

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

Faculte De Technologie
Departement De Genie Mecanique



Domaine : Sciences Et Technologie
Option : Genie Materiaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

*En vue de l'obtention du diplôme de : **MASTER En Génie Mécanique***

Option : génie Matériaux

Présenté par : CHAKER ahmed yahia

***Etude et inspection des cordons de soudure
par Contrôle non destructifs***

Soutenu Devant le jury composé de :

<i>Dr. BECHANE Leila</i>	<i>Université mohamed boudiaf -M'sila</i>	Président
<i>Pr. ZAOUI Moussa</i>	<i>Université mohamed boudiaf -M'sila</i>	Encadreur
<i>Dr. SAADA Khalissa</i>	<i>Université mohamed boudiaf -M'sila</i>	Examineur

Année Universitaire : 2024 / 2025

Dédicace

Au modèle de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à mes parents.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et sœurs, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leur conseils aides et encouragements.

تشكرات

أشكر أولا وأخيرا الله تعالى الذي أنعم علينا نعمه الظاهرة و الباطنة ، و أمدني بتوفيقه في تحدي الصعوبات التي تواجهني وأعانني على إنجاز هذه المذكرة ، ثم أشكر كلا من الدكتور زاوي موسى الذي رافقني خطوة خطوة خلال إنجاز هذه المذكرة والدكتورة بشان ليلي التي ساعدتني خلال مساري الجامعي كما اود أن أشكر والدتي العزيزة و والدي العزيز و افراد أسرتي على مساندتي طوال الوقت ، كما أشكر كل من ساهم وبذل جهدا في إنجاز هذه المذكرة و أخص بالذكر حمزة و كمال ، دوغة أسامة ،

كما أشكر الأساتذة الكرام أعضاء لجنة المناقشة على تفضلهم بقبول المناقشة.

Remerciements

Je remercie avant tout Allah , Le Très-Haut, pour Ses innombrables bienfaits apparents et cachés, et pour m'avoir accordé Son aide et Sa guidance afin de surmonter les difficultés rencontrées et mener à bien ce mémoire.

Je tiens ensuite à exprimer ma profonde gratitude au Dr. Zaoui Moussa qui m'a accompagné pas à pas tout au long de l'élaboration de ce travail, ainsi qu'à Mme. Bechane Leila, pour son soutien constant durant mon parcours universitaire.

Je remercie également ma chère mère, mon cher père et tous les membres de ma famille pour leur soutien indéfectible.

Mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, en particulier Hamza ouakel et Dougha Oussama.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance aux membres du jury pour avoir bien voulu accepter d'examiner ce travaille

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : étude sur les différents procédés de soudage

1. Origine de soudage :..... 2

2. Principe de soudage :..... 2

3. Le procédé de soudage :..... 2

4. Procédé de soudage MIG-MAG :..... 4

5. Soudage manuel oxyacétylénique :..... 6

6. Soudage manuel oxyacétylénique :..... 6

7. Soudage sous flux en poudre (SAW) :..... 8

8. soudage par friction malaxage (FSW) :..... 8

9. Soudage laser :..... 9

10. Le soudage TIG (Tungstène Inert Gas ou GTAW):..... 10

Conclusion..... 12

CHAPITRE II :Les défauts de soudure

Introduction :..... 13

1. Principes de détection des défauts :..... 14

2. Défauts de surface 14

3. Caractéristiques des défauts 15

4. Défauts de fusion (collage) :..... 16

5. Localisations possibles des manques de fusion :..... 16

6. Défauts de pénétration :..... 19

6.1 Fissurations :..... 19

6.2 Fissures à chaud..... 20

6.3 Fissures froides 20

6.4 Causes de la fissure de soudure 20

7. Les fissures longitudinales 21

7.1 Fissures à chaud..... 22

7.2 Fissures froides 22

7.3 Causes de la fissure de soudure 23

7.4 Prévention des fissures de soudure..... 23

8. Fissures de Cratère :..... 23

8.1 Causes du cratère	24
8.2 Prévention des cratères	24
9. Aspect Visuel :	25
Conclusion.....	26

CHAPITRE III : Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif

Introduction:.....	28
1. Historique des techniques de CND	29
2. Définition et l'intérêt du contrôle non destructif (CND) :	29
3. Principe du contrôle	29
4. But de Contrôle Non Destructif et de Contrôle Non Destructif	31
5. Principes de détection des défauts :	32
5.1 Défauts internes :	32
5.2 Défauts de surface :	32
6. Caractéristiques des défauts :	33
7. Principes de détection des défauts. Différentes techniques du(CND) :	33
7.1 Hétérogénéités et défauts :	33
7.2 Les défauts d'aspect :	34
7.3 Les défauts internes :	34
8. Principe de la détection d'un défaut :	34
9. Différentes techniques de CND :	35
10. Examen visuel :	36
11. Ressuage :	36
11.1 Contrôle par ressuage	37
12. Radiographie.....	39
13. Ultrasons	39
13.1 contrôles par ultrasons :	39
14. Contrôle par magnétoscopie	40
15. Courants de Foucault :	41
16. Thermographie :	42
Conclusion :	46

CHAPITRE IV: Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

Introduction :	48
1. préparation des échantillons :	49
1.1 Premier échantillon :	49

1.1.1	Présentation du matériau Acier AISI 1215 :	49
1.1.2	Domaines d'utilisation :	49
1.1.3	Caractéristiques mécaniques et chimique de l'acier :	49
1.2	Préparation des éprouvettes :	50
2.	Présentation du métal d'apport :	51
2.1	Domaines d'utilisation :	51
2.2	Le procédé du soudage utilisé :	52
3.	Contrôle par (CND) :	54
3.1	Contrôle par Ressuage. :	54
3.1.1	Mode Opérateur du ressuage :	54
3.1.2	Nettoyage des pièces :	54
3.1.3	Application du pénétrant :	55
3.1.4	Élimination de l'excédent de pénétrant :	56
3.2.1	L'Interprétation des Défauts :	56
3.3	Interprétation et évaluation des résultats :	58
3.4	Contrôle par magnétoscopie :	58
3.4.1	Principe :	58
3.4.2	Mise en œuvre :	59
3.4.5	L'excitation :	59
3.4.3	La perturbation :	60
3.4.4	La révélation :	60
3.5	Contrôle par ultrasons :	61
3.5.1	Définition :	61
3.5.2	Émission et réception des ultrasons :	61
3.5.3	Technologie des palpeurs :	62
3.6	Méthodes de contrôle. :	63
3.6.1	Méthodes par réflexion ou par écho :	63
3.6.2	Vérification des appareillages :	64
3.6.3.	Choix du milieu de couplage :	64
3.6.4	Etalonnage et bloc d'étalonnage :	64
3.7	Palpeur droit :	66
3.7.1	Détermination de la zone de silence ou la zone morte :	66
3.7.2	Mouvement du palpeur :	67
3.7.3	Exécution du contrôle :	67

3.7.4 Le recule max (R max) :	67
conclusion :	69
Résultats et Interprétations :	70
Conclusion générale	72
Références Bibliographiques :	74

Listes des figures

Figure 1 : classification des procédés de soudage.....	3
Figure 2 : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion	4
Figure 3 : soudure par arc	5
Figure 4 : Représentation du soudage Mig-Mag.....	6
Figure 5 : soudage oxyacétylénique.....	7
Figure 6 : soudage par plasma.....	7
Figure 7 : principe de soudage à l'arc submergé	8
Figure 8 : soudage par friction-malaxage	9
Figure 9 : Phénomènes physiques lors du soudage laser	10
Figure 10 : Soudage à l'arc gaz-tungstène : (a) processus global ; (b) zone de soudage agrandie.	11
Figure 11 : procédé soudage TIG.....	11
Figure 12 : Les différents types de soufflure.	15
Figure 13 : Exemple de soufflures.	16
Figure 14 : Localisations possibles des manques de fusion.....	17
Figure 15 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	17
Figure 16 : Manque de fusion entre passes.	18
Figure 17 : Manque de fusion à la racine de la soudure.	19
Figure 18 : Défaut manque de pénétration.	19
Figure 19 : La fissure longitudinale.	21
Figure 20 : La fissure transversale.	22
Figure 20 : Cratère	24
Figure 21 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.	25
Figure 22 : Interaction d'un flux lumineux avec la matière	30
Figure 23 : principe de l'examen visuel.....	36
Figure 24 : principe de contrôle par Ressuage.....	38
Figure 25 : Pulvériser à travers le pénétrateur rouge	38
Figure 26 : pénétrant visible comprenant un pénétrant, un révélateur et un nettoyant	39
Figure 27 : Principe du contrôle par ultrasons	40
Figure 28 : Principe de contrôle par magnétoscopie.....	41
Figure 29 : Inspection par Courants de Foucault	42
Figure 30 : Inspection par thermographie.....	43
Figure 31 : Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier E33 sous forme de tôles fortes de 20 mm d'épaisseur	50
Figure 32 : le croquis du chanfrein	51
Figure 33 : réalisé par fraisage un chanfrein à 30°	51
Figure 34 : Équipement de soudage à l'arc au tungstène sous gaz.....	52
Figure 35 : Équipement et procédé de soudage MIG/MAG	53
Figure 36 : Forme de l'échantillon avant et après le soudage.....	54
Figure 37 : nettoyage de la pièce.	55
Figure 38 : Application du produit ressuage Rouge.	55
Figure 39 : application du révélateur.	56
Figure 40 : les défauts détectés dans la pièce après ressuage.	57
Figure 41 : pièce à contrôle par ressuage.....	57

Figure 42 : Procédé de contrôle par magnétoscopie	59
Figure 43 : Contrôle par magnétoscopie.....	60
Figure 44 : chaines de mesure de contrôle par ultrason.....	62
Figure 45 : élément des palpeurs.....	62
Figure 46 : Méthode de contrôle par réflexion.....	63
Figure 47 : matériel utilisé	66
Figure 47 : Inspection ultrasonore d'une soudure	68

Listes des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes techniques de CND :	44
Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques et chimique de l'acier :	49
Tableau 3: propriétés mécaniques moyennes :	49
Tableau 4: composition chimique % :	50
Tableau 5 : paramètres de soudage	53

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les procédés d'assemblage comprennent différentes techniques, dont le soudage occupe une place importante grâce à ses nombreuses applications dans des secteurs industriels très diversifiés tels que l'aéronautique, le nucléaire, la cryogénie, la construction navale ou encore les plates-formes. La compréhension de ce procédé demande

pratique soit ancienne, les avancées technologiques dans ce domaine ne cessent de progresser, ouvrant régulièrement la voie à de nouvelles possibilités d'application.

Le soudage correspond à une technique qui permet de relier deux ou plusieurs pièces constituant un ensemble, de manière à assurer la continuité entre les éléments, soit en utilisant la chaleur, soit en exerçant une pression, ou bien en combinant les deux, avec ou sans l'ajout d'un métal dont la température de fusion est proche de celle du matériau de base.

Il existe une grande variété de procédés de soudage, qui se différencient par le type d'énergie utilisée pour chauffer la matière et par l'état du métal au niveau de la zone de soudure. Certains procédés réalisent l'assemblage par fusion locale des composants, tandis que d'autres assurent une liaison métallique sans fusion, par des moyens purement mécaniques et Le soudage est un procédé d'assemblage qui consiste à unir deux ou plusieurs pièces métalliques en créant une continuité entre elles, généralement par fusion. Cette technique est essentielle dans des domaines tels que la construction, l'automobile, l'aérospatiale et la fabrication de machines. La maîtrise des procédés de soudage et la connaissance des matériaux utilisés sont cruciales pour assurer la solidité, la durabilité et la sécurité des structures réalisées.

CHAPITRE I

étude sur les différents procédés de soudage

1. Origine de soudage :

Le soudage est une technique ancienne qui remonte à plusieurs millénaires. Les premières traces de soudage datent de l'Égypte ancienne, vers 3000 av. J.-C., où les artisans utilisaient une forme primitive de brasure pour assembler l'or et d'autres métaux précieux. Plus tard, pendant l'Empire romain, des techniques similaires ont été utilisées pour produire des armes et des outils [1]. Le véritable essor du soudage moderne commence au XIXe siècle avec l'invention du soudage à l'arc électrique. En 1802, le chimiste russe Vassili Petrov découvre l'arc électrique, mais c'est en 1881 que le Français Auguste de Méritens l'utilise pour la première fois pour souder des métaux. Ensuite, Nikolay Benardos et Stanislav Olszewski, deux ingénieurs russes, développent en 1885 un procédé plus contrôlé appelé soudage à l'arc au carbone [2]. Le XXe siècle voit l'apparition de nouvelles techniques : Le soudage à l'arc métallique (SMAW) en 1920 Le soudage MIG/MAG (GMAW) dans les années 1940 Le soudage TIG (GTAW) dans les années 1950 Et plus récemment, les procédés automatisés comme le soudage par faisceau laser ou faisceau d'électrons [3]

Ces évolutions ont révolutionné les industries de la construction navale, automobile, aéronautique et spatiale.

2. Principe de soudage :

Le soudage met en jeu une combinaison complexe de réactions physico-chimiques influencées par divers paramètres. Ce procédé permet l'unification de deux matériaux à l'échelle atomique au niveau du joint, grâce à l'apport d'une source d'énergie externe. Cette dernière provoque une montée en température suffisante pour initier la fusion ou le ramollissement des pièces à assembler [1]. Selon le procédé utilisé, cette énergie peut provenir de sources variées telles que l'électricité, des réactions chimiques, une force mécanique (comme la friction), ou encore des rayonnements optiques (comme les lasers) [2].

3. Le procédé de soudage :

Opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par

intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base [3].

On distingue deux types de soudure :

La soudure autogène :

le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder ; La soudure hétérogène :

le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder [3]. Les différentes variantes du soudage peuvent être classées en fonction de la source d'énergie employée. Cette classification est illustrée dans la Figure 1.

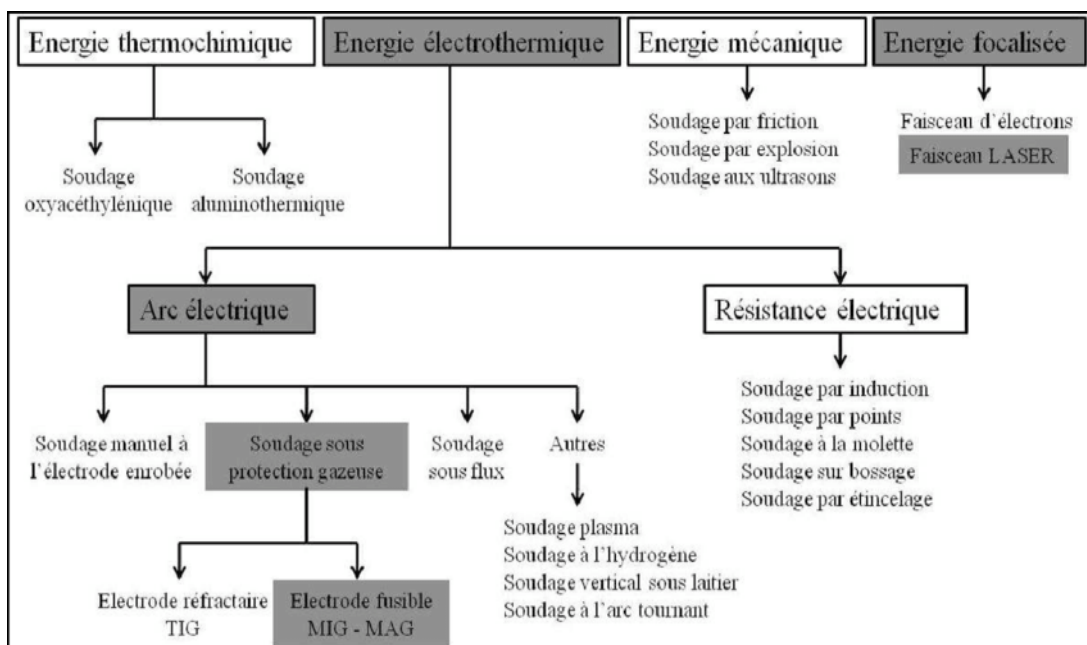


Figure 1 : classification des procédés de soudage

Le soudage par fusion est un procédé d'assemblage permanent qui consiste à faire fondre les bords des pièces à souder, avec ou sans ajout de métal d'apport, afin de créer une liaison homogène après solidification.

la profondeur de la soudure sur la largeur, et sur les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure.

