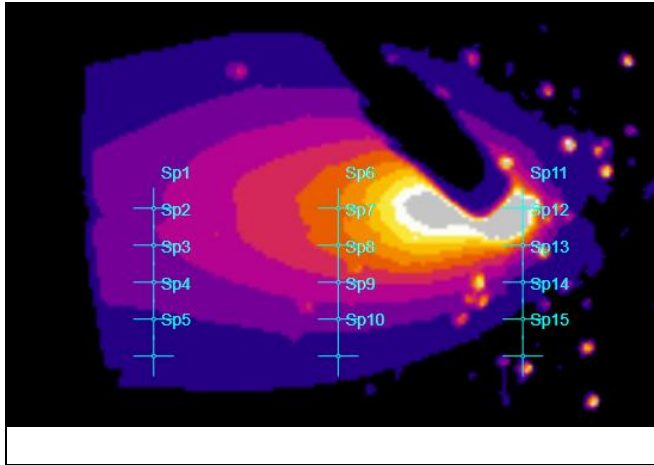


Figure V.14 Photo thermographie T=80s

Dans le temps de T=1min 37s

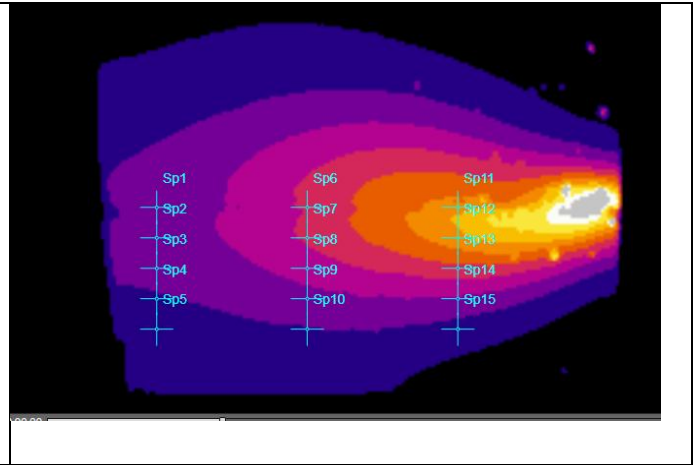


Figure V.15 Photo thermographie T=97s

• Commentaire sur les photos de thermographie

L'ensemble des images capturées au cours du processus de soudage illustre de manière claire l'évolution thermique dynamique sur la surface d'une tôle métallique, soumise à un apport d'énergie localisé par arc électrique. La distribution thermique est révélée par un dégradé progressif de couleurs, représentant les différentes plages de température.

- En début de soudage (9 s), la chaleur est fortement localisée autour du point d'amorçage, générant une zone blanche à jaune indiquant des températures élevées, entourée de dégradés violets qui marquent un début de conduction thermique verticale.
- Au fur et à mesure de l'avancement du cordon (33 s à 47 s), on observe une progression de la zone chaude vers la droite de la tôle. La chaleur se diffuse horizontalement et radialement, formant une zone elliptique de transfert thermique typique des matériaux métalliques à bonne conductivité thermique.
- Dans les images de 1 min 6 s à 1 min 37 s, la tôle montre une propagation complète de la chaleur sur sa largeur, avec une zone de fusion toujours visible à l'avant du cordon (blanc), tandis que l'arrière du cordon présente des couleurs violettes à bleues, indiquant un refroidissement progressif.

Cette distribution symétrique démontre une diffusion thermique homogène, assurée par la conduction dans le matériau.

- **Analyse des courbes de température enregistrées par thermographie infrarouge**

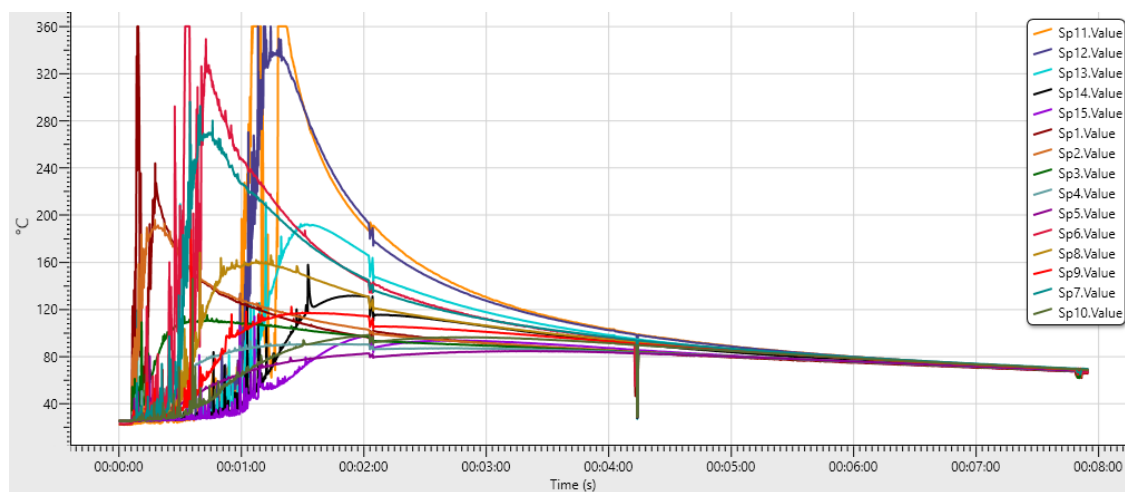


Figure V.16 Courbes de température des spt 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15