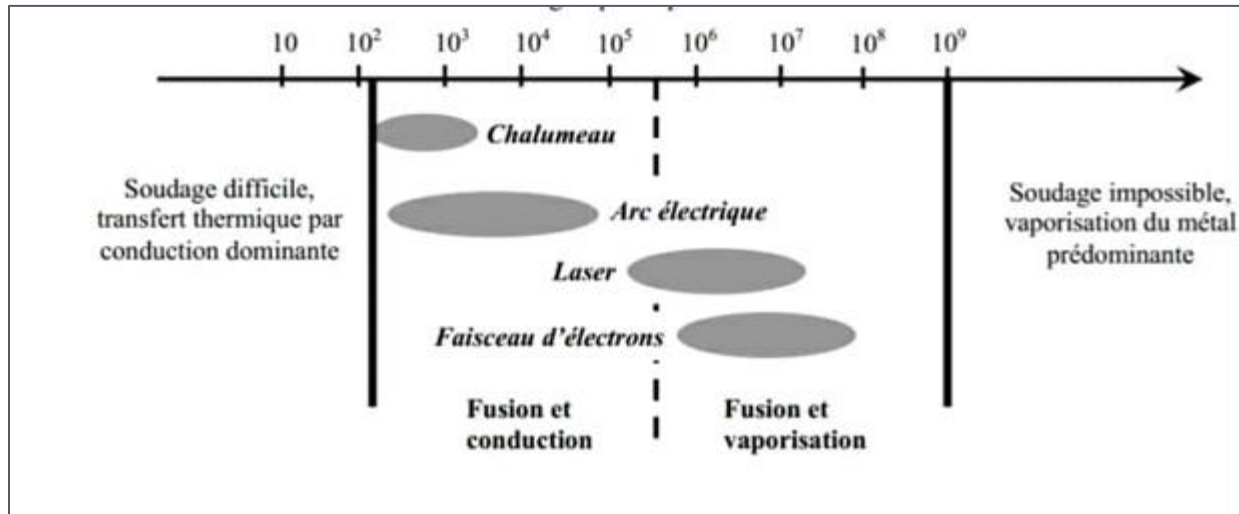


Figure 2 : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion

4. Procédé de soudage MIG-MAG :

Le soudage MIG-MAG (Metal Inert Gas – Metal Active Gas), également connu sous le nom de GMAW (Gas Metal Arc Welding), est un procédé de soudage à l'arc largement répandu dans les applications industrielles modernes [1]. Il repose sur la création d'un arc électrique entre une électrode fusible, sous forme de fil métallique continu, et la pièce à assembler. La chaleur générée par cet arc provoque la fusion simultanée du métal d'apport et du métal de base, assurant ainsi une liaison solide après solidification [2]. Le fil est introduit automatiquement à travers la buse du chalumeau, ce qui permet un soudage semi-automatique ou entièrement automatisé, réduisant les temps d'arrêt et augmentant la productivité. Un gaz de protection entoure la zone de soudage pour empêcher l'oxydation et préserver la qualité du joint. Selon la nature du gaz utilisé, on distingue deux variantes : Le procédé MIG, qui utilise un gaz inerte (argon, hélium) et convient particulièrement aux métaux non ferreux comme l'aluminium, le cuivre ou l'inox. Le procédé MAG, qui emploie un gaz actif ou un mélange (comme argon + CO₂), est plus adapté aux aciers au carbone et aciers faiblement alliés [3]. La formation de l'arc résulte du déplacement des électrons à travers une colonne de gaz ionisé (plasma), et le mode de transfert du métal peut se faire par court-circuit, projection ou pulvérisation. Ce procédé est particulièrement

efficace pour le soudage des tôles de faible à moyenne épaisseur (1 à 15 mm), dans toutes les positions, et se prête bien à des secteurs comme l'industrie automobile, la construction métallique, la chaudronnerie, et la fabrication de structures lourdes [4]. Malgré ses nombreux avantages tels que la rapidité, la facilité d'automatisation et la qualité des assemblages, le procédé MIG-MAG présente aussi quelques limites, notamment une sensibilité accrue aux courants d'air, une production de fumées métalliques, ainsi qu'une précision légèrement inférieure au procédé TIG pour les soudures délicates [5]. Les applications industrielles du procédé MIG-MAG :

Industrie automobile : Assemblage des carrosseries et châssis, réparations précises.
Construction métallique : Ponts, charpentes, structures longues. Industrie navale : Coques de navires, toutes positions. Industrie ferroviaire : Wagons, rails, maintenance. Fabrication de machines industrielles : Structures de machines, éléments sous pression. Aéronautique (modérément) : Éléments non critiques en aluminium ou inox [6]



Figure 3 : soudure par arc

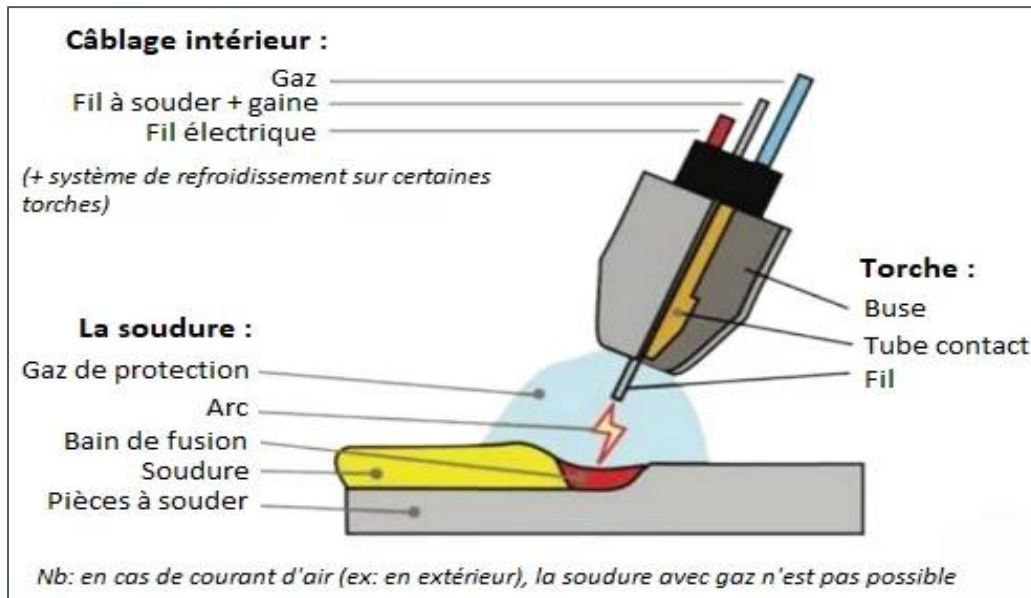


Figure 4 : Représentation du soudage Mig-Mag

5. Soudage manuel oxyacétylénique :

Le soudage oxyacétylénique est un procédé utilisant la chaleur d'une flamme obtenue par la combustion de l'acétylène (C_2H_2) avec l'oxygène (O_2). La température peut atteindre $3200\text{ }^\circ\text{C}$ [1]. L'équilibre du mélange gazeux est essentiel pour éviter une oxydation excessive. Le métal d'apport,

Le métal d'apport ;

(baguette de $\varnothing 0,8\text{ mm}$ à $\varnothing 4,0\text{ mm}$) est amené manuellement dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion (Cordon de soudure après refroidissement). 6

6. Soudage manuel oxyacétylénique :

Une installation de soudage comprend : Une source d'oxygène, une source d'acétylène, des détendeurs, des systèmes de sécurité (dispositifs anti-retour), un chalumeau.

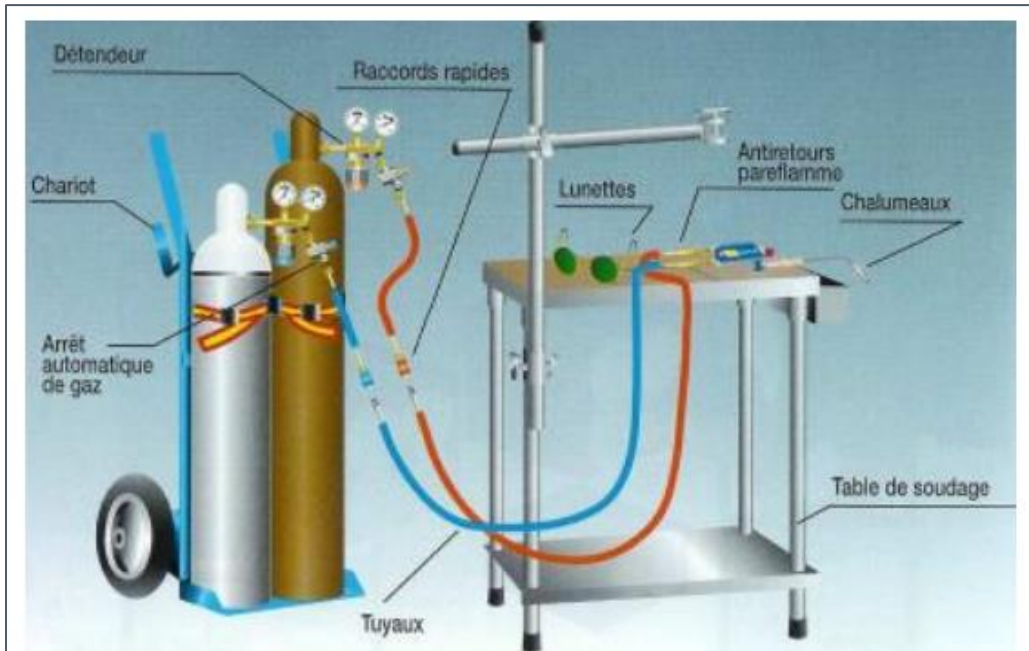


Figure 5 : soudage oxyacétylénique

Soudage manuel à l'électrode enrobée (SMAW) Ce procédé repose sur l'arc électrique entre une électrode enrobée et la pièce à souder. L'enrobage fond avec le fil d'acier au cœur, créant un laitier à enlever après solidification. La tension est faible (15–35 V) mais l'intensité peut atteindre 500 A [2]. Ce type de soudage est largement utilisé mais requiert une grande compétence manuelle.

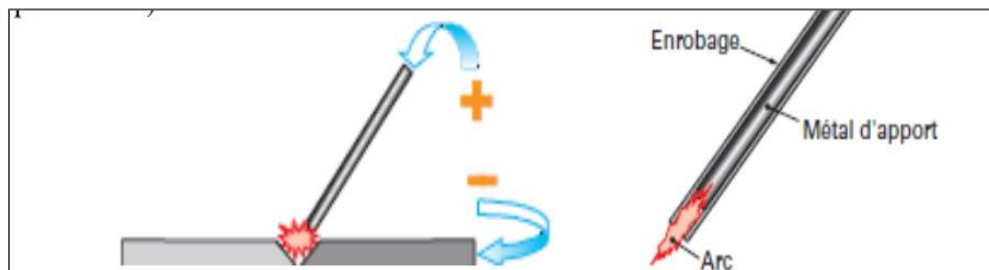


Figure 6 : soudage par plasma

7. Soudage sous flux en poudre (SAW) :

Ce procédé entièrement automatisé utilise une électrode de fil nu et un flux en poudre qui protège le bain de fusion. Le fil est alimenté automatiquement par un moteur, et la tête de soudage se déplace sur le joint [3].

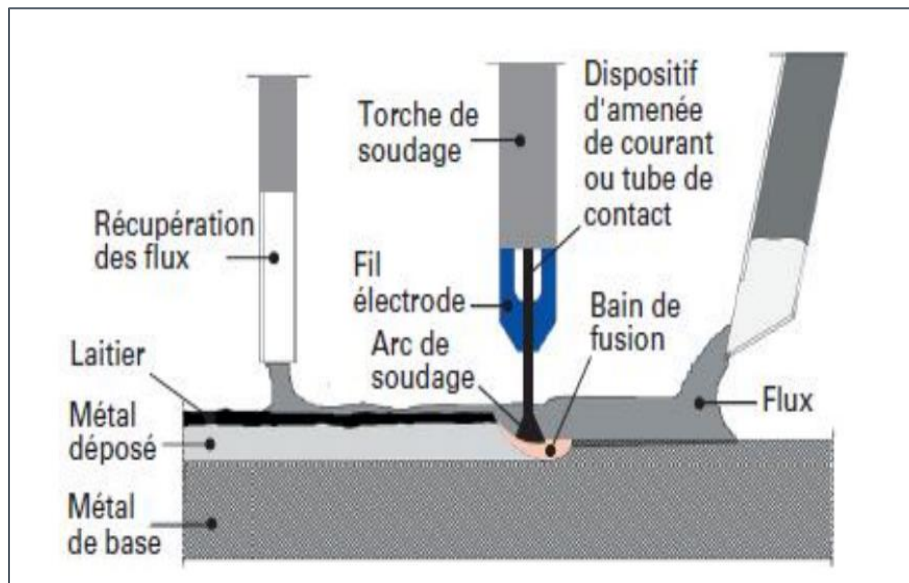


Figure 7 : principe de soudage à l'arc submergé

8. soudage par friction malaxage (FSW) :

Développé en 1991 par Wayne Thomas au TWI, le FSW permet de souder sans fusion des matériaux comme l'aluminium. Il utilise un outil rotatif non consommable qui génère de la chaleur par friction, ramollissant le matériau [4]. Ce procédé est reconnu pour sa qualité et sa faible distorsion, avec des applications dans l'aéronautique, le ferroviaire et le naval. Des recherches visent à améliorer les outils pour des matériaux plus durs comme l'acier ou le titane [5]

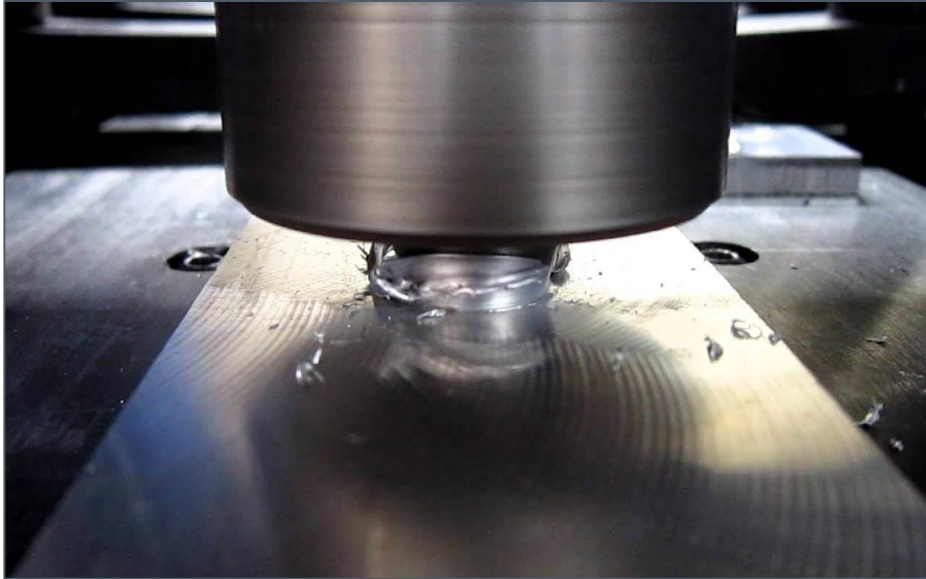


Figure 8 : soudage par friction-malaxage

9. Soudage laser :

Ce procédé thermique repose sur un faisceau laser focalisé qui fond les pièces à souder. Il offre des soudures profondes et précises avec une faible zone affectée thermiquement [6]. Il est utilisé dans des secteurs de haute exigence comme l'automobile, l'électronique ou la médecine. Le mode "keyhole" permet une soudure profonde, tandis que les lasers à fibre ont rendu ce procédé plus efficace et économique [7]

Principe du soudage laser :

le faisceau est dirigé via des miroirs ou fibres optiques vers une tête de soudage où il est focalisé. La chaleur générée est très localisée, avec des densités de puissance atteignant 10^5 à 10^7 W/cm² [8]

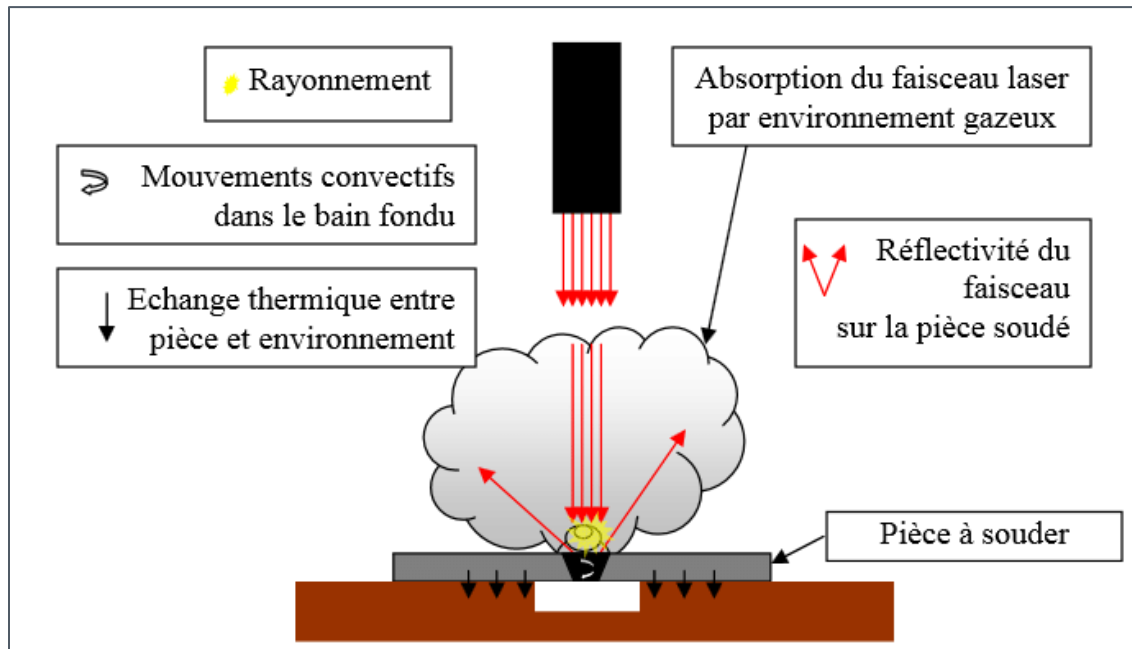


Figure 9 : Phénomènes physiques lors du soudage laser

10. Le soudage TIG (Tungstène Inert Gas ou GTAW):

utilise une électrode en tungstène non fusible et un gaz inerte (argon, hélium ou mélange) pour créer un arc électrique, qui chauffe la pièce à souder. Le métal d'apport, comme affiche la figure facultatif, est ajouté manuellement si nécessaire [1][2][4] et Le soudage à l'arc sous gaz tungstène (GTAW) est un procédé qui permet de fondre et d'assembler les métaux en les chauffant à l'aide d'un arc établi entre une électrode en tungstène non consommable et les métaux [1]. La torche qui maintient l'électrode en tungstène est connectée à une bouteille de gaz de protection ainsi qu'à une borne du poste à souder, comme illustré [2]. L'électrode en tungstène est généralement en contact avec un tube en cuivre refroidi par eau, appelé tube de contact, qui est connecté au câble de soudage depuis la borne [3]. Cela permet au courant de soudage provenant du poste à souder de pénétrer dans l'électrode et de refroidir celle-ci afin d'éviter toute surchauffe [4]. La pièce est connectée à l'autre borne du poste à souder par un autre câble [5]. Le gaz de protection traverse le corps de la torche et est dirigé par une buse vers le bain de fusion pour le protéger de l'air [6]. La protection contre l'air est bien meilleure en soudage GTAW qu'en soudage SMAW, car un gaz inerte tel que l'argon ou l'hélium est généralement utilisé comme gaz de protection et que le gaz de protection est dirigé vers le bain de fusion [7].

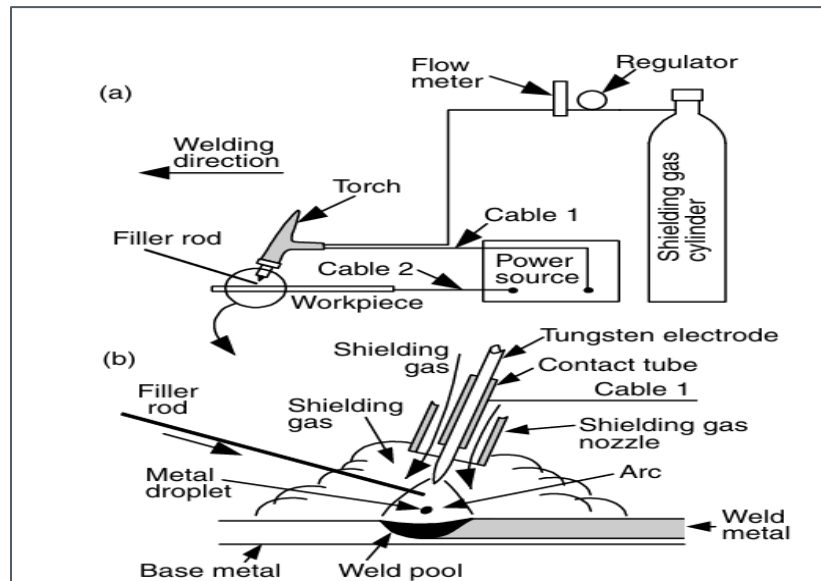


Figure 10 : Soudage à l'arc gaz-tungstène : (a) processus global ; (b) zone de soudage agrandie.

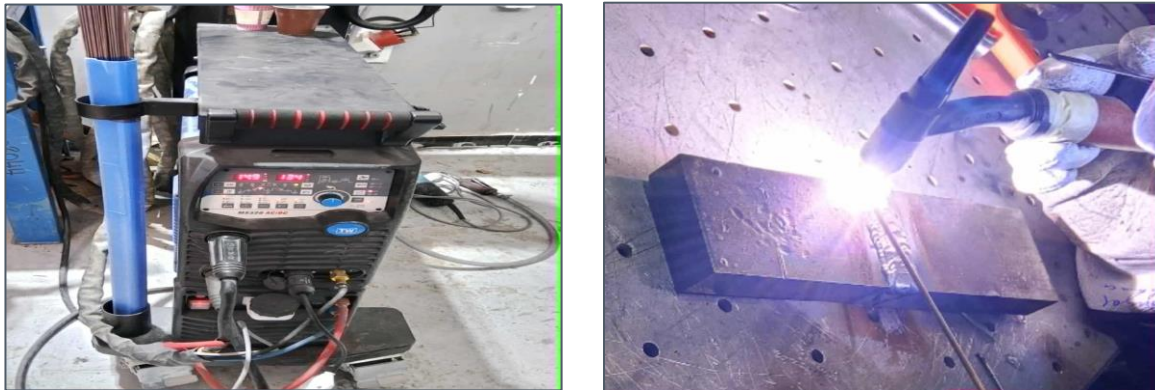


Figure 11 : procédé soudage TIG

Le but du chapitre I :

Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude détaillée des différents procédés de soudage utilisés dans l'industrie. Il commence par rappeler l'origine et le principe général du soudage, avant d'examiner les procédés les plus couramment employés, tels que le MIG-MAG, le soudage manuel oxyacétylénique, le soudage sous flux en poudre (SAW), le soudage par friction malaxage (FSW), le soudage laser et le soudage TIG. Cette analyse vise à comprendre le fonctionnement, les avantages, les inconvénients et les domaines

d'application de chaque procédé, afin de permettre une meilleure sélection en fonction des besoins techniques et des matériaux à assembler.

Conclusion

les différentes méthodes utilisées pour la mise en forme des matériaux métalliques, le soudage occupe une place de choix. En effet, une grande majorité des objets fabriqués que nous utilisons quotidiennement font appel à des techniques d'assemblage par soudage. Maîtriser ces techniques permet d'optimiser les coûts de production et d'en améliorer l'efficacité. L'objectif principal de ce chapitre est d'offrir un aperçu global des procédés de soudage appliqués aux matériaux métalliques. Il commence par une classification succincte de ces procédés, suivie de la présentation de divers types de soudage en fonction des usages spécifiques. Les procédés de soudage ne cessent d'évoluer, tant sur le plan technologique que dans la diversité de leurs domaines d'application.

CHAPITRE II

Les défauts de soudure

Introduction :

La majorité des discontinuités apparaissent au niveau des joints soudés ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Les soudures présentent souvent des porosités, des soufflures, des inclusions solides (scories, impuretés), ou encore des fissures. Parmi ces défauts, les fissures sont les plus critiques. Contrairement aux porosités et aux inclusions pour lesquelles des tolérances peuvent être admises, les fissures restent totalement inacceptables dans les assemblages soudés. Il convient de distinguer une fissure d'une cassure : cette dernière résulte généralement de contraintes excessives, d'un mauvais design ou de la fatigue, tandis que la fissure ici est causée par des phénomènes de solidification, de refroidissement rapide ou par les tensions internes dues au retrait du joint pendant le soudage [1]. Les défauts de soudage sont généralement inhérents aux procédés utilisés, influencés par : des conditions d'exécution inadéquates (pression, durée, surcharge...) ; la qualité du métal de base et/ou du métal d'apport ; la propreté des zones à souder ; et le choix du procédé lui-même. --- Définition d'un défaut de soudure Une discontinuité géométrique, affectant la répartition des contraintes dans l'assemblage, peut être considérée comme un défaut, car elle introduit une rupture dans la continuité mécanique de la structure. Une définition possible d'un défaut est :

« Accident géométrique autre que ceux inhérents aux cordons de soudure proprement dits » [2].

Un cordon de soudure de qualité doit présenter les caractéristiques suivantes : un profil légèrement convexe ; une surface régulière et lisse ; des stries uniformément réparties ; une bonne fusion latérale avec le métal de base. --- I. Facteurs de défaillance des assemblages soudés 1. Facteurs technologiques Ils sont liés aux conditions de réalisation des soudures. L'Institut International de la Soudure classe les défauts comme suit [3] : Fissures Cavités Inclusions solides Manques de fusion ou de pénétration Défauts de forme Autres défauts Les fissures proviennent souvent des effets thermo-mécaniques. Les cavités peuvent être causées par la contraction du métal ou par la présence de gaz. Les inclusions solides résultent de la présence de laitier ou de particules étrangères. 2. Facteurs métallurgiques Les cycles thermiques du soudage modifient localement la structure et les propriétés mécaniques de la zone affectée. Les altérations comprennent [4][5][6] : L'adoucissement La trempe Le vieillissement La surchauffe La structure de solidification 3. Facteurs mécaniques Ils sont souvent dus à des erreurs de conception (et non d'exécution). La géométrie du cordon influence fortement la concentration des contraintes, en particulier au pied du cordon. Un mauvais dimensionnement peut entraîner une fragilisation localisée de la soudure [7]. --- II. Principaux défauts de soudure 1.

Inclusions gazeuses Causées par la présence de gaz issus de réactions chimiques, d'humidité ou de matériaux d'apport inappropriés. Prévention : Utiliser des aciers calmés Employer des électrodes certifiées Sécher les pièces et les électrodes (400 °C pour séchage, 100 °C pour stockage avant usage) 2. Inclusions solides Ce sont des particules (laitier, scories) coincées dans le joint, notamment entre deux passes ou à l'intersection de soudures. Prévention : Nettoyage entre les passes Choix d'électrodes adaptées à l'épaisseur de la pièce 3. Soufflures Ce sont des cavités sphériques dues à des gaz emprisonnés. Les soufflures débouchantes à la surface sont appelées piqûres.

1. Principes de détection des défauts :

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative. Évoque bien le rôle qui joue le CND dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, nous avons l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et, les défauts internes, Défauts internes Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de pièce moulée, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle, dans l'industrie des métaux il peut s'agir par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office nous utiliserons l'un ou l'autre des grands procédés du CND.

2. Défauts de surface

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes Défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puis- qu'il s'agit des criques, fissures et craquelures généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault).

Défauts d'aspect correspondent à une variation de paramètre géométriques ou physiques qui rend le produit inutilisable (rugosité, taches diverses).

Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

3. Caractéristiques des défauts

Un nombre quelconque de défauts peut être positionné dans tout le volume d'une pièce quelconque (géométrie complexe ou canonique, homogène ou hétérogène). Ces défauts sont

de différents types Réflecteurs étalons : trou génératrice, trou à fond plat et trou à fond hémisphérique, sphère

- Défauts plans, de taille et d'orientation quelconque
- Défauts multi-facettes et défauts à contour
- Inclusions (de forme cylindrique ou elliptique) : défauts constitués d'un matériau solide,

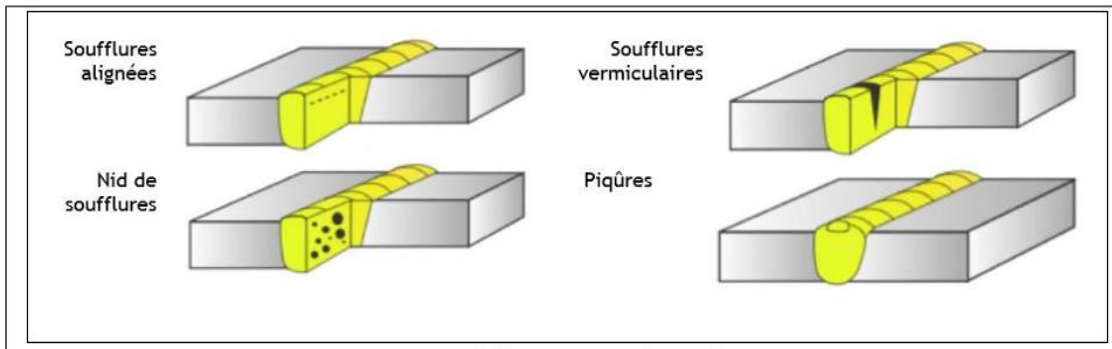


Figure 12 : Les différents types de soufflure.

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder. Pour les prévenir, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

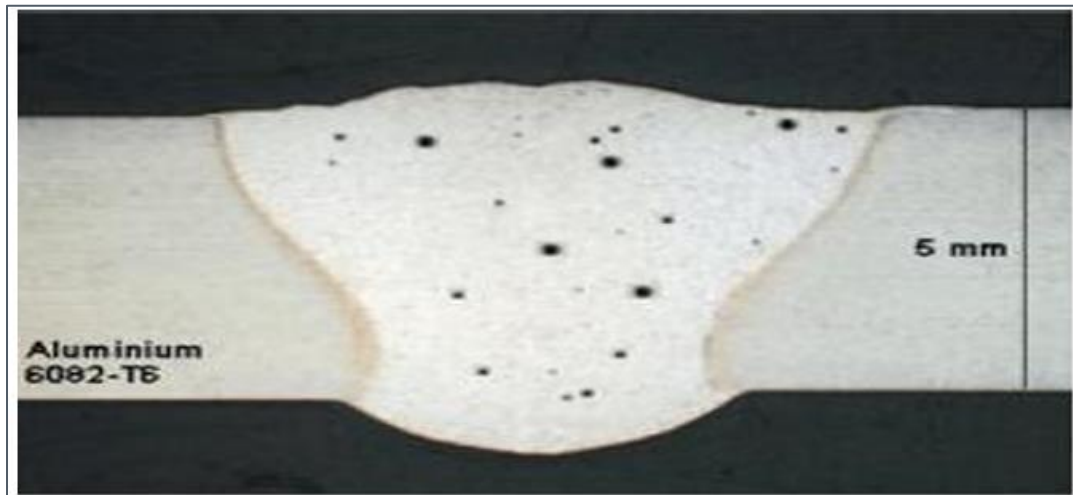


Figure13 : Exemple de soufflures.

4. Défauts de fusion (collage) :

Elles sont causées par une intensité très faible du courant de soudure ; vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal, Et L'angle d'inclinaison de l'électrode est incorrect. Pour

les éviter, il faut faire un choix judicieux de l'intensité du courant et la vitesse d'avancement de

l'électrode. En plus L'angle de l'électrode doit permettre l'établissement de l'arc avec les parois

du joint.

5. Localisations possibles des manques de fusion :

Des manques de fusion peuvent apparaître.

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

- Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé.

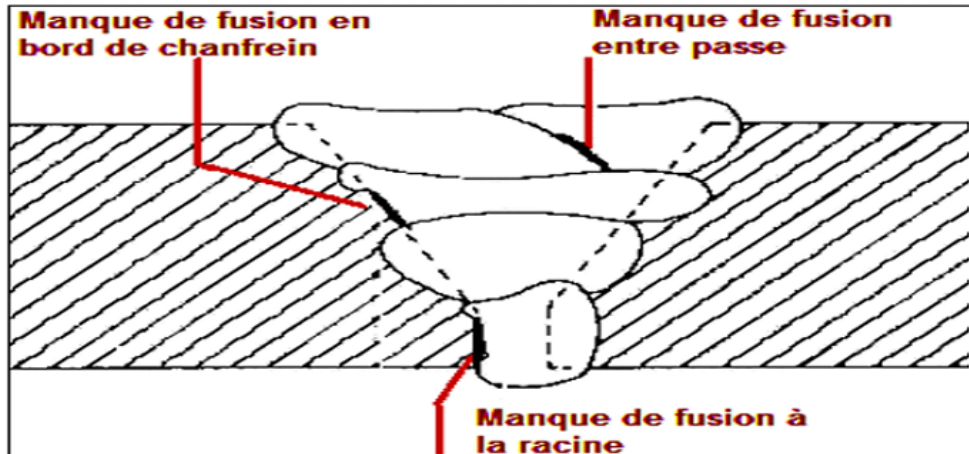


Figure 14 : Localisations possibles des manques de fusion.

Manque de fusion dans le flanc de la soudure :

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure

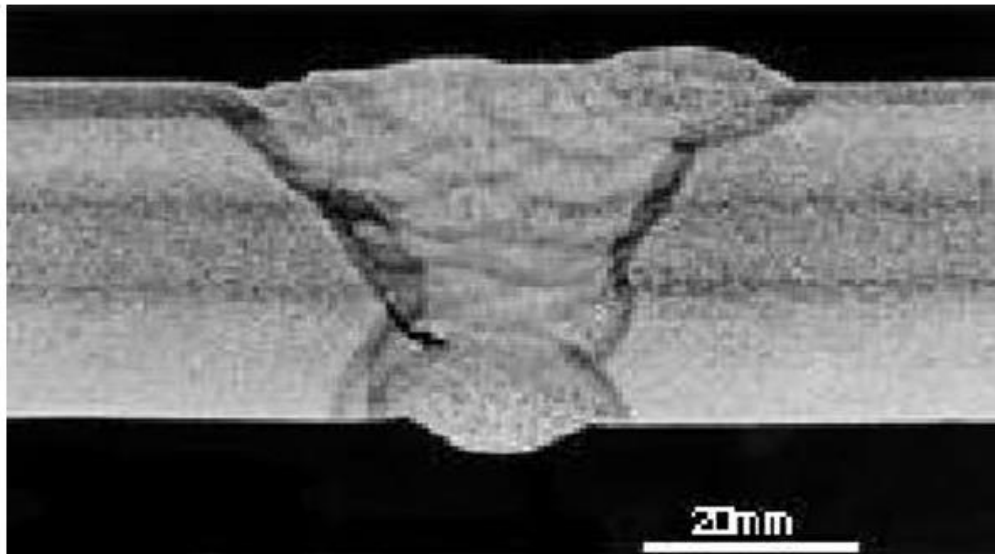


Figure 15 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

Causes possibles :

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

Mesures préventives :

- Qualification de la procédure pour vérifier la fusion
- Eventuellement modifier l'angle d'inclinaison de l'électrode ou la position de soudage
- Nettoyer suffisamment les bords à souder
- Diminuer une inductance trop élevée dans le soudage MAG, même si les projections sur le métal de base deviennent plus nombreuses. **Manque de fusion entre passes** : Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Figure. II.5)

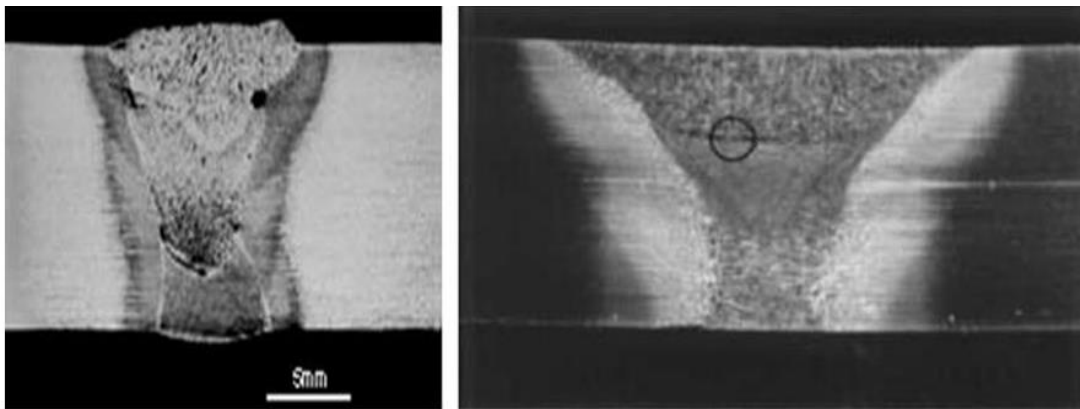


Figure 16 : Manque de fusion entre passes.