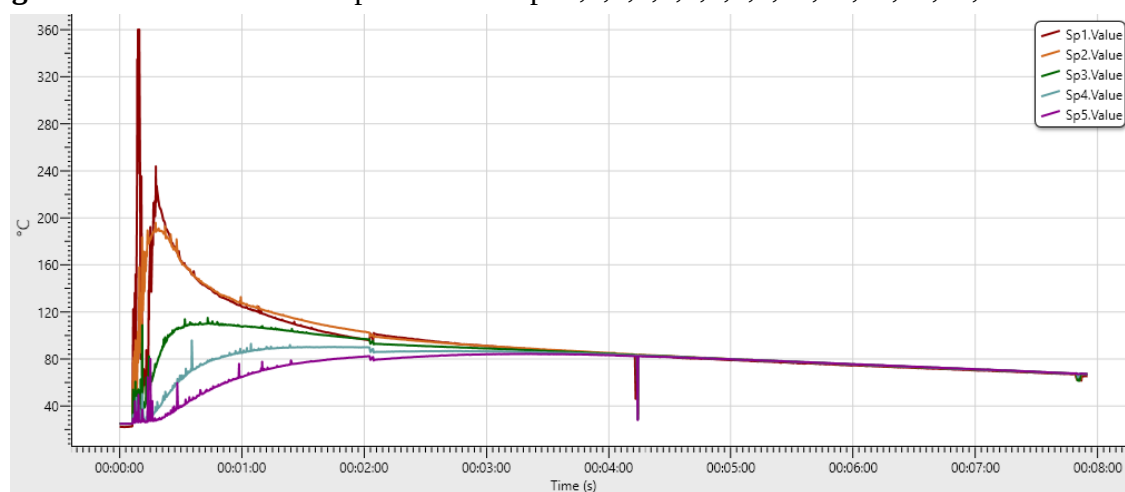


Figure V.17 Courbes de température des spt 1,2,3,4,5

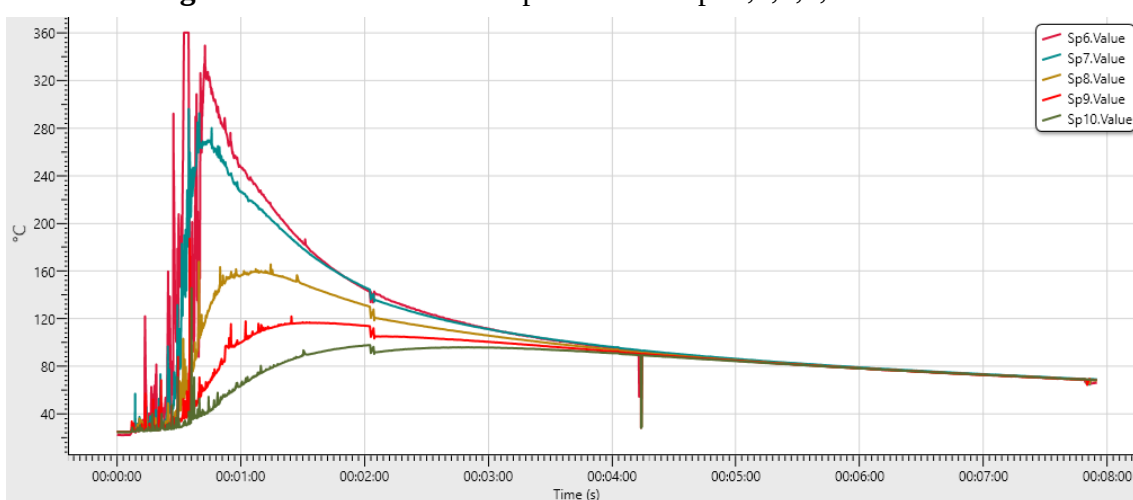


Figure V.18 Courbes de température des spt 6,7,8,9,10

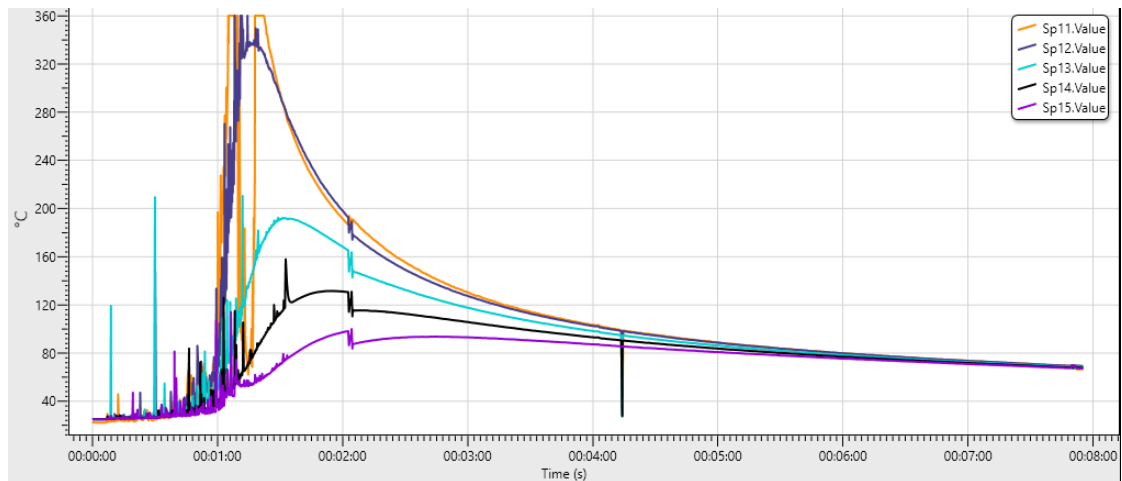


Figure V.19 Courbes de température des spt 11,12,13,14,15

Comportement thermique observé :

1. Phase de montée rapide en température (0–1 min 30 s)

- La plupart des points montrent une augmentation brutale de température, atteignant en moyenne entre 160°C et 360°C.
- Les pics les plus élevés se situent au moment du passage de l'arc sur chaque point. On constate un décalage temporel entre les courbes, cohérent avec la progression horizontale du cordon sur la tôle.

2. Phase de refroidissement (1 min 30 s → 8 min)

- Après le passage de l'arc, toutes les courbes suivent une décroissance exponentielle typique d'un refroidissement par conduction dans un métal à l'air libre.
- Vers la fin de l'enregistrement, les températures tendent vers une valeur d'équilibre proche de 80°C, ce qui correspond à une température résiduelle uniforme sur la tôle.

Limite importante : Capacité de mesure maximale de 360 °C

Il est crucial de noter que la caméra utilisée a une plage maximale limitée à 360 °C. Cela constitue une limitation importante dans le contexte du soudage MIG, où la température du bain de fusion peut facilement dépasser les 1 500 °C, et même 3 000 °C localement.

Conséquences :

- Les valeurs maximales mesurées sont tronquées (coupées) à 360 °C.
- Certains pics visibles sur les courbes sont plats ou saturés, ce qui indique que la caméra a atteint sa valeur de mesure maximale, et que la vraie température est en réalité bien plus élevée.
- Cela biaisera l'interprétation quantitative, mais reste exploitable pour une analyse comparative et qualitative des profils de montée/refroidissement.

• Modélisation thermique de la ZAT par conduction transitoire

Conduction thermique transitoire

Lors du soudage, une forte quantité de chaleur est localement introduite au niveau du cordon. Cette énergie se propage dans la tôle par conduction, créant un gradient de température décroissant avec la distance au cordon.

Ce phénomène est transitoire (car il évolue dans le temps) et unidimensionnel dans les cas simplifiés. Cette formule est une solution approchée permettant d'estimer la température atteinte à une certaine distance x du cordon, ou inversement, la distance à laquelle une température critique est atteinte.

Formule présentée :

$$\frac{1}{T_m - T_i} = x \cdot \frac{4,13 \cdot \rho \cdot C_v \cdot E_p}{H_n} + \frac{1}{T_f - T_i}$$

Tableau V.9 Variable de la formule

Symbole	Description	Unité
x	Distance à la zone de liaison où l'on veut connaître le pic de température	mm
T_m	Température maximale atteinte à la distance x	°C
T_i	Température initiale de la pièce	°C
T_f	Température de fusion du métal de base	°C
$\rho \cdot C_v$	Chaleur spécifique volumique (produit de la masse volumique et de la chaleur spécifique)	J/m ³ ·°C
E_p	Épaisseur de la tôle	m
H_n	Énergie nette de soudage	J/m
$H_n = \frac{f_1 UI}{V}$	Formule de calcul de l'énergie nette pour le soudage à l'arc électrique	J/m
f_1	Coefficient de transfert (souvent $\approx 0,8$ à $0,9$ pour MIG/MAG)	—
U	Tension de soudage	Volts (V)
I	Intensité de soudage	Ampères (A)
V	Vitesse de soudage	m/s

• Pourquoi utiliser cette formule ?

Dans un acier (comme le S235), la ZAT est la région de la tôle chauffée sans fusion, mais où la structure du métal est modifiée.

On distingue principalement deux seuils :

Tableau V.10 Température seuil

Transformation	Température seuil
Début d'austénitisation	$A_c1 \approx 723^\circ\text{C}$
Fin d'austénitisation complète	$A_c3 \approx 880^\circ\text{C}$

En résolvant cette formule pour :

- $T_m = A_c 1$: on trouve x_1 , la distance maximale atteinte par la transformation partielle.
- $T_m = A_c 3$: on trouve x_2 , la distance jusqu'à laquelle la transformation complète a eu lieu.

La différence $x_1 - x_2$ te donne la largeur (ou longueur latérale) de la ZAT austénitisée, autrement dit, la profondeur de l'influence thermique autour du cordon.

Calcul :

Calcul de vitesse

La vitesse de soudage se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t}$$

où:

- V : Vitesse de soudage (en mm/s)
- L : Longueur du cordon (en mm) $\rightarrow 25 \text{ cm} = 250 \text{ mm}$
- t : Temps de soudage (en secondes) $\rightarrow 97 \text{ s}$

Application numérique :

$$V = \frac{250}{97} \approx 2,577 \text{ mm/s}$$

Résultat :

La vitesse de soudage est :

$$V \approx 2,58 \text{ mm/s}$$

• Formule de l'énergie nette de soudage

L'énergie nette de soudage, c'est-à-dire l'énergie thermique effectivement absorbée par le matériau pendant le soudage, par unité de longueur (en Joules par millimètre).

$$H_n = \frac{f_1 \cdot U \cdot I}{V}$$

• Données numériques :

• Tableau V.11 Valeurs des variables

Symbole	Signification	Valeur	Unite	Remarque
f_1	Coefficient de transfert	0,8	—	Typique pour le procédé MIG
U	Tension de soudage	20	V	Valeur donnée
I	Intensité de soudage	100	A	Valeur donnée
V	Vitesse de soudage	2,58 mm/s	= 0,00258 m/s	Convertie en mètre/seconde

Application numérique :

$$H_n = \frac{0,8 \cdot 20 \cdot 100}{0,00258} = \frac{1600}{0,00258} \approx 620155,04 \text{ J/m}$$

Résultat final :

- **Énergie nette de soudage** (exprimée en mètres) :

$$H_n \approx 620155 \text{ J/m}$$

Formule utilisée :

$$\frac{1}{T_m - T_i} = x \cdot \frac{4,13 \cdot (\rho \cdot C_v) \cdot E_p}{H_n} + \frac{1}{T_f - T_i}$$

Données utilisées tout en mètre (acier S235 + paramètres soudage MIG) :

Tableau V.12 Données utilisées pour calculer

Terme	Symbole	Valeur	Unité
Température ambiante	T_i	25	°C
Température de fusion acier	T_f	1530	°C
Début austénitisation	T_{Ac1}	723	°C
Fin austénitisation	T_{Ac3}	880	°C
Chaleur volumique	$\rho \cdot C_v$	3432000	J/m ³ ·°C
Épaisseur de tôle	E_p	0,0048	m
Énergie nette	H_n	620160	J/m

Étapes de calcul pour Ac1 (723 °C) :

Étape 1 – Calcul des inverses de température:

$$\frac{1}{T_f - T_i} = \frac{1}{1530 - 25} = \frac{1}{1505} \approx 6,644 \times 10^{-4}$$

$$\frac{1}{T_m - T_i} = \frac{1}{723 - 25} = \frac{1}{698} \approx 1,433 \times 10^{-3}$$

Étape 2 – Différence:

$$\Delta = 1,433 \times 10^{-3} - 6,644 \times 10^{-4} = 7,687 \times 10^{-4}$$

Étape 3 – Calcul du coefficient multiplicatif K :

$$K = \frac{4,13 \cdot (3432000) \cdot 0,0048}{620155} = \frac{68035,968}{620155} \approx 0,11$$

Étape 4 – Calcul de la distance x_{Ac1} :

$$x = \frac{7,687 \times 10^{-4}}{0,11} \approx 6,99 \times 10^{-3} \text{ m} = 6,99 \text{ mm}$$

Pour : $T_m = Ac1 = 723^\circ C$, la distance $x \approx 6,99 \text{ mm}$

Étapes de calcul pour Ac3 (880 °C) :

Étape 1 – Calcul des inverses de température :

$$\frac{1}{T_{Ac3} - T_i} = \frac{1}{880 - 25} = \frac{1}{855} \approx 1,170 \times 10^{-3}$$

Étape 2 – Différence:

$$\Delta = 1,170 \times 10^{-3} - 6,644 \times 10^{-4} = 5,056 \times 10^{-4}$$

Étape 3 – Calcul de la distance x_{Ac3} :

$$x = \frac{5,056 \times 10^{-4}}{0.11} \approx 4,59 \times 10^{-3} \text{ m} = 4,59 \text{ mm}$$

Pour : $T_m = Ac1 = 880^\circ C$, la distance $x \approx 4,59 \text{ mm}$

Résultats :

Tableau V.13 Résultats de distance de AC1 et AC3

Temperature critique	Distance x atteinte depuis le cordon
Ac1 = 723 °C	$x_{Ac1} = 6,99 \text{ mm}$
Ac3 = 880 °C	$x_{Ac3} = 4,59 \text{ mm}$

- Calcul de la Largeur de la ZAT austénitisée :

$$x_{ZAT} = x_{Ac1} - x_{Ac3} = 6,99 \text{ mm} - 4,59 \text{ mm} = \boxed{2,4 \text{ mm}}$$

Conclusion

L'étude thermique menée à l'aide de la caméra infrarouge a permis de visualiser la propagation de la chaleur lors du soudage MIG de l'acier doux S235 et d'estimer avec précision les dimensions de la zone affectée thermiquement (ZAT). Grâce à l'application de la formule analytique basée sur l'équilibre thermique et les propriétés physiques du matériau, les distances critiques correspondant aux températures seuils Ac1 (723 °C) et Ac3 (880 °C) ont été calculées.