Manque de fusion à la racine de la soudure : Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration (Figure. 15).

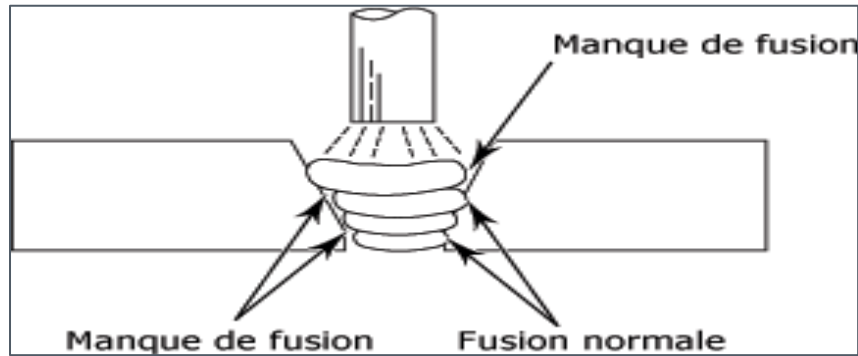
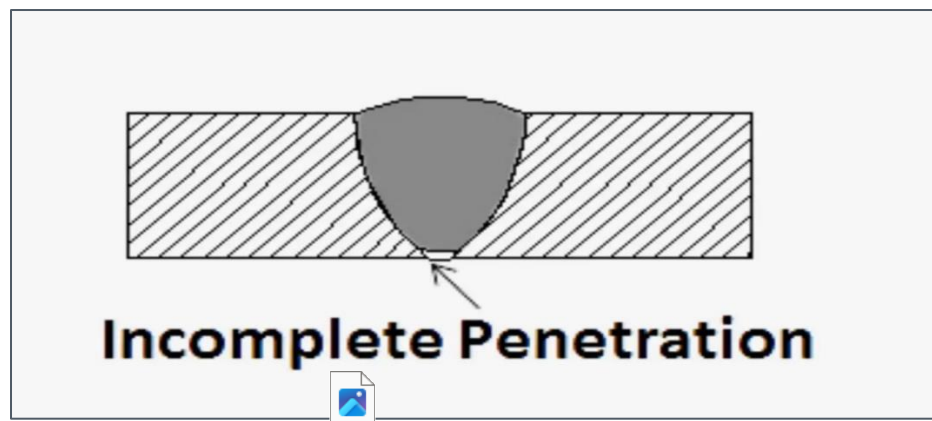


Figure 17 : Manque de fusion à la racine de la soudure.

6. Défauts de pénétration :

Ils surviennent lorsque le métal ne remplit pas correctement la base des chanfreins. Cela peut être provoqué par l'emploi d'une électrode trop large, une intensité de soudage trop faible ou une mauvaise préparation des éléments à assembler.

Pour éviter ce type de défaut, il est important de régler convenablement l'intensité du courant, de maîtriser la vitesse de soudage, et de s'assurer que les pièces sont préparées en tenant compte des exigences du procédé



incomplete-penetration-defect-in-welding-1536x864.webp

Figure 18 : Défaut manque de pénétration.

6.1 Fissurations :

Les fissures, c'est-à-dire les fractures planes dans la soudure ou le métal de base, sont sans aucun doute les défauts de soudage les plus indésirables. À la fois internes et externes, ces imperfections résultent d'une rupture localisée provoquée par les pressions et le refroidissement, ainsi que de la contraction et du développement du grain dans la zone affectée thermiquement (ZAT) lors de la solidification. Leur géométrie provoque des

concentrations de contraintes près de la pointe de la fissure, ce qui rend la soudure sujette à la fracture. Les fissures de soudure peuvent être de différentes tailles, formes et types, notamment :

- Longitudinal
- Transversal
- Cratère
- Rayonnant
- Branchement

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

6.2 Fissures à chaud

Celles-ci se produisent lors de la solidification et de la cristallisation des joints soudés. A ce stade, la température dépasse souvent 10,000 XNUMX degrés Celsius. Il peut s'agir soit de fissures de solidification, soit de fissures de liquation. Le premier se produit lorsque le métal contient une teneur élevée en impuretés ou en carbone ou en cas de perturbation du flux de chaleur. D'un autre côté, des fissures de liquéfaction se produisent en raison de l'augmentation de la température de chauffage. Cela provoque la liquéfaction de constituants à bas points de fusion.

6.3 Fissures froides

Ce sont des défauts de fissuration « retardés » qui se développent après la solidification du métal fondu. Ils peuvent se produire plusieurs jours après la fin du soudage. Ces types de fissures sont souvent parallèles à la limite de fusion. La contrainte de traction résiduelle peut également entraîner la croissance des fissures à l'écart de la limite de fusion. Les fissures à froid se produisent principalement en raison d'un manque de préchauffage, de contraintes élevées, d'une basse température, d'une teneur élevée en hydrogène, d'une structure de matériau sensible, etc.

6.4 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).

7. Les fissures longitudinales

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure. Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous.

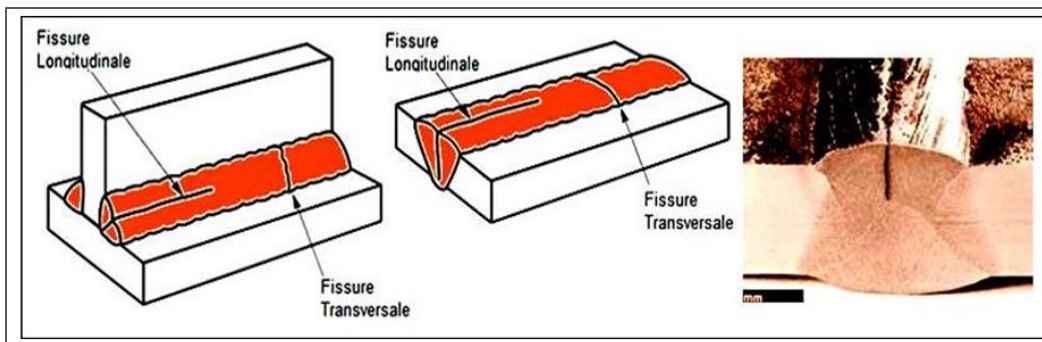


Figure19 : La fissure longitudinale.

Les fissures transversales : Sont perpendiculaires à l'axe de la soudure. Celles-ci peuvent être limitées en taille et contenues entièrement dans le métal de soudure ou bien se propager dans la zone adjacente affectée par la chaleur puis dans le métal de base à partir du métal de soudure. Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant

sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal.

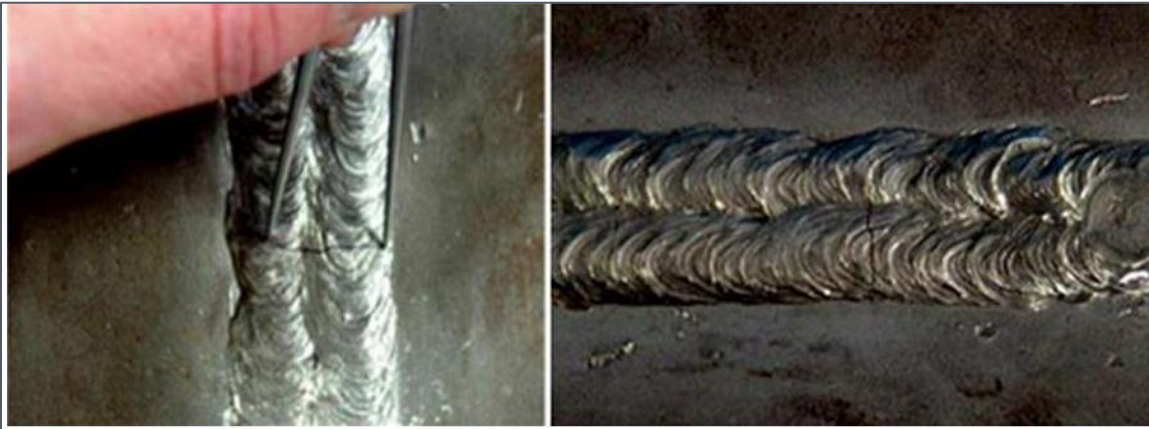


Figure 20 : La fissure transversale.

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

7.1 Fissures à chaud

Celles-ci se produisent lors de la solidification et de la cristallisation des joints soudés. A ce stade, la température dépasse souvent 10,000 XNUMX degrés Celsius. Il peut s'agir soit de fissures de solidification, soit de fissures de liquation. Le premier se produit lorsque le métal contient une teneur élevée en impuretés ou en carbone ou en cas de perturbation du flux de chaleur. D'un autre côté, des fissures de liquéfaction se produisent en raison de l'augmentation de la température de chauffage. Cela provoque la liquéfaction de constituants à bas points de fusion.

7.2 Fissures froides

Ce sont des défauts de fissuration « retardés » qui se développent après la solidification du métal fondu. Ils peuvent se produire plusieurs jours après la fin du soudage. Ces types de fissures sont souvent parallèles à la limite de fusion. La contrainte de traction résiduelle peut également entraîner la croissance des fissures à l'écart de la limite de fusion. Les fissures à froid se produisent principalement en raison d'un manque de préchauffage, de contraintes élevées, d'une basse température, d'une teneur élevée en hydrogène, d'une structure de matériau sensible, etc.

7.3 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).

7.4 Prévention des fissures de soudure

- Utiliser des matériaux d'apport et des procédés de soudage compatibles, garantissant des surfaces de métal de base et d'apport propres.
- Utilisez la bonne vitesse et le bon courant de soudage.
- Préchauffer le métal de base et réduire la vitesse de refroidissement du joint.
- Utilisez le mélange approprié de soufre et de carbone.
- Réduisez l'écart entre les joints de soudure.
- Maintenez le bon rapport profondeur/largeur du cordon de soudure.
- Évitez l'hydrogène comme gaz de protection pour les métaux ferreux.

8. Fissures de Cratère :

Les cratères sont des fissures en forme de cratère qui suivent généralement l'arc se terminant près de l'extrémité d'un cordon de soudure, se produisant généralement après le processus de soudage mais avant que le joint de soudure ne soit entièrement formé. Cela se produit souvent en raison d'un remplissage incorrect du cratère avant la rupture de l'arc. Cela conduit à un refroidissement plus rapide des bords extérieurs que du cratère. Un

volume insuffisant de la soudure peut l'empêcher de surmonter le retrait du métal. En conséquence, un défaut de fissure en cratère se forme dans le processus de soudage.



Figure 20 : Cratère

8.1 Causes du cratère

- Mauvais remplissage du cratère.
- Angle de torche incorrect.
- Mauvais choix de technique de soudage.
- Arrêt brutal du processus de soudage, armature inadéquate.

8.2 Prévention des cratères

- Veiller au bon remplissage du cratère.
- Utilisez un angle de torche approprié pour réduire les contraintes sur le métal. L'angle de la torche pour le soudage au fil doit être compris entre 10 et 15 degrés dans la direction de la soudure. D'autre part, vous devez maintenir un angle de 20 à 30 degrés (dans le sens de l'entraînement) pour le soudage à la baguette. Avec une soudure d'angle, maintenez le fil ou la tige à 45 degrés entre les pièces métalliques.
- Utilisez une petite électrode.
- Réduisez progressivement le courant de soudage avant de terminer l'arc.
- Choisissez la bonne technique de soudage

9. Aspect Visuel :

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

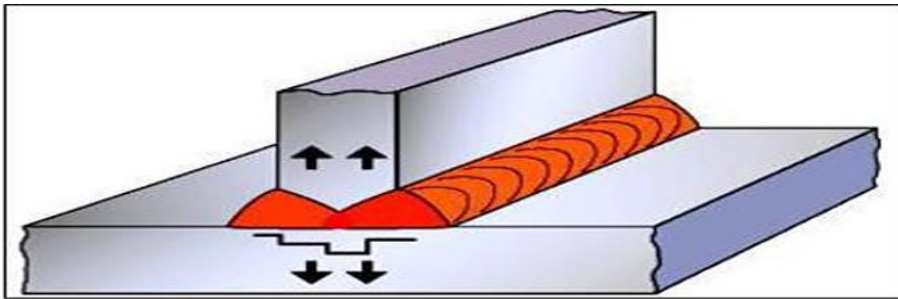


Figure 21 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.

Les cause :

- Il est généralement reconnu qu'il y a trois conditions qui doivent être présentes pour que l'arrachement lamellaire se produise :
- Tension dans le sens de l'épaisseur : les tensions de soudage doivent agir dans la direction la plus courte de la tôle (il à travers l'épaisseur de la tôle)
- Orientation de la soudure : la zone de fusion sera parallèle au plan des inclusions
- Susceptibilité du matériau : la tôle doit avoir une faible ductilité dans le sens de l'épaisseur Donc, le risque d'arrachement lamellaire sera plus grand si les tensions générées par soudage agissent dans le sens de l'épaisseur.
- Le risque augmentera aussi avec l'augmentation du niveau d'hydrogène du métal déposé.
- Facteurs à considérer pour réduire le risque d'arrachement : Le choix du matériau, de la configuration du joint, du procédé de soudage, des consommables, ainsi que le préchauffage, et le beurrage peuvent aider à réduire le risque d'arrachement [15].

Le but du chapitre II :

Ce chapitre a pour objectif d'examiner en détail les différents types de défauts pouvant apparaître lors des opérations de soudage. Il commence par les principes de détection, puis décrit les défauts visibles en surface, ainsi que les défauts internes tels que les manques de fusion, les défauts de pénétration et les fissurations. Une attention particulière est accordée aux fissures (à chaud, à froid, longitudinales, de cratère), à leurs causes, leurs localisations possibles et aux moyens de prévention. À travers cette étude, le chapitre vise à sensibiliser aux risques liés aux défauts de soudure, à améliorer la qualité des assemblages soudés, et à orienter les choix technologiques vers des procédés plus fiables.

Conclusion

La fissuration résulte généralement de tensions internes trop importantes dans le cordon de soudure ou dans la zone chauffée durant le soudage (ZTA). Les fissures peuvent apparaître très tôt (fissuration à chaud) ou des heures, voire des jours après le soudage (fissuration à froid). Les causes les plus fréquentes de fissuration sont un refroidissement trop rapide, un métal d'apport incompatible avec le métal de base ou une mauvaise préparation des joints. En plus des fissures, il existe plusieurs types de défauts de soudure : les défauts dimensionnels (mauvaise dimension du cordon sur la largeur ou sur l'épaisseur), les défauts de géométrie du cordon, les défauts de pénétration, les soufflures, les inclusions, les caniveaux, les retassures, les projections et les défauts de fusion. Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.

CHAPITRE III

Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif

Introduction:

Les techniques de contrôle non destructif (CND) représentent un ensemble de méthodes permettant d'examiner l'intégrité et les propriétés des matériaux et des structures sans entraîner de dommages permanents. Elles jouent un rôle crucial dans la prévention des défaillances, la sécurité des installations et l'optimisation des processus industriels dans des domaines tels que l'aéronautique, l'énergie, l'automobile et le génie civil [1].

Les méthodes de CND s'appuient sur des phénomènes physiques variés — tels que la propagation des ondes ultrasonores, les interactions électromagnétiques et l'absorption des rayonnements — afin de détecter et de caractériser les discontinuités internes ou superficielles des composants inspectés [2]. Grâce à leur capacité à fournir des informations fiables sur l'état des matériaux, elles permettent d'éviter les coûts liés aux réparations ou aux arrêts non planifiés, tout en minimisant les risques de défaillances catastrophiques [3].

La compréhension des principes fondamentaux des techniques de CND constitue ainsi un préalable indispensable pour les professionnels de l'inspection et de la maintenance. Dans ce contexte, cette section se propose de présenter les concepts généraux du CND, en abordant les méthodes courantes, leurs avantages et les principales applications industrielles.

1. Historique des techniques de CND

Les premières méthodes de contrôle non destructif remontent au début du XX^e siècle, avec l'utilisation des rayons X pour inspecter les soudures et les pièces moulées dans l'industrie métallurgique [4]. À partir des années 1940, le développement des techniques ultrasonores et de magnétoscopie a marqué une étape importante, permettant une détection plus précise des discontinuités internes [5].

Au fil des décennies, les techniques de CND ont évolué pour s'adapter aux exigences croissantes des industries modernes, avec l'apparition de méthodes avancées telles que les courants de Foucault, les émissions acoustiques et l'imagerie par thermographie infrarouge [6]. Aujourd'hui, le CND constitue un domaine en constante innovation, intégrant les technologies numériques et l'intelligence artificielle pour améliorer la précision et l'efficacité des inspections.

2. Définition et l'intérêt du contrôle non destructif (CND) :

CND est un ensemble des méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer qu'elle taille de défaut est acceptable de façon empirique à la casse (destruction) ensuite pouvoir les détecter sans détruire la pièce. Nous parlons aussi d'essais non destructifs ou d'examen non destructifs (END), ce qu'évoquent plutôt les examens en laboratoire que la qualité industrielle. En ce sens, le CND apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité et de la santé de produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est la détection et la mise en évidence des hétérogénéités, anomalies et défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et plus généralement la conformité d'un produit à l'usage qu'il est destiné, plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce, [6].