Les résultats obtenus indiquent une distance d'environ 6,99 mm pour Ac1 et 4,59 mm pour Ac3, soit une largeur de ZAT austénitisée d'environ 2,40 mm. Ces valeurs sont réalistes compte tenu des paramètres de soudage appliqués (tension de 20 V, intensité de 100 A, vitesse de soudage de 2,58 mm/s) et du bon transfert thermique observé.

Cette méthode, bien que simplifiée, s'est révélée efficace pour estimer la profondeur d'influence thermique autour du cordon sans recours à des capteurs intrusifs. Elle met en lumière l'impact direct des conditions de soudage sur la microstructure du matériau et justifie l'importance d'un contrôle rigoureux des paramètres opératoires. [29]

- **Pourquoi la caméra infrarouge ne permet pas de calculer correctement la ZAT**

La caméra thermique utilisée dans cette étude est limitée à une température maximale de 360 °C. Or, les seuils critiques pour définir la ZAT sont :

- $Ac1 \approx 723 \text{ °C}$
- $Ac3 \approx 880 \text{ °C}$

5.2.8 Essai de dureté

L'essai de dureté est un contrôle destructif (CD) car il altère localement le matériau en laissant une empreinte permanente sur la surface testée. Même si l'ensemble de la pièce n'est pas détruit, le point de mesure ne peut plus être considéré comme intact, ce qui classe cet essai dans la catégorie des essais destructifs.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à appliquer une charge définie sur un pénétrateur (bille en acier, cône en diamant, ou pyramide) en contact avec la surface du matériau. Après retrait de la charge, on mesure :

- Soit la profondeur de l'empreinte (ex : Rockwell),
- Soit la surface de l'empreinte (ex : Vickers ou Brinell).

Ce test permet d'évaluer la résistance du matériau à la déformation plastique locale, donc sa dureté.

Objectif dans le cas du soudage : L'essai est utilisé ici pour :

- Comparer les zones : métal fondu, zone affectée thermiquement (ZAT), et métal de base.
- Détecter des variations de dureté dues au cycle thermique du soudage.
- Identifier des zones fragilisées (trop dures) ou affaiblies (trop tendres).

- **Présentation de la machine d'essai de dureté utilisée**

L'essai de dureté a été réalisé à l'usine SOREMEP, en utilisant une machine de type Rockwell, méthode HRC, adaptée aux matériaux métalliques durs comme l'acier soudé.

Caractéristiques de la machine :

- **Méthode :** Rockwell C (HRC)
- **Pénétrateur :** cône en diamant (forme conique à 120°)
- **Charge appliquée :** 150 kgf (valeur standard pour HRC)
- **Échelle de mesure :** HRC (Hardness Rockwell C)
- **Matériaux testés :** acier S235 soudé (tôle de 4,8 mm soudé)



Figure V.20 Duromètre pour l'essai de dureté et la Charge appliquée de la machine

• Justification de l'utilisation de l'échelle HRC

Dans le cadre de notre étude, l'essai de dureté a été réalisé selon la méthode Rockwell C (HRC), à l'aide d'un pénétrateur conique en diamant avec une charge de 150 kgf. Cette méthode est couramment utilisée pour les aciers trempés ou très durs.

Cependant, dans notre cas, le matériau testé est un acier doux S235, non trempé, ce qui n'est pas optimal pour la méthode HRC. En effet :

- L'acier doux présente une dureté trop faible pour que l'échelle HRC soit suffisamment sensible.
- Le pénétrateur en diamant, combiné à la forte charge, risque de générer des imprécisions (empreintes peu nettes, mesures instables, voire absence de lecture).
- Ces conditions peuvent fausser les résultats ou donner des valeurs anormales ou erronées.

Malgré cela, et dans un but pédagogique, nous avons choisi de poursuivre l'essai avec l'équipement disponible, tout en corrigeant les limitations de lecture par une transformation des valeurs.

• Conversion des valeurs de HRC en HB

Pour rendre les résultats exploitables, les valeurs obtenues en HRC ont été converties en valeurs de dureté Brinell (HB), plus adaptées aux aciers doux comme le S235.

Formule utilisée :

Pour effectuer cette conversion, nous avons utilisé la relation empirique suivante :

$$HB = (10 \times HRC) + 30$$

Cette formule est une relation empirique, c'est-à-dire qu'elle a été dérivée de l'observation expérimentale de milliers de mesures de dureté réalisées en laboratoire. En comparant des valeurs de dureté mesurées sur les mêmes matériaux avec différentes méthodes (Rockwell, Brinell, Vickers...), des chercheurs et ingénieurs ont établi des courbes de correspondance entre les échelles.

- **Positionnement des points d'essai**

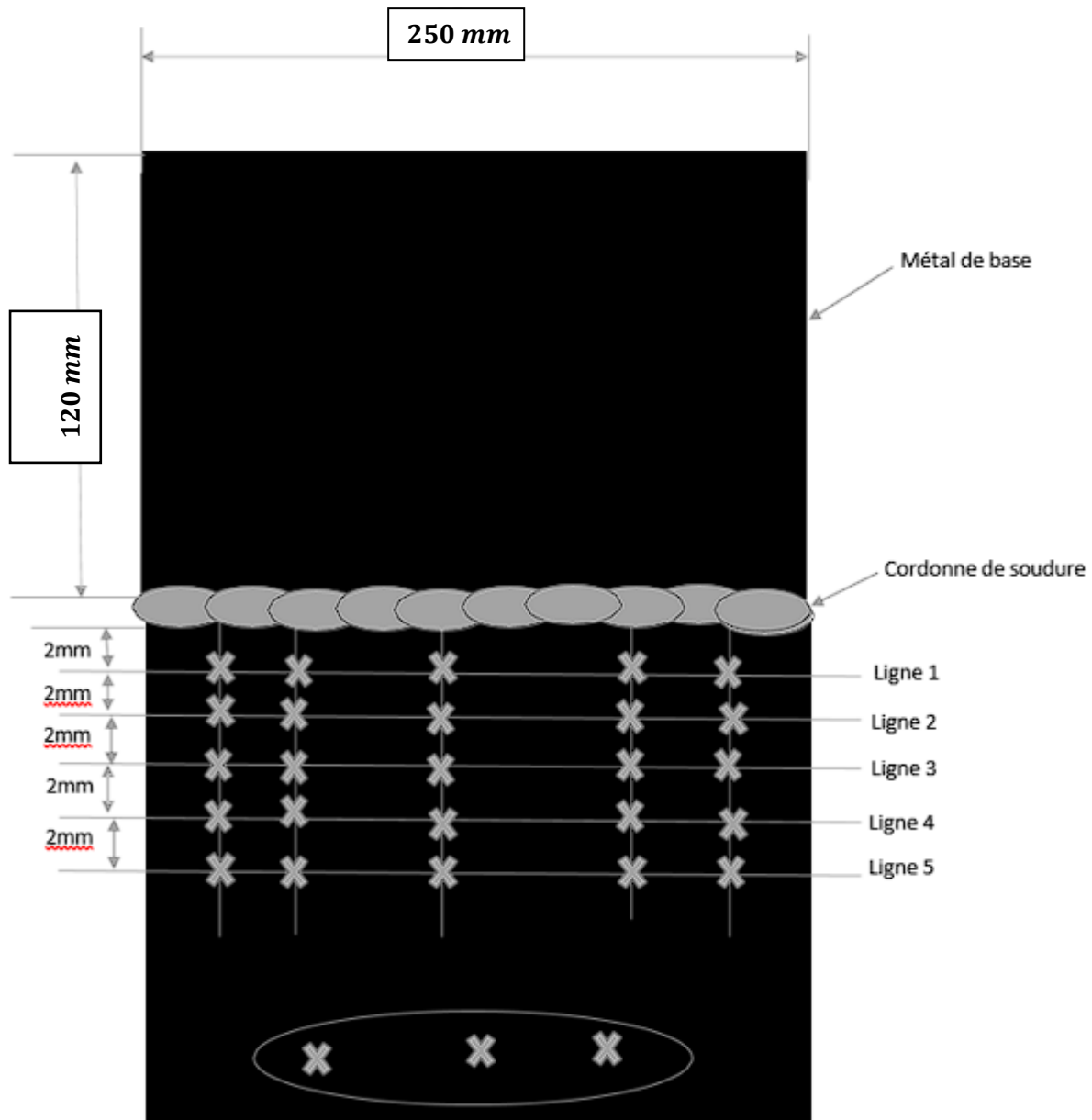
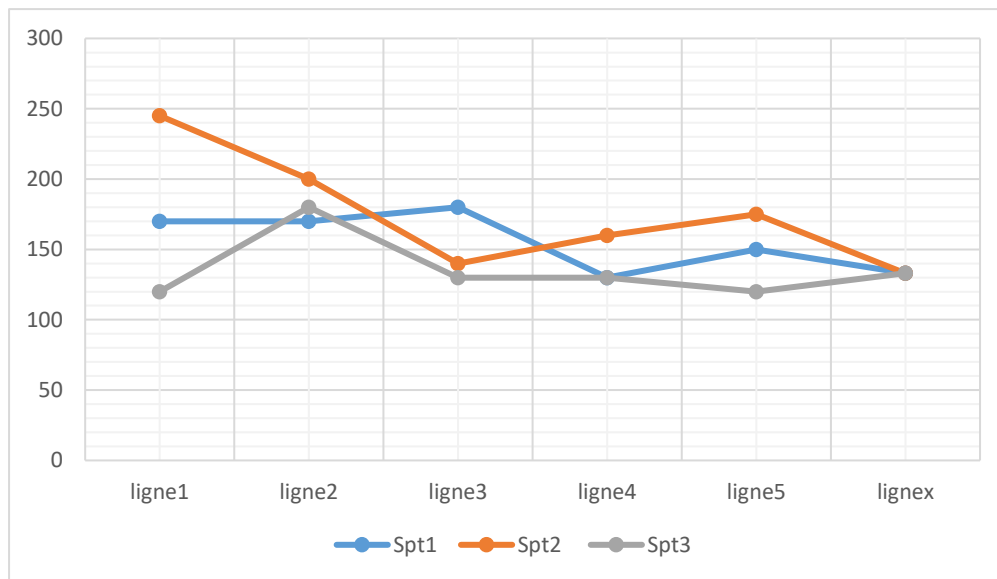


Figure V.21 Schéma explicatif contient les Positionnement des points d'essai

Résultat en HB :**Figure V.22** Courbes d'essai dureté

- **Analyse des résultats de dureté**

Le graphique ci-dessus présente les variations de dureté relevées sur trois lignes différentes (Spt1, Spt2, Spt3) traversant la zone soudée. Chaque ligne correspond à une série de mesures prises verticalement, avec un espacement de 2 mm entre chaque point, soit 5 points par ligne. Les lignes sont espacées horizontalement et positionnées de manière à couvrir les zones essentielles de la soudure : le métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et le cordon.

Observations :

- Spt2 (courbe orange) Le graphique relatif aux mesures de dureté montre que les valeurs relevées pour le point Spt2 sont nettement plus élevées au niveau de la ligne1, atteignant un maximum de l'ordre de 250 HB. Cette valeur élevée indique une proximité directe avec le cordon de soudure, où le refroidissement rapide a induit une augmentation locale de la dureté due à la formation probable de microstructures dures comme la martensite ou une ferrite aciculaire.
- On observe ensuite une diminution progressive de la dureté au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cordon (lignes suivantes), ce qui marque la transition à travers la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).
- Passé cette zone, les valeurs de dureté tendent à se stabiliser autour de 140–150 HB, indiquant que le matériau a retrouvé une structure similaire au métal de base non affecté par le soudage. Cette évolution confirme la présence d'une ZAT avec des variations microstructurales et mécaniques nettes, suivie d'un retour à l'état initial du matériau.
- Spt1 (bleu) est relativement stable, avec des valeurs comprises entre 160 et 185 HRC, reflétant une zone thermiquement affectée mais sans surchauffe majeure.
- Spt3 (gris) présente des valeurs plus basses, entre 120 et 170 HRC, ce qui pourrait indiquer un refroidissement plus lent, une lecture dans le métal de base ou une transition douce entre ZAT et cordon.