3. Principe du contrôle

Le but principal du CND est de déterminer la qualité ou l'état de la soudure avec l'intention de l'accepter ou de la rejeter en fonction de normes ou cahiers des charges. Les principaux défauts que les CND doivent déceler appartiennent à l'une des classes suivantes :

Les principaux défauts que les CND doivent déceler appartiennent à l'une des classes suivantes :

- Défauts d'étanchéité.
- Défauts d'étanchéité.
- Défauts de continuité.
- Défauts de continuité.
- Défauts de résistance mécanique
- Défauts de résistance mécanique.

Dans tout CND nous pouvons détecter les cinq étapes suivantes :

La mise en œuvre d'un processus physique. La mise en œuvre d'un processus physique.

L'altération de ce processus par le défaut. L'altération de ce processus par le défaut.

La révélation de cette variation par un détecteur approprié. La révélation de cette variation par un détecteur approprié.

Un émetteur de flux. Un émetteur de flux.

Un récepteur ou détecteur, ou détecteur,[7].

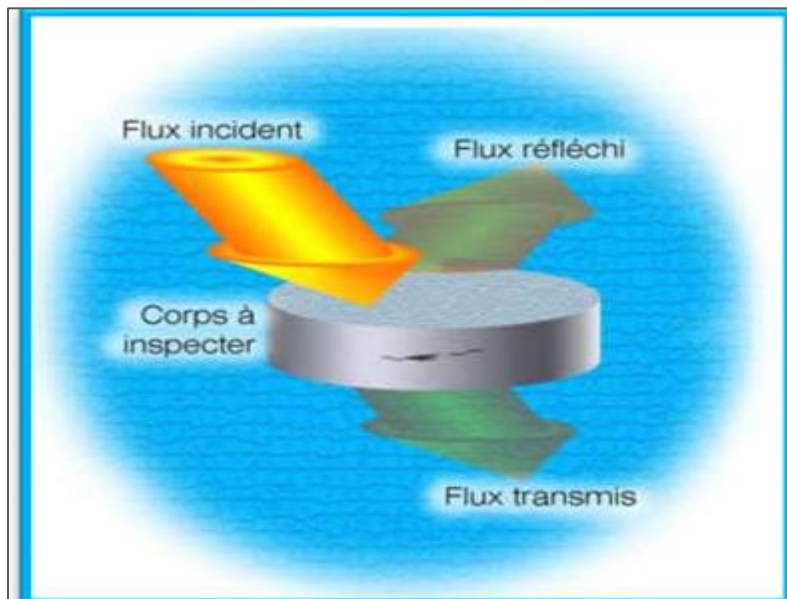


Figure 22 : Interaction d'un flux lumineux avec la matière

4. But de Contrôle Non Destructif et de Contrôle Non Destructif

objectif comme son nom l'indique de contrôler l'état des pièces industriel les sens pour que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la le deuxième cas, il s'agit en général de défauts. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux son nom 5l'indique de contrôler l'état des pièces industriel les sens pour que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future.

Ceci peut correspondre à deux types de contrôles :

l'estimation d'un paramètre constitutif de la le deuxième cas, il s'agit en général de défauts. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les Le CND a pour objectif comme sens pour que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future.

Rapidité d'exécution :

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

Coût Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

Reproductibilité :

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

Fiabilité Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tout Les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

Sensibilité :

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurant. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurant sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

Résolution:

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution. Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis, [8].

5. Principes de détection des défauts :

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative.

Évoque bien le rôle qui joue le CND dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, nous avons l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface et, les défauts internes,[9].

5.1 Défauts internes :

Il s'agit de tous les défauts localisés dans le volume du corps à contrôler qu'il s'agisse de pièce moulée, forgées, laminées ou soudées. Leur nomenclature est spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle, dans l'industrie des métaux il peut s'agir par exemple de porosité, de soufflures ou d'inclusions. Pour ce type de défauts le contrôle visuel est exclu d'office nous utiliserons l'un ou l'autre des grands procédés du CND.

5.2 Défauts de surface :

Accessible à l'observateur direct mais pas toujours visible à l'œil nu, ils peuvent se classer en deux catégories distinctes Défauts ponctuels correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique puis- qu'il s'agit des criques, fissures et craquelures généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Les méthodes de contrôle non destructif les plus sensibles sont les mieux adaptées pour ce type de défauts (ressuage, magnétoscopie, courants de Foucault). Défauts d'aspect correspondent à une variation de paramètre géométriques ou physiques qui rend le produit inutilisable (rugosité, taches diverses). Pour ce type de défauts le contrôle visuel est possible mais on cherche à le remplacer par des contrôles optiques automatiques, [9].

6. Caractéristiques des défauts :

Un nombre quelconque de défauts peut être positionné dans tout le volume d'une pièce quelconque (géométrie complexe ou canonique, homogène ou hétérogène).

Ces défauts sont de différents types Réflecteurs étalons : trou génératrice, trou à fond plat et trou à fond hémisphérique, sphère

; Défauts plans, de taille et d'orientation quelconque ;

Défauts multi-facettes et défauts à contour ;

Inclusions (de forme cylindrique ou elliptique) : défauts constitués d'un matériau solide, [6].

Procédure du CND L'opération du CND d'un objet ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts.

En effet, même si le choix du procédé de la méthode est du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, enfin archivage des résultats et des conditions d'examen, [10]

7. Principes de détection des défauts. Différentes techniques du(CND) :

7.1 Hétérogénéités et défauts :

Le terme défaut est ambigu, relatif et peu précis, mais sa connotation négative évoque bien le rôle que joue le contrôle non destructif dans la recherche de la qualité. En fait, détecter un défaut dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriété physique ou chimique préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Cela dit, on a l'habitude de classer les défauts en deux grandes catégories liées à leur emplacement : les défauts de surface, les défauts internes [21] Les défauts surfaciques :

Ces défauts sont accessibles à l'observateur directement mais pas toujours visibles à l'œil nu, à cet effet on peut les classés en deux types distincts :

- Les défauts ponctuels

Correspond aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques,

piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (de l'ordre de quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes sensibles et non destructives, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.

7.2 Les défauts d'aspect :

C'est à dire à des plages dans lesquelles une variation des paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche souvent à le remplacer par des contrôles optiques automatiques [21].

7.3 Les défauts internes :

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du (CND) que sont la radiographie, le sondage ultrasonore ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, l'holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie [21].

8. Principe de la détection d'un défaut :

Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée [9]

mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;

modulation ou altération de ce processus par les défauts ;

détection de ces modifications par un capteur approprié ;

traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée. Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...)

9. Différentes techniques de CND :

Les méthodes CND utilisées couramment sont : les procédés optiques, le ressuage, la radiologie, les ultrasons, l'émission acoustique, le procédé par courants de Foucault). La diversité des pièces à inspecter, leurs géométries, leurs matériaux et les conditions d'inspection interdit à une méthode de CND d'être universelle, [12].

Les techniques non destructives doivent s'adapter aux matériaux que nous souhaitons contrôler. Dans le cas des métaux, et pour un contrôle au sein du métal, il faut exploiter les phénomènes physiques qui permettent de pénétrer dans le métal et sélectionner celui qui permet le mieux de fournir les informations requises par l'utilisateur.

Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière. Nous allons décrire le principe de chacun de ces moyens et faire une analyse succincte donnant une idée sur les possibilités d'emploi de chacune de ces techniques. Chaque environnement industriel impose ces conditions propres et il n'existe donc pas de méthode (universelle) permettant de réaliser le contrôle non destructif dans toutes les conditions au meilleur rendement, [Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière.

Nous allons décrire le principe de chacun de ces moyens et faire une analyse succincte donnant une idée sur les possibilités d'emploi de chacune de ces techniques. Chaque environnement industriel impose ces conditions propres et il n'existe donc pas de méthode (universelle) permettant de réaliser le contrôle non destructif dans toutes les conditions au meilleur rendement, [7].

Chaque environnement industriel impose ces conditions propres et il n'existe donc pas de méthode (universelle) permettant de réaliser le contrôle non destructif .

10. Examen visuel :

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle le plus simple et le plus général puisque c'est le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle le plus simple et le plus général puisque c'est le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle le plus simple et le plus général puisque c'est le point final de la majorité des autres procédés non destructifs. L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour les défauts tels que les fissures, les inclusions, et le manque de pénétration dans la soudure. Pour le cas de la soudure on utilise des loupes, des caméras vidéo, des calibres et des règles [12].

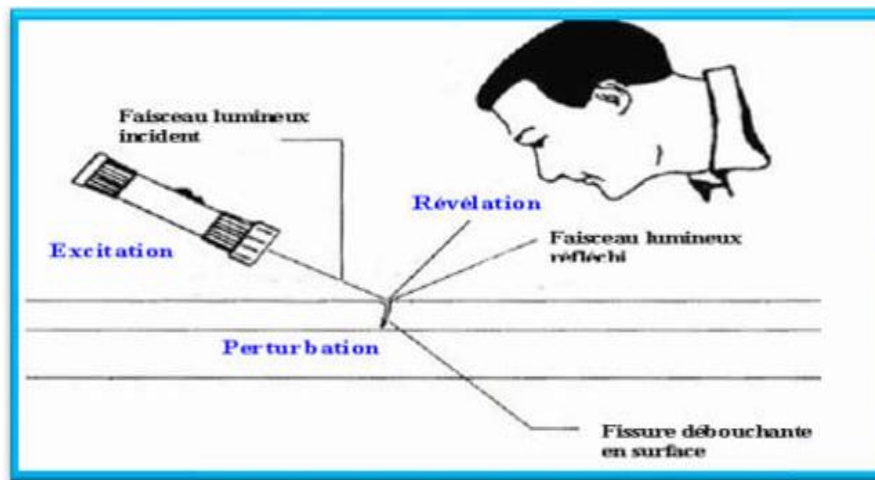


Figure 23 : principe de l'examen visuel

11. Ressuage :

La méthode « huile et poussière de craie », autrefois utilisée par les industries ferroviaires dans les années 1920. Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été ranimé en 1941 par Robert et Joseph Switzer. Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste à l'amélioration de l'inspection visuelle de défauts. Il consiste à l'aspiration du pénétrant par la couche poudreuse du révélateur, le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux quatre phases illustrées sur (Figure.24)

: application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance [16, 19, 22,]

11.1 Contrôle par ressuage

Le contrôle par ressuage est une méthode non destructive permettant de localiser les défauts apparents en surface. Comme les radiographies, il peut être utilisé sur des matériaux non magnétiques tels que l'acier inoxydable, l'aluminium, le magnésium, le tungstène et les plastiques. La méthode par ressuage ne permet pas de détecter les défauts internes.

Pénétrant rouge : La surface à inspecter doit être propre et exempte de graisse, d'huile et d'autres corps étrangers.

On vaporise le pénétrant, qui pénètre dans les fissures et autres irrégularités. L'excédent de pénétrant est essuyé avec un solvant. La pièce est ensuite pulvérisée avec un liquide hautement volatil contenant une fine poudre blanche, appelée révélateur.

L'évaporation du liquide laisse une poudre blanche sèche qui agit comme un papier buvard sur le colorant rouge présent dans les fissures, l'attirant par capillarité, marquant ainsi clairement les défauts en rouge.

Le pénétrant rouge est utilisé sur les réservoirs sous pression et de stockage, ainsi que dans les applications critiques de tuyauterie, pour vérifier la passe de soudure initiale réalisée par le procédé TIG et détecter les microfissures. Il est souvent utilisé pour l'inspection des réacteurs d'avions et des soudures en aluminium, magnésium et acier inoxydable. Il s'agit d'un test par pénétrant pour les défauts apparents. Comme les autres pénétrants, il repose sur la pénétration du défaut par un colorant, l'élimination de l'excédent et le développement de l'indication.

Les petites fissures : apparaissent sur le fond blanc du révélateur. Il localise les fissures, pores, fuites et joints invisibles à l'œil nu. Il les marque clairement et distinctement en rouge, directement sur le matériau.

Fusion incomplète : zone moins dense le long du bord de la soudure.

Pénétration incomplète en passe de racine : Notez la densité plus élevée créée par la fusion sur la soudure CJP sans support.

Contre-dépouille, illustrée par des zones moins denses le long de la pointe de la soudure. Les lignes verticales juste à droite du centre sont les indicateurs de qualité d'image du type fil. Ce film présente de nombreuses autres indications qui peuvent nécessiter un examen plus approfondi. Les points plus clairs correspondent à des zones plus denses et, si l'observation de la soudure révèle qu'il n'y a aucune référence, il pourrait s'agir de rayures sur le film, parfois appelées « reliquats ».

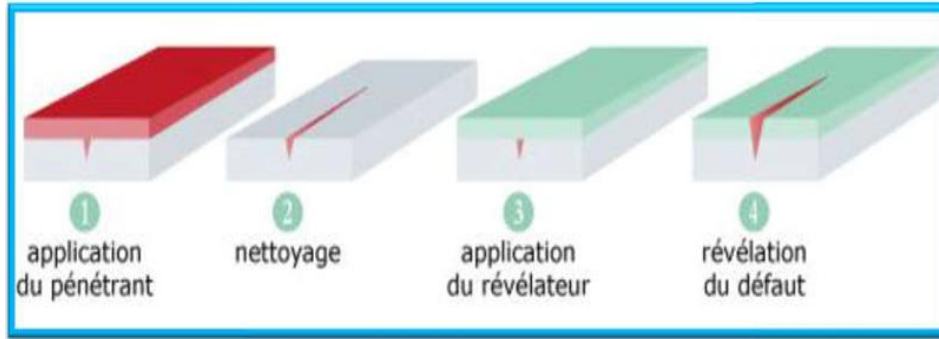


Figure 24 : principe de contrôle par Ressuage.



Figure 25 : Pulvériser à travers le pénétrateur rouge

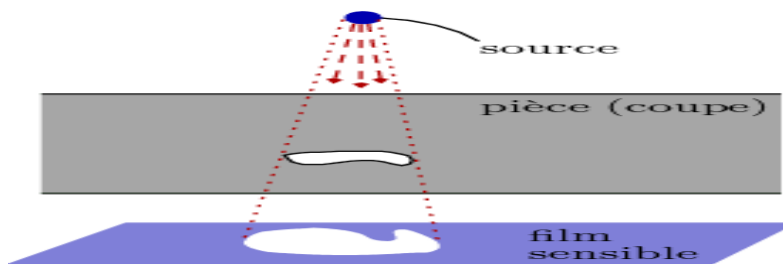


Figure 26 : pénétrant visible comprenant un pénétrant, un révélateur et un nettoyant

12. Radiographie

Les quatre étapes de principe de la méthode de ressuage de la méthode de ressuage. Cette méthode couramment utilisée c radiographie par rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) qu'il s'agit de traverser à l'intérieur d'une pièce et à recueillir le signal atténué sur un film photographique qui convertit ce méthode couramment utilisée comme la plupart des autres techniques de CND la radiographie par rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X de traverser à l'intérieur d'une pièce et à recueillir le signal atténué sur un ui convertit ce rayonnement sous forme d'une image par un récepteur. omme la plupart des autres techniques de CND la radiographie par rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X de traverser à l'intérieur d'une pièce et à recueillir le signal atténué sur un forme d'une image par un récepteur.

13. Ultrasons

13.1 contrôles par ultrasons :

Est réalisé au moyen d'une onde électriquement synchronisée, similaire à une onde sonore, mais de hauteur et de fréquence plus élevées. Le terme « ultrasons » vient du fait que ces fréquences sont supérieures à celles perçues par l'oreille humaine. Les ondes ultrasonores traversent le matériau testé et sont réfléchies par tout changement de densité. Trois types d'ondes sont utilisés : les faisceaux de cisailment (angle), les faisceaux longitudinaux (droits) pour les défauts de surface et sous-jacents, et les ondes de surface pour les cassures et les fissures de surface. Les ondes sont générées par une unité similaire à un amplificateur haute-fidélité, auquel est relié un détecteur. Les signaux réfléchis apparaissent sur un écran sous forme de réflexions verticales de la ligne de base horizontale, ce qui illustre un exemple de joint bout à bout. Le détecteur est appelé

transducteur. Le transducteur contient un dispositif piézoélectrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (son), puis reconvertit cette énergie mécanique (son) en signal électrique. Ce signal électrique peut être affiché sur un tube cathodique (CRT) plus ancien ou sur un écran à cristaux liquides (LCD) plus récent. rasons (US)

Et il consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans un matériau. La présence d'un défaut interne sur le trajet des US provoque la obstacles. Le signal réfléchi est consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans un matériau. La présence d'un défaut interne sur le trajet des réflexion des impulsions à la manière d'un écho sur les obstacles. Le lli par un capteur appelé « transducteur ultrasonore ».