5.2.9 Essai de micrographie

- **Définition**

L'essai de micrographie est une technique d'analyse métallographique qui consiste à observer, au microscope optique ou électronique, la structure interne d'un matériau après une préparation spécifique de sa surface. Cette observation permet de visualiser les phases métallurgiques, la forme et la taille des grains, ainsi que d'éventuels défauts internes tels que les fissures, inclusions ou porosités.

- **Principe de la micrographie**

L'échantillon est d'abord préparé mécaniquement (polissage fin) puis attaqué chimiquement à l'aide d'un réactif adapté (comme le Nital pour les aciers), afin de révéler les contrastes métallurgiques.

Ces contrastes rendent visibles les différentes zones affectées par des traitements thermiques, mécaniques ou des procédés comme le soudage.

- **Objectif dans notre cas d'étude**

Dans le cadre de notre mémoire, l'essai de micrographie a été réalisé sur une tôle d'acier doux S235 soudée par MIG avec fil fourré sans gaz, dans le but de :

- Observer les variations microstructurales dans les différentes zones du joint soudé : métal de base, ZAT et métal fondu.
- Identifier visuellement l'étendue de la ZAT, à partir des transitions entre les grains du métal de base et ceux du cordon.
- Comparer la taille des grains selon le cycle thermique : croissance dans la ZAT, transformation complète dans le cordon, stabilité dans le métal de base.

- **Étapes de l'essai**

- **Découpe de l'échantillon :**

Une section de la tôle soudée a été coupée avec lubrification afin de limiter l'échauffement, sur une largeur d'environ 4,2 cm, perpendiculairement à la ligne de soudure.

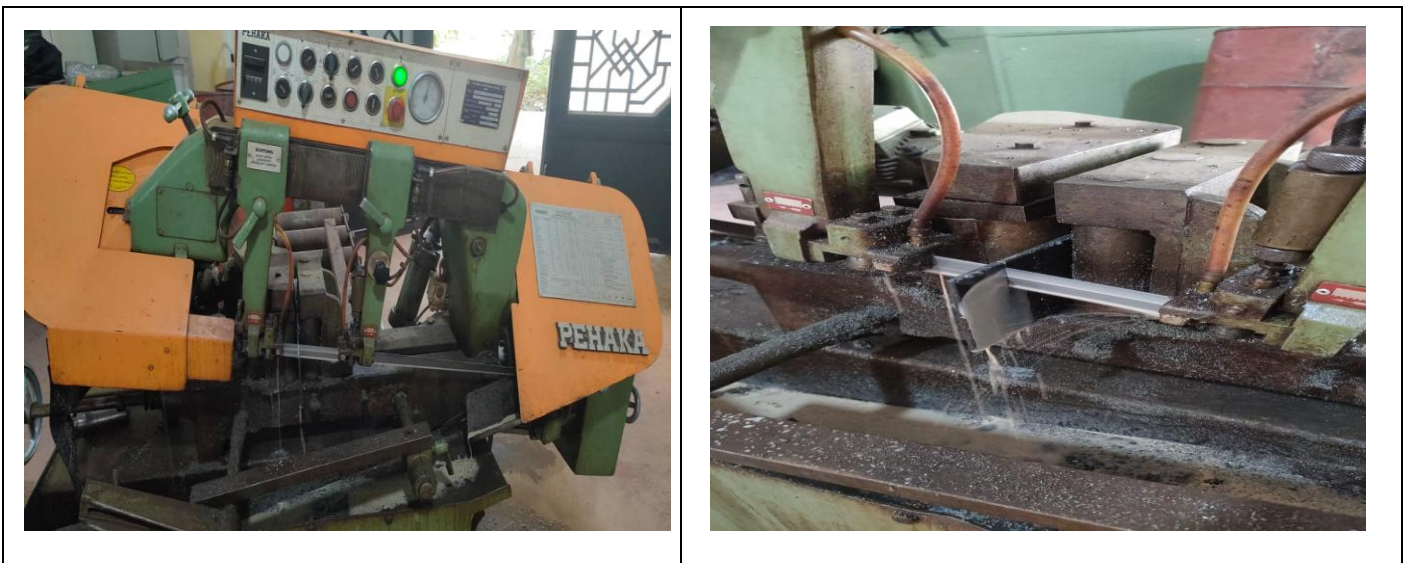


Figure V.23 Machine-outil de couper avec lubrification

- **Polissage mécanique :**

La surface de coupe a été soigneusement polie à l'aide de papiers abrasifs selon l'ordre croissant de finesse :

- ✓ Papier P100 (vert),
- ✓ Puis P220, P400, P600,
- ✓ Et enfin P1000 pour une finition fine, indispensable à une bonne révélation des structures.



Figure V.24 Polisseuse métallographique

Nettoyage chimique : Après polissage, la surface a été nettoyée et attaquée chimiquement à l'acide nitrique à 60 % (dilué dans de l'alcool) pour révéler les microstructures métalliques.

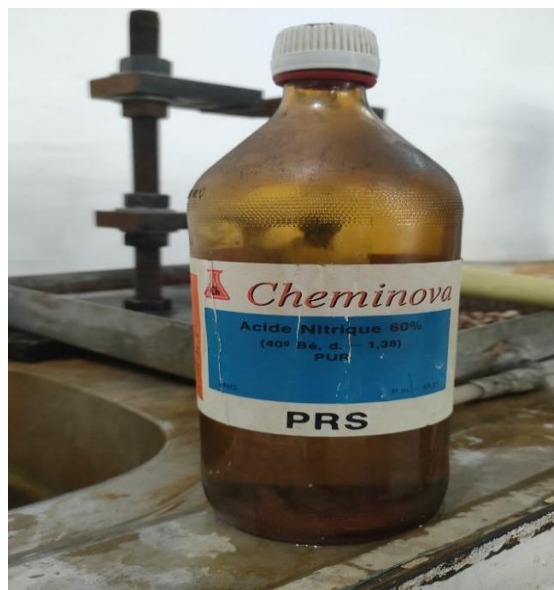


Figure V.25 Acide utilisé pour nettoyer

- **Observation au microscope :**

L'échantillon a été observé au niveau de la zone polie, en essayant de mettre en évidence les changements de structure dans les différentes régions affectées par le soudage.



Figure V.26 Microscope optique utilisé

- **Conclusion de l'essai de micrographie**

Malgré la préparation soignée de l'échantillon (polissage, attaque chimique et observation au microscope métallographique), nous n'avons pas pu mettre en évidence les changements de structure métallique entre le métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et le métal fondu.

Cela s'explique principalement par:

- Les limitations de résolution du microscope optique utilisé, qui ne permettent probablement pas de distinguer les fines transformations microstructurales caractéristiques d'un acier doux tel que le S235 ;
- Une attaque chimique potentiellement insuffisante ou inadaptée, qui n'a pas permis de révéler efficacement les contrastes de phase.

En conclusion, les moyens d'observation microscopique disponibles ne permettent pas, dans notre configuration expérimentale, de visualiser clairement les modifications de structure induites par le soudage.

5.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en œuvre une série d'essais expérimentaux visant à analyser les effets thermiques et mécaniques du procédé de soudage sur des tôles en acier S235. À travers l'utilisation de la caméra infrarouge, nous avons pu visualiser la répartition de la chaleur et estimer les dimensions de la zone affectée thermiquement (ZAT). L'essai de dureté a permis, quant à lui, d'évaluer les variations de propriétés mécaniques induites par le cycle thermique de soudage.

L'essai de micrographie, bien que correctement réalisé selon les étapes classiques (polissage, attaque chimique, observation), n'a pas permis de révéler clairement les transformations microstructurales, en raison des limitations du microscope optique utilisé.

Enfin, l'ensemble de ces observations expérimentales constitue une base solide pour mieux comprendre l'influence du soudage sur les propriétés locales des matériaux, et servira de référence pour les analyses et interprétations menées dans les chapitres suivants.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis de mener une étude approfondie sur l'effet du soudage MIG sur un acier doux de type S235, en adoptant une démarche croisée alliant modélisation théorique, calculs analytiques et investigations expérimentales. L'objectif principal était de caractériser l'influence du cycle thermique de soudage sur la structure et les propriétés mécaniques locales du matériau, en se focalisant en particulier sur la zone affectée thermiquement (ZAT), les défauts de soudage générés et les méthodes de contrôle de la qualité.

Dans un premier temps, l'étude théorique a permis d'introduire les phénomènes thermiques liés au procédé MIG, en particulier la notion d'énergie linéique nette, les gradients de température et leur rôle dans la formation de la ZAT. À partir des équations analytiques, nous avons pu estimer la profondeur thermique atteinte par les seuils critiques de transformation (Ac_1 et Ac_3), permettant ainsi de délimiter la zone de transformation austénitique. Tous les calculs ont été réalisés en unités métriques avec un soin particulier porté à la cohérence dimensionnelle, assurant la précision des résultats.

L'approche expérimentale a ensuite été déployée selon trois axes complémentaires : une analyse thermique par caméra infrarouge pour visualiser la diffusion de chaleur et estimer la largeur de la ZAT, un essai de dureté pour évaluer l'évolution des propriétés mécaniques à travers les différentes zones du joint soudé, et un essai métallographique. Ce dernier, bien que mené selon les standards (polissage, attaque chimique, observation au microscope optique), n'a pas permis de révéler de manière concluante les transformations microstructurales, en raison des limites de résolution du matériel utilisé.

L'ensemble des résultats a montré que les paramètres de soudage (tension, intensité, vitesse d'avance) influencent directement la stabilité du bain de fusion, la géométrie du cordon, la distribution thermique et donc la qualité finale du joint. Des défauts tels que des cordons irréguliers, porosités, ou mauvaise pénétration ont été observés, soulignant la nécessité d'un bon contrôle opératoire.

En conclusion, ce travail met en lumière l'intérêt d'une méthodologie intégrée combinant calculs, essais et observations pour mieux comprendre les effets du soudage MIG sur les matériaux métalliques. Il ouvre également la voie à des perspectives d'optimisation, notamment en explorant des méthodes de contrôle plus avancées (microscopie électronique, essais mécaniques complémentaires) ou en simulant le comportement thermique et mécanique via des outils de simulation numérique.

Références bibliographiques

- [3] LARRY J. Welding Principles and Applications. 9e édition. 2020.
- [4] BOUTIN T. Détection de dérives en temps réel lors de la mise en œuvre de procédés de soudage par analyse expérimentale et apprentissage automatique. l'université de montpellier. 2023
- [5] PLETSEER V. Le procédé de soudage MIG-Plasma : Application au soudage de l'Aluminium. 2020.
- [8] : DERFOUF C-E. effet de la soudure sur la structure de l'acier. L'université Mohamed Khieder – Biskra. 2011.
- [19] BENCHARIF K. les défauts de soudage. centre de formation interne - QC & NDT .mars 2011.
- [20] KOEN Faes et JÜRGEN Feytaerts – Institut Belge de la Soudure (IBS) AXEL Vlamincx et ELI Reekmans – Oqton Belgium. contrôle de qualité en temps réel des processus de soudage.
- [24] SAADOUN M_I. Choix et implantation d'un procédé de CNC au niveau de l'entreprise ALFET [Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret]. l'université Ibn Khaldoun de Tiaret.
- [25] DJELLOUL A_K. Panorama des méthodes de contrôle de qualité en temps réel des processus de soudage. Université Aboubakr Belkaid Tlemcen. 2022
- [27] NADAL R. étude-du-diagramme-fer-carbone. (2017, 22 mars). SlideShare.
- [28] BENHADJI SERRADJ N-E. Contribution à l'évaluation du champ thermique à l'interface outil-pièce pour l'optimisation des conditions d'usinage. Université Aboubakr Belkaid Tlemcen. 2022
- [1] <https://www.arccaptain.com/fr/blogs/article/history-of-welding?srsId=AfmBOoqwabf625vq-P4UXnMTIZ1x-OXD3B9GaE4b4lQrJLbCm7sYCl6X>
- [2] https://removethefume.com/fr/chronologie-histoire-du-soudage/?srsId=AfmBOoqNs3uYwC6g5HjW2frUu-f1nYxtbGzO6_KWJD6J-tlajXH7Q70p
- [6] <https://www.har-tech.com/soudage-mig-mag/#:~:text=La%20soudure%20MIG%20DMAG%20produit,r%C3%A9duire%20les%20co%C3%BBts%20de%20production.>
- [7] https://www.memoireonline.com/12/13/8307/m_Analyse-numerique-des-contraintes-residuelles-dans-les-structures-assemblees-par-soudage-cas-des4.html
- [9] <https://www.aws.org/>
- [10] <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/types-of-welding-joints/>
- [11] https://fr.mfgrobots.com/mfg/it/1002022009.html#google_vignette
- [12] https://www.arccaptain.com/fr/blogs/article/different-types-of-welds-and-joints?srsId=AfmBOop2jhFg3J1dCAU5gvE5MUMbB816XhN5pcie0gSTUERktpwh_PsG