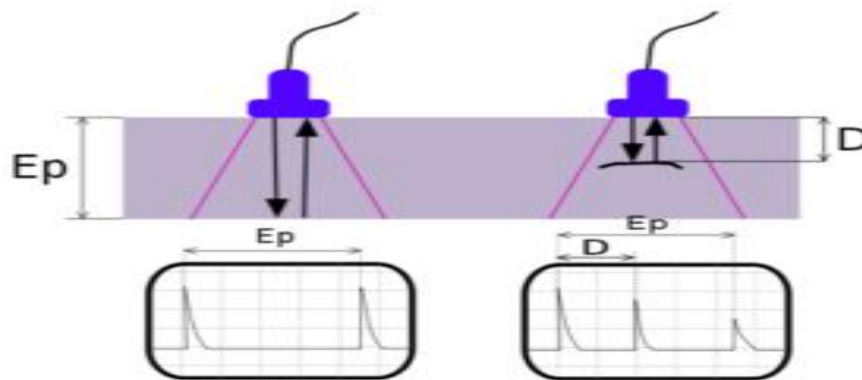


Figure 27 : Principe du contrôle par ultrasons

14. Contrôle par magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie est l'un des contrôles non destructifs les plus simples à utiliser. Il permet d'inspecter les bords des tôles avant soudage afin de détecter les imperfections de surface. Il permet de détecter les défauts de soudure tels que les fissures superficielles, le manque de fusion, la porosité, les contre-dépouilles, la pénétration incomplète des racines et les inclusions de laitier. Cette méthode est limitée aux matériaux magnétiques tels que l'acier et la fonte. Elle ne peut pas être utilisée avec des matériaux non magnétiques et Le contrôle par magnétoscopie détecte la présence de fissures internes et superficielles trop fines pour être visibles à l'œil nu. Les défauts peuvent être détectés jusqu'à une profondeur de 6 à 10 mm sous la surface de la soudure. Des défauts beaucoup plus profonds sont peu probables. La pièce à examiner doit être lisse, propre, sèche et exempte d'huile, d'eau et de laitier excédentaire provenant de l'opération de soudage. Un brossage métallique ou un sablage constituent généralement une préparation satisfaisante pour la plupart des soudures. La pièce est magnétisée par un courant électrique pour créer un champ magnétique. La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité, les lignes

de force du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un “champ de fuite”, appelé également “fuite de flux magnétique”.

La magnétoscopie est utilisée pour détecter des discontinuités de surface, débouchant en surface ou sous-cutanées (dans certaines conditions, jusqu’à quelques millimètres de profondeur), exclusivement sur matériaux ferromagnétiques.

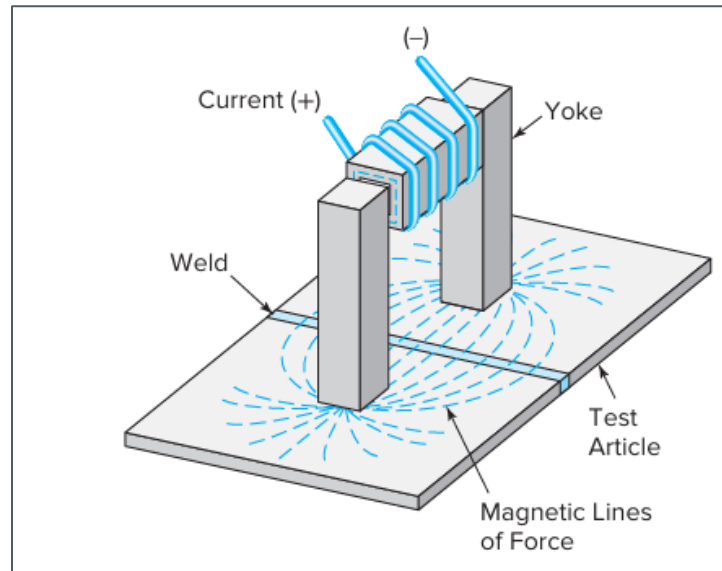


Figure 28 : Principe de contrôle par magnétoscopie.

15. Courants de Foucault :

Les courants de Foucault ce sont des courants induits développés en circuit fermé à l’intérieur d’un objet conducteur placé dans un champ magnétique variable dans le temps. L’examen par les courants de Foucault est basé sur le fait que si une bobine est alimentée par un courant variable et apportée à proximité d’une cible conductrice, génère de tels courants induits qui, créant eux-mêmes un flux magnétique qui s’oppose au flux générateur, modifient ainsi l’impédance de cette bobine. C’est l’analyse de cette variation d’impédance qui fournira les indications exploitables pour un contrôle ; en effet, le trajet, la répartition et l’intensité des courants de Foucault dépendent des caractéristiques physiques et géométriques du corps considéré, ainsi bien entendu que des conditions d’excitation (paramètres électriques et géométriques du bobinage). On conçoit dès lors qu’un défaut, constituant une discontinuité électrique venant perturber la circulation des courants de Foucault, puisse engendrer une variation d’impédance décelable au niveau de la bobine d’excitation [17,20, 23]. La (figure 29) représente le procédé de l’inspection par courants de Foucault.

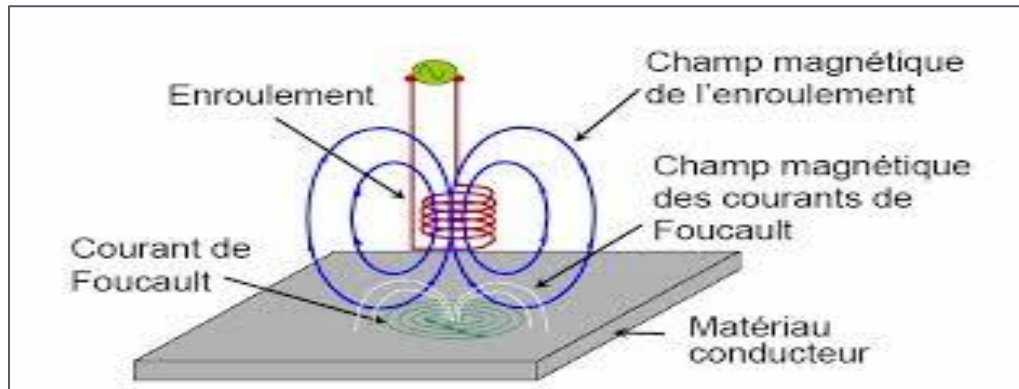


Figure 29 : Inspection par Courants de Foucault

16. Thermographie :

Cette technique consiste à chauffer la surface du matériau inspecté par apport d'énergie (mécanique, air chaud, lampes flash) et à mesurer l'élévation de température résultante avec une caméra infrarouge. L'inspection en thermographie infrarouge peut se faire selon deux approches : la thermographie active et passive. Dans les deux cas, l'investigation consiste à détecter la présence d'un gradient de température qui révèle la présence d'un défaut, gradient qui peut-être provoqué soit par une hausse ou une baisse de température. En thermographie active, le processus de détection nécessite l'apport d'une stimulation thermique extérieure afin de provoquer l'apparition d'un gradient. Par opposition, la thermographie passive n'utilise pas de stimulation extérieure, l'objet ou le défaut à détecter générant un gradient thermique Naturellement. L'approche active comporte principalement trois volets : la stimulation thermique du spécimen, l'acquisition temporelle de la réponse thermique et l'analyse numérique de la réponse (figure.III.12). Les techniques d'inspection par thermographie infrarouge ont été développées et continuent d'être améliorées dans le domaine de la thermographie active. Les trois principales technique sont la thermographie pulsée (TP), elle consiste à générer une impulsion thermique de courte durée. La thermographie modulée (TM) en régime permanent thermique, la température de la surface varie périodiquement avec un module et un déphasage distinct entre les zones saines et les zones défectueuses et la thermographie de phase pulsée (TPP), combinaison entre les deux précédentes technique [18, 20].

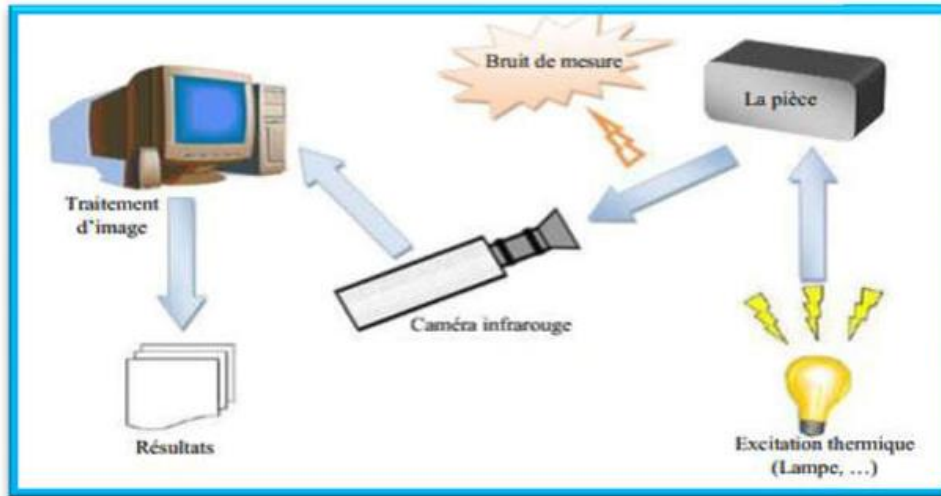


Figure 30 : Inspection par thermographie.

Synthèse comparative des techniques utilisées en CND :

Le tableau 1 : donneun aperçu global des différents procédés les plus utilisés en CND, il englobe le principe physique, les défauts détectés, les domaines d'applications et les principaux avantages et les inconvénients [14].

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes techniques de CND :

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts détectés	Domaines d'application	Points forts	Points faibles
Optiques	Examen visuel direct ou assisté	Vision Perturbation d'une réflexion	Défauts débouchant, fissures, criques, trous	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Souplesse	Productivité, fiabilité
	Contrôle laser			Contrôles automatiques de bandes et tôles	Productivité	Taux élevé de fausses alarmes
	Contrôle TV	Formation d'une image	Défauts d'aspect, taches	Contrôle automatique en fabrication des produits divers	Productivité	Défauts fins
	Interférométrie holographique	Détection de microdéformations provoquées	Délaminations, décollements	Contrôle en atelier de parois non métalliques	Contrôle des composites	Interprétation, productivité
	Thermographie infrarouge	Cartographie de perturbations thermiques	Délaminations hétérogénéités diverses	Contrôle sur site	Cartographie	Caractérisation des défauts
Ressuage	Ressuage	Effet de capillarité	Défauts fins débouchant	Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	Simplicité Faible coût	Productivité, peu quantitatif
Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défauts fins débouchant et sous-cutanés	Produits ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatifs
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchant		Sensibilité Automatisation	Fragilité des sondes
Vibrations mécaniques	Essais statiques	Excitation à une onde, Échographie	Défauts internes Défauts débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux	Grande sensibilité Nombreuses méthodes d'auscultation	Conditions de essai Interprétation des échos. Couplage
	Émission acoustique	Émission provoquée par sollicitation mécanique	Criques Fissures	Parois de gros récipients Structures diverses	Contrôle global avec localisation des défauts	Interprétation Bruits parasites
	Essais dynamiques	Perturbations d'un amortissement Mesure de vitesse	Criques Fissures	Contrôle de pièces moulées	Productivité	Qualitatif
Tests d'étanchéité	Essais hydrostatiques	Détection de bulles	Défauts débouchant dans joints ou parois, zone perméable	Tubes et enceintes en tout matériau	Grande étendue de flux de fuite selon la méthode	Contingences diverses selon la méthode
	Tests avec gaz traceurs (halogènes, hélium)	Détection chimique				
	Détection sonore	Bruit acoustique				

Chapitre III Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif

Flux de fuite magnétique	Magnétoscopie	Accumulation de poudre	Défauts fins débouchant et sous-cutanés	Produits ferromagnétiques (aciers)	Sensibilité	Réservé aux aciers Peu quantitatifs
	Détection de flux de fuite	Distorsion d'un flux magnétique	Défauts fins débouchant		Sensibilité Automatisation	Fragilité des sondes
Electro-magnétiques	Courants de Foucault	Perturbations d'un courant	Défauts fins débouchant	Contrôle en ligne et sur chantier de tout produit métallique	Sensibilité Automatisation	Matériaux non conducteurs Interprétation
	Potentiel électrique	Perturbations d'un courant	Mesure de profondeur de défauts	Tout produit conducteur	Simplicité Faible coût	Contrôle manuel Lent
	Hyperfréquences	Transmission ou réflexion radar	Hétérogénéités diverses	Matériaux peu conducteurs	Contrôle sans contact	Interprétation du signal
Rayonnements ionisants	Radiographie X	Atténuation d'un flux	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tout matériau	Cartographie Souplesse de réglage	Protection Détection des fissures
	Radiographie γ			Contrôle en ligne	Fortes épaisseurs	Profondeur des défauts
	Radioscopie en temps réel				Productivité	Résolution limitée
	Tomographie X			Contrôle de structures non métalliques	Imagerie en coupe	Coût Productivité
	Neutronographie			Rétrodiffusion	Délaminations	Corps hydrogénés
	Diffusion Compton	Contrôle des composites				

Le but du chapitre III :

Ce chapitre a pour objectif de présenter les concepts généraux relatifs aux techniques de Contrôle Non Destructif (CND), en mettant en lumière leur origine, leur principe de fonctionnement, ainsi que leur rôle essentiel dans la détection des défauts sans altérer l'intégrité des pièces inspectées. À travers une étude des différentes méthodes de CND telles que l'examen visuel, le ressuage, la radiographie, les ultrasons, la magnétoscopie, les courants de Foucault et la thermographie, ce chapitre vise à offrir une compréhension globale des moyens disponibles pour assurer la qualité et la fiabilité des soudures et des matériaux, tout en permettant une intervention préventive et corrective efficace.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé brièvement la définition et le but du contrôle non destructif (CND), les différents types de défauts détectés en (CND), le principe de détection d'un éventuel défaut et les bases physiques qui gouvernent les procédés de contrôle. Nous avons ensuite décrit les principes des principales techniques de contrôle non destructif les plus utilisées dans le secteur industriel à savoir : l'examen visuel, le ressuage, les essais ultrasonores, la radiographie, le contrôle par magnétoscopie, la technique des courants de Foucault, la thermographie. Pour chaque technique d'inspection nous avons évoqué les avantages et les inconvénients.

CHAPITRE IV

**Etude expérimentale par les
techniques de CND appliquées
sur le joint soudé**

Introduction :

Quel que soit le procédé de fabrication, pour obtenir des produits de qualité bien définie et constante, il est important non seulement de vérifier que les pièces terminées sont conformes, mais encore de s'assurer, qu'au cours des divers stades de fabrication, les facteurs qui agissent sur la qualité finale sont maintenus dans les normes prévues. N'opérer qu'un contrôle final conduit, en effet, à constater qu'on a produit des pièces non conformes, lorsqu'il est trop tard pour l'éviter. Ceci est particulièrement vrai en soudage, où les facteurs qui agissent sur la qualité sont nombreux et complexes. L'objectif du contrôle est de : Garantir la bonne exécution de l'assemblage des pièces à soudé Il s'applique à :

La prévention des défauts

La détection et localisation des défauts

L'évaluation du degré de gravité des défauts L'acceptation ou le refus de la pièce, suivant l'interprétation des défauts. Le contrôle doit s'exercer à trois moments bien distincts :

Avant soudage

Pendant soudage

Après soudage

Le contrôle après soudage a pour but de vérifier que le joint exécuté est bien conforme aux exigences de la construction. Il portera sur : - La mise en œuvre des contrôles appropriés en conformité avec la réglementation - l'analyse des résultats des divers contrôles effectués - L'instruction des dossiers « constructeurs » ou qualité attestant de la bonne réalisation des fabrications. [24]

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

1. préparation des échantillons :

1.1 Premier échantillon :

1.1.1 Présentation du matériau Acier AISI 1215 :

Le composant étudié est un acier libre-usinable présentant une composition chimique atypique, caractérisée par une teneur importante en soufre (0,649 %) et plomb (0,140 %), ainsi qu'une présence notable de AISI 1215 (2,050 %) et d'autres éléments d'alliage comme le cuivre, le nickel et le cobalt. Cette composition en fait un matériau spécifique, conçu pour l'usinage de précision et le décolletage, et le distingue nettement des aciers ordinaires utilisés en construction mécanique générale

1.1.2 Domaines d'utilisation cet :

acier est principalement utilisé dans la fabrication de petites pièces usinées en grande série, telles que vis, boulons, rondelles, axes et composants de précision, notamment pour les secteurs du décolletage et de l'automobile. Cette étude a permis de caractériser la nature spécifique de l'acier et d'identifier les limites et précautions d'emploi à respecter, tout en soulignant son rôle majeur dans les applications nécessitant un usinage rapide et économique.

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques et chimique de l'acier :

AISI	AFNOR	DIN	JIS
1215	S300	9SMn36	SUM23

Tableau 3: propriétés mécaniques moyennes :

R Mpa N/mm²	Re Mpa N/mm²	A %	Dureté HB
469/590	415/515	10/20	140/190

Tableau 4: composition chimique %

C	Mn	S	P
0,15 Maxi	1,05 Maxi	0,35 Maxi	≤ 0,04 Maxi

1.2 Préparation des éprouvettes :

L'acier AI 1215 est importé par l'atelier chaudronnier MEI – M'sila. Sous forme de tôles fortes d'épaisseur 20 mm, Nous avons prélevé deux plaquettes de 200 mm de longueur et 200 mm de largeur. Chaque plaquette un chanfrein à 30° d'inclinaison pour obtenir un « V » de 60°.

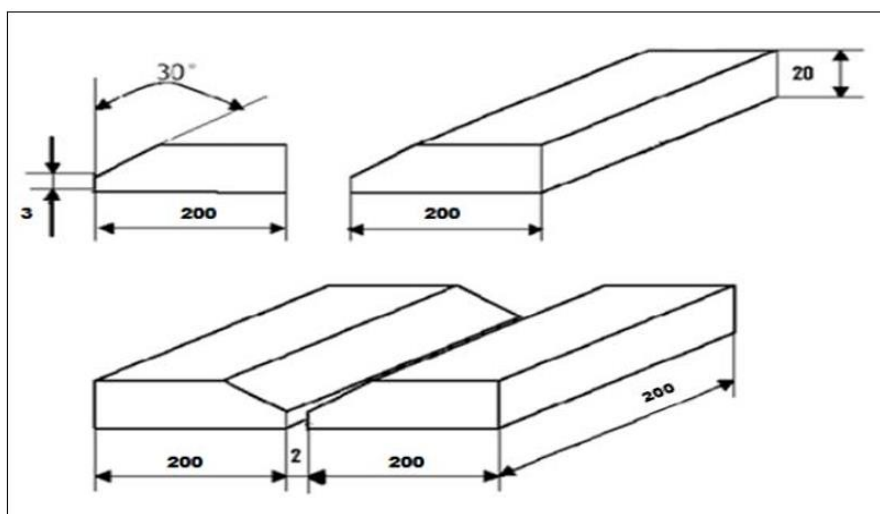


Figure 31 : Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier E33 sous forme de tôles fortes de 20 mm d'épaisseur.