Références

- [13] https://www.weldmagazine.com/weldmagazine/soudure_ete2022/MobilePagedArticle.action?articleId=1794809#articleId1794809
- [14] [https://www.systemweld.com/la-zat-soudure/#:~:text=La%20Zone%20Affect%C3%A9e%20Thermiquement%20\(ZAT\)%20est%20une%20r%C3%A9gion%20dans%20un,brasage%20ou%20le%20micro%2Dsoudage.](https://www.systemweld.com/la-zat-soudure/#:~:text=La%20Zone%20Affect%C3%A9e%20Thermiquement%20(ZAT)%20est%20une%20r%C3%A9gion%20dans%20un,brasage%20ou%20le%20micro%2Dsoudage.)
- [15] <https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Weld-inspection#>
- [16] <https://www.tuv.com/world/en/non-destructive-testing-of-welds.html>
- [17] <https://www.flyability.com/blog/ndt>
- [18] <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/types-of-welding-defects/>
- [21] <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/controle-de-la-qualite#:~:text=les%20mat%C3%A9riaux%20ferromagn%C3%A9tiques.-,L'importance%20du%20contr%C3%B4le%20de%20la%20qualit%C3%A9%20en%20soudage,l'efficacit%C3%A9%20de%20leurs%20projets.>
- [22] <https://www.ceaweld.com/fr/les-enjeux-du-soudage-aujourd'hui-3-nouveaux-facteurs-a-prendre-en-compte/>
- [23] <https://omnifab.ca/inspection-soudure/>
- [26] <https://www.ceaweld.com/en/product/wf-5/>
- [29] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_\(th%C3%A9orie\)#:~:text=Le%20soudage%20est%20une%20technique,'un%20produit%20d'apport.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_(th%C3%A9orie)#:~:text=Le%20soudage%20est%20une%20technique,'un%20produit%20d'apport.)

Annexes

- **USINE SOREMEP**

La SOREMEP (Société d'Études et de Réalisations Métalloplastiques) est une entreprise publique algérienne fondée en 2001, située dans la zone industrielle de Chetouane à Tlemcen. Elle est affiliée au groupe industriel public ELEC EL DJAZAIR.

Activités principales

SOREMEP est spécialisée dans la conception et la fabrication de produits métalloplastiques, notamment :

- Mobilier métallique (bureaux, armoires, rayonnages)
- Produits mécano-soudés
- Usinage mécanique
- Injection plastique
- Signalisation ferroviaire
- **Localisation :**

L'usine SOREMEP (Société d'Études et de Réalisations Métalloplastiques) est située dans la Zone Industrielle de Chetouane, à Tlemcen, en Algérie. Son adresse exacte est : BP 330, Route de Chetouane, Tlemcen.

1.4301 (AISI 304) fait référence à une norme de classification des aciers inoxydables, utilisée pour identifier un type spécifique d'acier inoxydable austénitique

AWS D1.1 est une norme de soudage structurel très importante, émise par l'American Welding Society.

ISO 9606-1 est une norme internationale qui définit les exigences de qualification des soudeurs pour le soudage par fusion des aciers.

EN 1011-2 est une norme qui traite des recommandations pour le soudage des matériaux métalliques.

La norme ASME fait référence aux codes et standards publiés par l'American Society of Mechanical Engineers. Ce sont des normes techniques très reconnues à l'échelle mondiale, particulièrement dans le domaine de la construction de chaudières, de tuyauteries, de réservoirs sous pression, et d'équipements mécaniques.

NF EN 10002-1 Octobre 1990 la présente norme définit la terminologie relative à l'essai de traction.

NF EN 10045-1 Octobre 1990 matériaux métalliques – essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy

NF EN 875 Novembre 1995 essais destructif des soudures sur matériaux métalliques – essais de flexion par choc – position de l'éprouvette, orientation de l'entaille et examen.

NF A 89-203 assemblages plans et tubulaires soudés bout à bout par fusion, essai de pliage transversal.

NF A 89-204 soudage et techniques connexes – aptitude au brassage- définition et emploi éprouvette à jeu variable

EN ISO 17632-A est une norme internationale qui spécifie les exigences relatives aux fils fourrés.

AWS A5.20 est une spécification de l'American Welding Society qui concerne les électrodes en fil fourré utilisées pour le soudage à l'arc avec fil fourré.

Welding is a key thermal process in industry, but it locally alters the structure of the material, especially in the heat-affected zone (HAZ). These alterations can lead to defects, variations in hardness, and mechanical changes. This work aims to analyze the effects of MIG welding using flux-cored wire without shielding gas on low-carbon S235 steel plates, by combining several quality control techniques to better understand the impact of the thermal cycle on the material.

The implemented methodology is based on three complementary experimental approaches. A thermal analysis using infrared thermography was used to visualize heat propagation and estimate the HAZ. A Rockwell hardness test, converted to Brinell, made it possible to detect mechanical variations depending on the distance from the weld bead. Finally, a metallographic study revealed the microstructural transformations in the different weld zones

Keywords: MIG Welding. Flux cored wire. Infrared thermography. Low carbon steel S235.

Heat-affected zone (HAZ). Hardness testing. Metallographic examination. Quality control

Le soudage est un procédé thermique essentiel dans l'industrie, mais il modifie localement la structure du matériau, notamment au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT). Ces modifications peuvent entraîner des défauts, des variations de dureté et des altérations mécaniques. Ce travail vise à analyser les effets du soudage MIG avec fil fourré sans gaz sur des tôles en acier doux S235, en combinant plusieurs techniques de contrôle qualité pour mieux comprendre l'impact du cycle thermique sur le matériau.

La méthodologie mise en œuvre repose sur trois axes expérimentaux complémentaires. Une analyse thermique par thermographie infrarouge a été utilisée pour visualiser la propagation de la chaleur et estimer la ZAT. Un essai de dureté Rockwell, converti en Brinell, a permis de détecter les variations mécaniques selon la distance au cordon de soudure. Enfin, une étude métallographique a révélé les transformations microstructurales dans les différentes zones de la soudure.

Mots clé : Soudage MIG. Fil fourré sans gaz. Acier doux S235. Zone affectée thermiquement. Thermographie infrarouge. Essai dureté. Micrographie. Contrôle de qualité