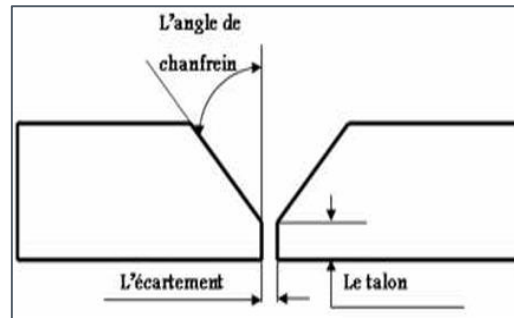


Figure 32 : le croquis du chanfrein



Figure 33 : réalisé par fraisage un chanfrein à 30°

- Ecartement des bords : 4mm
- Angle du chanfrein : 30°
- Talon : 2mm.

2. Présentation du métal d'apport :

Électrode de soudure d'acier au carbone/Rod -- E7018 :

E7018 est une qualité d'outstand que toute l'électrode de soudure de position a couverte de bas type supplémentaire revêtement de potassium d'hydrogène pour souder les aciers à haute limite élastique et les aciers faiblement alliés. Le métal de soudage montre une excellente dureté de basse température et une fente-résistance élevée.

2.1 Domaines d'utilisation :

Il est très utilisé dans des projets importants des bateaux, des chaudières, du haut navire de presse, des ponts, des gratte-ciel, des plates-formes de forage en mer, des centrales nucléaires etc. La cannelure du métal non précieux devrait être loin dégagées les impuretés et l'électrode doit être faite cuire au four à une température à 400 degrés alors soit jugée

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

1-2 hords avant la soudure, 2.5mm qu'un devrait être fait par 350 degrés alors soit tenu pendant 1 heure.

2.2 Le procédé du soudage utilisé :

Le soudage à l'arc sous protection métallique (SMAW), ou soudage à l'électrode enrobée, est une méthode courante pour assembler des tôles. Cette méthode offre une température et une concentration de chaleur élevées, ce qui permet la formation rapide d'un petit bain de fusion. L'ajout de métal d'apport provenant de l'électrode renforce la soudure et augmente sa résistance. Le SMAW peut être réalisé sur presque tous les types de métaux, de 3 mm (1/8 po) d'épaisseur ou plus. Un équipement minimal est requis et peut être portable. Des soudures de haute qualité peuvent être produites de manière constante sur presque tous les types de métaux et dans toutes les positions. La qualité des soudures produites dépend en grande partie de la compétence du soudeur. Développer le niveau de compétence requis nécessite de la pratique. Cependant, répéter les soudures sans changer de technique ne contribuera pas à développer les compétences requises. Chaque soudure terminée doit être évaluée, puis une modification de technique doit être apportée pour améliorer la soudure suivante.

La soudure à l'arc est un procédé de soudure qui consiste à faire fondre les pièces à assembler au moyen d'un arc électrique constitué par une baguette métallique de même composition (électrode). La baguette sert de métal d'apport et fond au fur et à mesure avec les bords de la pièce à souder sous l'effet de l'arc. Il s'en suit une liaison très intime entre les pièces à souder et le métal d'apport.

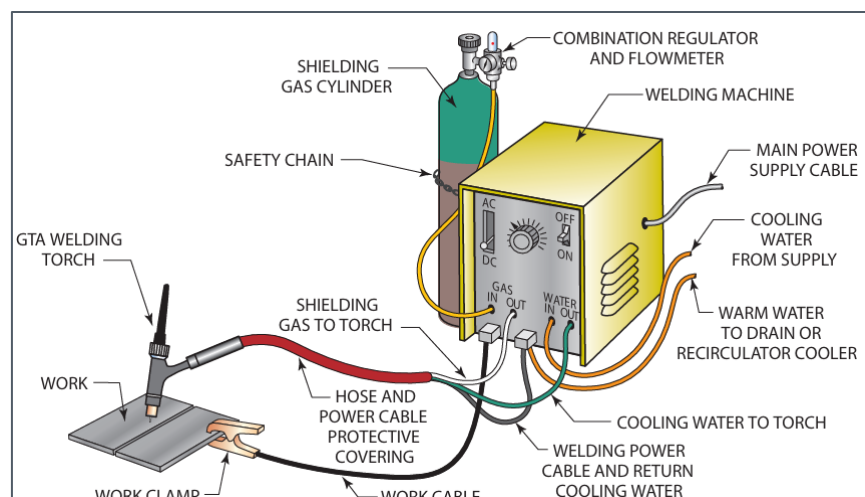


figure 34 : Équipement de soudage à l'arc au tungstène sous gaz.

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

Après le réglage du poste de soudage sur les paramètres calculés et l'exécution de l'opération de soudage.

Compte tenu de l'épaisseur des chantions (20mm), la réalisation du joint soudé a nécessité quatre passes avec l'utilisation des paramètres consignés dans le tableau et qui sont ceux de la fiche techniques de l'entreprise



Figure 35 : Équipement et procédé de soudage MIG/MAG

Les passes	Courant de soudage U (Volt)
1 ^{ère} passe (passe de Pénétration)	Tension U = 22.5V / 75A
2 ^{ème} passe	Tension U = 27 V / 77A
3 ^{ème} passe	Tension U = 28 V / 95A
4 ^{ème} passe (changement de diamètre de paquette d=3.25mm)	Tension U = 32.5 V / 100A
5 ^{ème} passe	Tension U = 37V/ 100A
6 ^{ème} (finition)	Tension U = 37.5 V/100A

Tableau 5 : paramètres de soudage

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

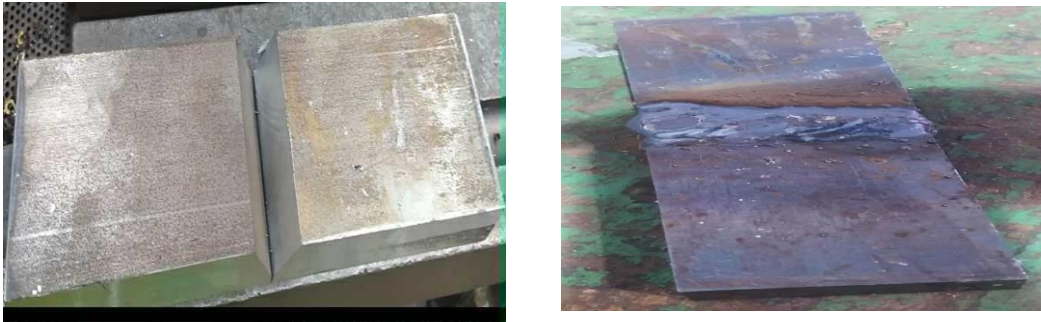


Figure 36 : Forme de l'échantillon avant et après le soudage

3. Contrôle par (CND) :

Dans l'entreprise MEI, il existe trois procédés de contrôle non destructif disponible au service de contrôle de qualité :

- Contrôle par ressuage ;
- Contrôle par ultrason ;
- Contrôle par magnétoscopie ;

3.1 Contrôle par Ressuage.

3.1.1 Mode Opérateur du ressuage :

Contrôle par ressuage : principes et mise en œuvre Le contrôle par ressuage est une méthode destinée à la détection des discontinuités ouvertes en surface, telles que les fissures, porosités ou défauts de soudure. Cette technique repose sur la capillarité, la capacité d'un liquide à pénétrer dans les discontinuités sous l'effet des forces de tension superficielle.

3.1.2 Nettoyage des pièces :

- Nettoyer, dégraisser et sécher les pièces à traiter.

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé



Figure 37 : nettoyage de la pièce.

La surface de la pièce doit être nettoyée soigneusement pour éliminer les souillures (graisse, oxydes, poussière) susceptibles d'empêcher la pénétration du pénétrant. Des solvants ou des procédés mécaniques (brossage, sablage léger) peuvent être utilisés.

3.1.3 Application du pénétrant :

Le liquide pénétrant (souvent de couleur vive ou fluorescent) est appliqué sur la surface. Il est laissé en place pendant un temps de pénétration (ou "dwell time") permettant au liquide de pénétrer dans les défauts ouverts.



Figure 38 : Application du produit ressuage Rouge.

3.1.4 Élimination de l'excédent de pénétrant :

Après le temps de pénétration, l'excédent de pénétrant est éliminé de la surface. Selon le type de pénétrant (lavable à l'eau, éliminable par solvant ou post-émulsionnable), différentes méthodes de nettoyage sont employées. 4. Application du révélateur Le révélateur est ensuite appliqué. Il a pour rôle d'extraire le pénétrant resté dans les défauts par capillarité inverse, ce qui rend les défauts visibles sous forme d'indications contrastées.

3.2 Application de l'agent développant (Révélateur) :

Le révélateur est ensuite appliqué. Il a pour rôle d'extraire le pénétrant resté dans les défauts par capillarité inverse, ce qui rend les défauts visibles sous forme d'indications contrastées

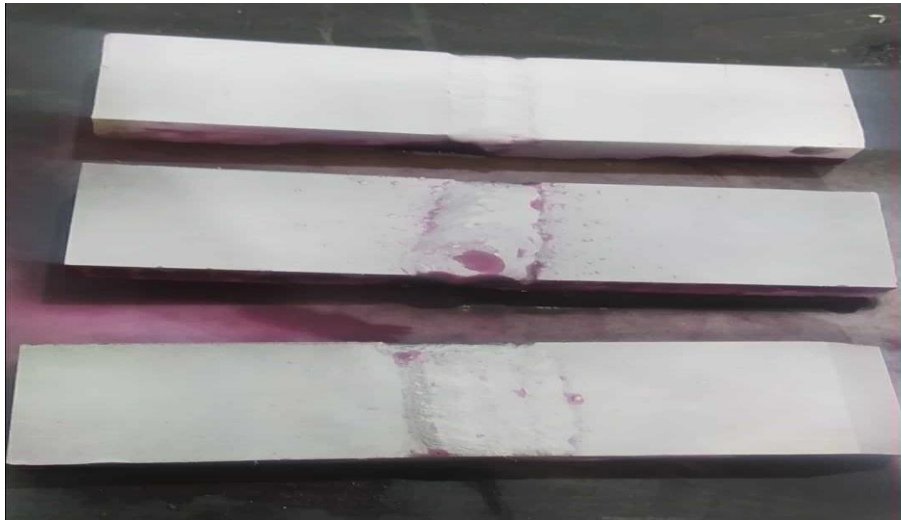


Figure 39 : application du révélateur.

3.2.1 L'Interprétation des Défauts :

Quel que soit le type de ressuage (coloré) les indications qui peuvent être décelées ?

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé



Figure 40 : les défauts détectés dans la pièce après ressuage.

- Cratère avec indication rouge foncé bien marquée (en bas du cordon)
- Indications linéaires rouges de chaque côté du cordon
- Éclaboussures et aspérités autour du cordon



Figure 41 : pièce à contrôle par ressuage.

- Plusieurs indications rondes et rouges bien nettes
- Petite indication linéaire vers la gauche du cordon

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

3.3 Interprétation et évaluation des résultats :

La surface concerné par l'interprétation doit être soigneusement observé lors de L'application du révélateur et les résultats doivent être interprétés de 10 - 60 minutes après l'application du révélateur ou selon les recommandations du fabricant.

Si on n'a pas des résultats au temps écoulé on peut augmenter le temps d'interprétation à condition que la surface à examiner reste humide. Si de fausses indications sont soupçonnées, réexaminer cette partie.

Toutes les indications pertinentes de surface doivent être relevées et évaluées Conformément selon les codes, norme et les spécifications d'acceptation ou spécifications applicables émises par le maître de l'ouvrage.

Un PV de contrôle par ressuage doivent être soigneusement préparé pour contenir toutes les informations relevés sur la surface examinée :

- Nature de la surface examinée
- Numéro d'identification de la pièce
- Matériels utilisés
- Type des produits utilisés : pénétrant, colorant, révélateur, solvant, émulsifiant - Durée de chaque opération - Références et codes - Date d'examen

Résultat d'examen (identification des défauts, qualification, quantification, décision d'acceptation ou de refus).

3.4 Contrôle par magnétoscopie :

Contrôle par magnétoscopie : Ce procédé permet de mettre en évidence des défauts débouchant ou se situant à faible profondeur.

3.4.1 Principe :

La méthode consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction du produit. Si la pièce est homogène, une poudre magnétique déposée à sa surface se répand uniformément. Par contre, à l'endroit d'un défaut, les lignes de force du champ magnétique sont déviées et on constate, à cet endroit, une concentration de poudre. La

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

poudre est constituée de particules de fer ou d'oxydes métalliques de couleur noire et brune. Elle est utilisée soit sèche, soit en suspension dans un liquide. L'aimantation de la pièce peut être obtenue de deux manières différentes :

- Par passage d'un courant électrique dans la pièce (faible tension, forte intensité). Le courant alternatif révèle surtout les défauts de surface alors que le courant continu décèle les défauts sous-jacents - En plongeant la pièce dans un champ magnétique en la plaçant entre deux pôles d'un électro aimant ou si sa forme l'exige, en déplaçant un électroaimant le long de la zone à contrôler .

3.4.2 Mise en œuvre :

La technique nécessite trois étapes pour sa mise en œuvre

3.4.5 L'excitation :

La pièce, préalablement recouverte d'un produit magnétique détecteur, est soumise à une Aimantation suivant des conditions d'orientation et d'intensité du champ magnétique adaptées à sa nature et son profil.



Figure 42 : Procédé de contrôle par magnétoscopie

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

3.4.3 La perturbation :

Sous l'action du champ magnétique exciteur, la pièce est parcourue par des lignes d'induction dont certaines quittent le contour géométrique pour donner naissance localement à un champ de fuite dans l'air, soit en raison des changements de section, soit en raison des discontinuités présentes en surface

3.4.4 La révélation :

Les fortes variations de l'induction se comportent comme un ensemble de petits aimants pouvant attirer les fines particules magnétiques contenues dans le révélateur disposé à la surface de la pièce.

L'accumulation des particules et l'observation des spectres donnant des indications permettront, après analyse et interprétation de l'origine des champs de fuite, de conclure à la présence ou à l'absence de défaut préjudiciable à l'emploi.

La phase d'interprétation est l'une des plus critiques dans le processus : on met en évidence à ce stade des discontinuités d'origine électromagnétique mais il reste à préciser par l'expérience

l'origine de ces discontinuités et, juger éventuellement du caractère nocif de l'anomalie détectée, pour l'utilisation ultérieure de la pièce.



Figure 43 : Contrôle par magnétoscopie.

la fissure longitudinale :

Une fissure longitudinale est une fissure qui se forme parallèlement à l'axe du cordon de soudure, dans la même direction que le joint soudé. Elle peut apparaître en surface ou à l'intérieur du cordon.

Où apparaît-elle ?

:Au centre du cordon de soudure (zone de solidification rapide). Sur la surface du cordon ou à l'intérieur (fissure de surface ou interne).

3.5 Contrôle par ultrasons :

3.5.1 Définition :

L'ultrason est une onde mécanique et élastique, qui se propage au travers de supports fluides, solides, gazeux ou liquides. La gamme de fréquences des ultrasons se situe entre 20 000 et 10 000 000 Hertz, trop élevées pour être perçues par l'oreille humaine. Le contrôle par ultrason est appliqué aux fabrications, aux demi-produits et éventuellement aux produits finis, en petite ou grande série, il est capable de mettre en évidence les défauts en préservant l'intégrité des produits contrôlés.

3.5.2 Émission et réception des ultrasons :

L'émission doit se faire par impulsions pour que la réception puisse être effectuée entre deux impulsions. Pour cela un appareil à ultrason est utilisé, qui permet de visualiser sur un écran, le parcours des ultrasons entre deux impulsions successives. La chaîne de mesure qui englobe les différentes parties d'un appareil doit comporter :

Un élément d'excitation ou de commande : Pour fixer le déroulement du cycle de contrôle, à quel moment émettre et à quel moment écouter (recevoir et évaluer). → Un générateur d'impulsions : Il délivre l'impulsion grâce à laquelle le palpeur sera excité pour engendrer les mécaniques. → Un palpeur (ou des palpeurs) : oscillations Il transforme les impulsions électriques d'excitation en oscillations mécaniques (ultrasons) et, à l'inverse, les oscillations ultrasonores en impulsions électriques. Les palpeurs peuvent être au même temps émetteur-récepteur ou séparés.

Un amplificateur : A la réception, le signal provoqué par l'écho est très faible (0.01V) pour être visualisé sur l'écran, il faut l'amplifier et filtrer, alors l'amplificateur lui associe avec un gain suffisant pour la visualisation.

Un tube cathodique (ou écran de visualisation) : Après le traitement du signal, les résultats sont affichés sur un écran d'un tube cathodique, les distances et les amplitudes des échos sont obtenues grâce à un balayage horizontal et vertical.

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

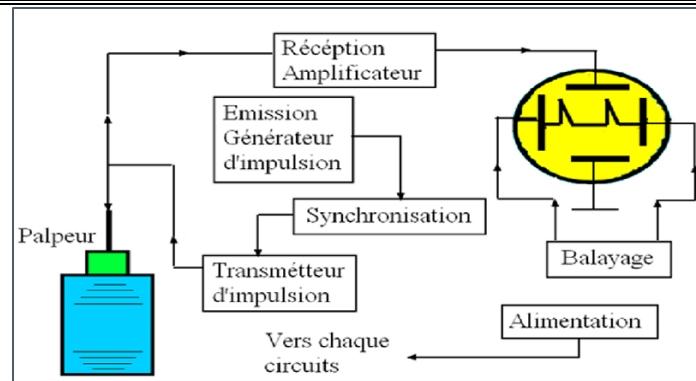


Figure 44 : chaînes de mesure de contrôle par ultrason.

3.5.3 Technologie des palpeurs :

Un palpeur est un dispositif permettant d'émettre et/ou de recevoir des ultrasons. Il est principalement constitué par le transducteur et qui est l'élément piézoélectrique. Un palpeur est constitué principalement de quatre éléments [32] :

La pastille piézoélectrique

L'amortisseur

Les connections électriques

Le boîtier

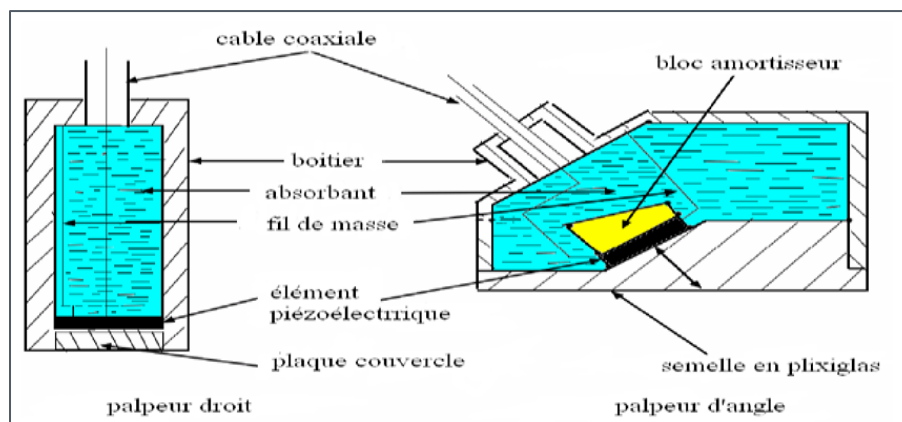


Figure 45 : élément des palpeurs.

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

3.5.4 Choix du palpeur :

Il est guidé par son utilisation

a. Type de palpeur et son élément actif : Selon les modalités du contrôle et le type et l'orientation des défauts recherchés, nous prenons un des palpeurs décrits déjà (palpeur droit, palpeur d'angle) en considérant son fonctionnement en émission et/ou en réception.

b. Choix de la fréquence : La fréquence du palpeur est subordonnée au contrôle à effectuer :

Pour les épaisseurs faibles ou les défauts très fins on utilise les fréquences élevées.

Pour les matériaux à gros grains, on choisit les fréquences faibles pour éviter le phénomène de diffusion.

3.6 Méthodes de contrôle

3.6.1 Méthodes par réflexion ou par écho

En utilisant un appareil ultrasonore contenant un palpeur (E/R) relié avec un tube cathodique muni d'une base de temps, on peut chercher un défaut dans une pièce à contrôler avec un balayage d'une surface par contact.

Le positionnement de l'écho réfléchi par rapport à l'écho émis sur la base de temps peut indiquer sa position par rapport à la surface balayée, et son amplitude comparée avec l'écho émis indique son importance. [1], [2].

Le contrôle par réflexion peut s'effectuer par un simple palpeur ou par un palpeur double

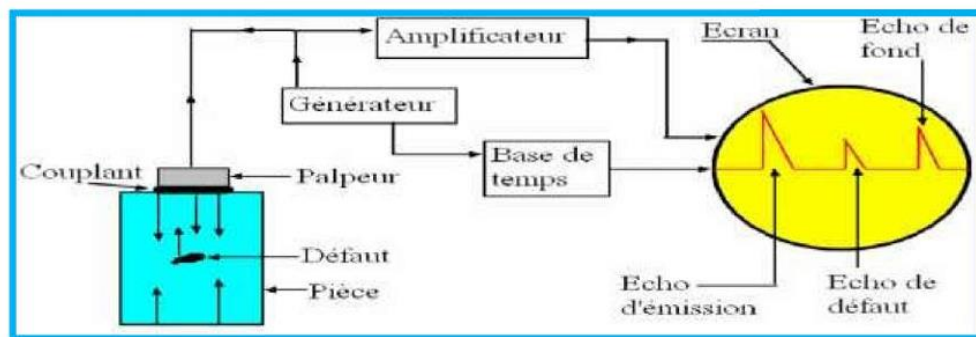


Figure 46 : Méthode de contrôle par réflexion.

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

La visualisation de type A (AScan) : où le défaut est représenté par un écho sur l'écran, c'est une méthode fréquemment utilisée

La visualisation de type B (B Scan) : où une coupe de défaut est visualisée sur un plan (x, y).

La visualisation de type C (C Scan) : où on obtient une image projetée des défauts sur un plan à la surface de sondage, l'image est similaire au cliché en radiographie.

3.6.2 Vérification des appareillages :

Un appareil de contrôle par ultrason doit être vérifié et réglé avant chaque examen à cause de

ses caractéristiques qui peuvent être changées et selon les conditions exigées par l'examen.

3.6.3. Choix du milieu de couplage :

Une matière de couplage doit être existée entre le palpeur et la pièce à contrôler et :

Elle doit avoir de bonnes propriétés de mouillage.

Ses caractéristiques doivent rester constantes de l'étalonnage à la fin de l'examen.

Elle doit être compatible avec la position de travail et la température de la pièce.

Après l'examen, elle doit être éliminée.

Les couplants les plus utilisés :

- Huiles.
- Graisses.
- Pâtes de contact.
- Colles additionnées d'eau.
- Gel thixotropique.
- Eau additionnée ou non d'agent mouillant

3.6.4 Etalonnage et bloc d'étalonnage :

Pour utiliser rationnellement un matériel de contrôle par ultrasons, il est nécessaire à la fois de connaître de manière aussi précise que possible les caractéristiques de ce matériel et de vérifier les réglages mis en jeu au cours des divers examens.

Ceci rend indispensable l'usage des dispositifs d'étalonnage constitués par des blocs de

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

forme normalisée permettant de :

Contrôler l'appareillage et les palpeurs, afin de définir leurs caractéristiques propres. Reproduire les conditions de réglages antérieurement utilisés. Comparer éventuellement les possibilités de différents matériels en vue d'une opération donnée [33-30]

a) Caractéristiques du bloc d'étalonnage :

Nature du matériau : Le matériau utilisé pour la fabrication des blocs d'étalonnage doit répondre aux conditions suivantes :

Acier non allié ($C\% \leq 0.15 \%$).

Indice conventionnel de grosseur de grains ≥ 8 .

Vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales et transversales sont respectivement (5920 et 3230 m/s). D'autres matériaux peuvent utiliser en fonctions des applications (tenir compte des vitesses de propagation des ondes ultrasonores).

b) Contrôle du matériau :

Avant usinage du bloc, il convient de s'assurer de leur bonne homogénéité et de l'absence des défauts

c) Mode opératoire :

Pour l'étalonnage, on doit effectuer : A l'appareil :

- ◆ Correction du point zéro.
- ◆ Etalonnage de l'échelle de mesure par réglage de la base de temps. Contrôle de la linéarité horizontale et la linéarité verticale. Réglage de la sensibilité relative.

Aux palpeurs droits :

- ◆ Contrôle de la zone de silence.
- ◆ Contrôle du pouvoir de résolution. Aux palpeurs d'angles :
- ◆ Contrôle du pouvoir de résolution.
- ◆ Détermination de point d'incidence (ou d'émergence). Vérification de l'angle de réfraction.

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

Paramètres à régler avant l'examen :

- Détermination de l'axe de soudure : Pour repérer les distances utilisées pendant l'examen, il faut déterminer un repère, souvent l'axe des soudures.
- Volume à contrôler : C'est la zone incluant le métal fondu et le métal de base thermiquement affecté (ou la ZAT à 10mm de part et d'autre du joint de soudure)

Le matériel utilisé :



Figure 47 : matériel utilisé

3.7 Palpeur droit :

3.7.1 Détermination de la zone de silence ou la zone morte :

La plus petite distance au-dessus de laquelle un réflecteur donné ne fournit plus un écho net est bien séparé, de l'impulsion initiale détermine (zone morte).

Pour déterminer la zone morte de notre palpeur droit nous avons utilisé une cale à gradins.

« t » correspond à la durée de l'émission. Pendant ce temps, tout écho correspondant à un défaut ne sera pas visualisé, donc non détecté, puisque son écho sera superposé à celui de l'émission.

« ZM » la zone morte (ou zone de silence) peut être assimilée à une distance.

La détermination de cette zone est donc nécessaire avant tout contrôle avec un « palpeur droit », afin de connaître avec précision l'étendue du contrôle.

Il suffit de mettre le palpeur sur une position « P » de la cale à gradins correspondante à une épaisseur « e », puis voir si l'écho de ce réflecteur est séparé du signal d'émission, on déplace le palpeur sur une position « P' » correspondante à une épaisseur « e' » inférieur

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

à « e » et ainsi de suite jusqu'à une position correspondante à une épaisseur minimum où l'écho du réflecteur arrive presque à toucher le signal d'émission. Et on dit que la zone de silence est égale à cette épaisseur minimum.

NB : Si un contrôle à 100% de la pièce est exigé, c'est un examen près de la surface doit être effectué alors un « relais » peut être adapté au palpeur ou la technique par immersion doit être adoptée [32-33].

Dans notre cas nous avons trouvé les points d'émergences suivantes :

Palpeur à angle (45°) : PE=14mm.

Palpeur à angle (60°) : PE=9mm.

Palpeur à angle (70°) : PE=13mm.

Avec : « PE » : la point d'émergence.

3.7.2 Mouvement du palpeur :

Mouvement Zig zag : est une combinaison entre deux mouvement longitudinal et transversal, parallèle à l'axe de la soudure avec un pas ne dépasse pas la largeur du palpeur.

Mouvement pivotant : des oscillations angulaires de « 10° à 15° » environ d'amplitude de chaque côté de l'axe de déplacement. [33]

3.7.3 Exécution du contrôle :

Après avoir réussi à étalonner nous allons procéder au contrôle d'une pièce soudée, mais avant le commencement et afin de faciliter le travail il y a des paramètres à déterminer tels que le recule max et l'échelle minimale.

3.7.4 Le recule max (R max) :

C'est le point le plus loin du bord de joint qu'il va nous assurer de contrôler la soudure et la zone affectée thermiquement par un demi bond et un bond complet [33].

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

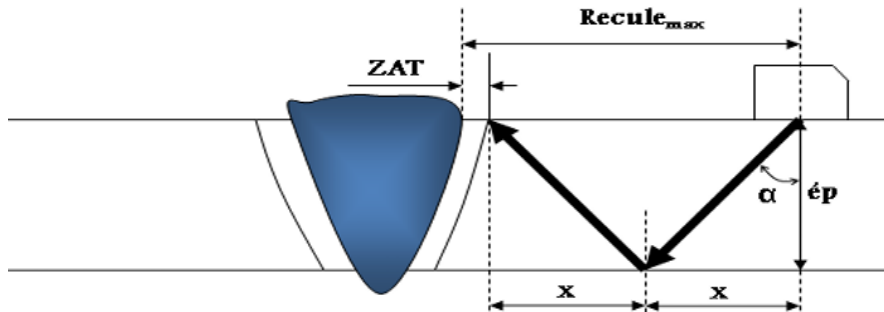


Figure 47 : Inspection ultrasonore d'une soudure

vitesse de balayage :

En contrôle manuel, la vitesse de déplacement du traducteur est généralement inférieure à 150mm/s [33].

Notre Parametre :

angle 60°

Vitesse 55Db

Gain : 3230

Calcule la Le recule max (R max) :

$$\cos 60^\circ = \frac{19}{R_{max}}$$

$$R_{max} = 19/0,5$$

$$R_{max} = 38 \text{ mm}$$

IV.4.9.2. calculer Y :

$$19^2 + Y^2 = 38^2$$

$$Y = 32$$

Chapitre IV Etude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé

Le but du chapitre IV :

Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude expérimentale des techniques de Contrôle Non Destructif (CND) appliquées sur un joint soudé, en mettant en œuvre plusieurs méthodes d'inspection afin d'évaluer la qualité de la soudure réalisée sur un acier de type AISI 1215. Il s'agit dans un premier temps de préparer les échantillons et d'identifier les caractéristiques du matériau de base et du métal d'apport utilisé. Ensuite, différentes techniques de contrôle telles que le ressuage, la magnétoscopie et les ultrasons sont appliquées selon des protocoles précis. L'objectif est de détecter, interpréter et évaluer les éventuels défauts de soudure, et d'en analyser l'origine et l'impact, dans le but d'améliorer la maîtrise du procédé et la fiabilité des assemblages soudés.

conclusion :

L'utilisation de la méthode de contrôle par ultrasons est une bonne technique d'inspection, ces propriétés peuvent détecter un nombre important des irrégularités dans le matériau ou dans l'assemblage soudé, ceci dépend fortement de la performance des équipements de contrôle disponibles. l'assemblage soudé, ceci dépend fortement de la performance des équipements de contrôle disponibles.

Résultats et Interprétations :

1)-Pour le contrôle visuel

Toute inspection commence par un contrôle visuel du joint de soudure, pour vérifier les défauts superficiels à l'aide des instruments optiques.

2)- Contrôle par ressuage

Le contrôle par ressuage a révélé quelques défauts de surface :

- apparition de quelques souffleurs éparpillés ; sans incidences sur le joint de soudure
- On admet alors que la qualité de la soudure est bonne.
- Présence d'une fissure débouchant pour la pièce en fonte.

3)- Contrôle par Magnétoscopie

Ce type de contrôle sert à l'Observation des défauts de surface sur le joint de soudure. Dans notre cas ce contrôle n'a révélé aucun défaut de surface pour la première pièce.

Il nous confirme la fissure détecté dans la pièce en fonte.

Alors Le contrôle par magnétoscopie confirme le résultat du 1er contrôle par ressuage.

4)- Résultats des essais aux ultrasons

Le contrôle par ultrason nous a aidés à détecter des défauts de manque de fusion dans les deux types de soudure.

L'ultrason contrôle les défauts internes des assemblages, en comparaison par les autre contrôle on peut juger que ces défauts peuvent être causés par : - Une intensité très faible du courant de soudure. - Une vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal. - Un angle d'inclinaison de l'électrode incorrect. - Bords à soudés mal nettoyés.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La qualité d'une soudure dépend certainement du bon déroulement de l'opération de soudage, mais on n'aura aucune certitude sur l'état de la soudure si celle-ci n'est pas certifiée par un contrôle fiable et sûr.

Les défauts de soudage probables sont nombreux, mais aussi les procédés de contrôle sont multiples, et avec des techniques différentes. Mais le plus difficile est la détection des fissures dans une soudure.

En pratiquant l'analyse aux ultrasons, nous n'avons pas rencontré d'obstacles avec notre produit de soudage, relatifs à la structure métallographique c'est à dire de déviation du faisceau ultrasonore à cause des hétérogénéités du métal, donc la structure ferritique est parfaitement perméable aux ultrasons. Cependant on a enregistré pas mal de difficultés relatifs aux signaux perturbateurs dus aux plans de solidifications ou aux poches de gaz superposées aux bouts des défauts que nous avons créés.

Parmi les difficultés entravant la mise en œuvre des contrôles ultrasonores sur les soudures, on peut citer la forme du joint qui n'est pas bien connue et la présence d'inclusions ou plans de solidifications plans ou volumiques au niveau des interfaces entre le métal fondu et le métal de base qui faussent les interprétations on peut attribuer d'autres difficultés liés au comportement du matériel (les sondes) vis-à-vis de la matière qui dépend de beaucoup de paramètres (rugosité, structure métallique) et d'autres sont relatifs à l'utilisateur (choix des palpeurs, calibrages, interprétations des signaux recueillis). Notre produit de soudage à l'arc électrique au Ateliers MEI de SONELGAZ par des soudeurs certifiés selon la norme ISO 2003, avec le respect des normes de soudage en vigueur.

Perspectives :

Les techniques de détection des fissures sont nombreuses mais certaines d'entre elles sont coûteuses donc difficiles à réaliser en Algérie faute de moyens. Les techniques ultrasonores sont du moins faisables par rapport aux autres techniques citées dans ce manuscrit et peuvent devenir rentables si le problème de l'interprétation est résolu. Nous proposons de poursuivre cette étude par d'autres consacrées aux techniques d'interprétations par d'autres techniques tel que le contrôle par rayon X.

Conclusion générale

D'après les expériences que j'ai réalisées lors de mon stage au sein de l'entreprise SAIEG, j'ai constaté que la meilleure méthode de soudage est le soudage MIG-MAG, car elle offre une plus grande précision. Cependant, son inconvénient est qu'elle prend plus de temps par rapport au soudage à l'arc (ARC), qui est plus rapide mais donne des résultats moins précis.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

Références Bibliographiques :

Références Bibliographiques :

[1] PETROV V., *Découverte de l'arc électrique et premières applications dans le soudage*, Revue de Physique Industrielle, 1802.

[2] DE MÉRITENS A., *Première utilisation industrielle de l'arc pour le soudage*, Paris, 1881.

[3] INSTITUT INTERNATIONAL DE LA SOUDURE, *Classification des défauts de soudage*, Normes techniques IIS, 2019.

[4] TWI – The Welding Institute, *Friction Stir Welding Process Development*, UK, 1991.

[5] LEBRUN J., *Applications industrielles du soudage FSW*, Conférence sur le soudage moderne, 2015.

[6] BOUDIAF S., *Évolution des procédés de soudage dans l'industrie automobile*, Journal Algérien des Technologies, 2020.

[7] ROYER D., *Techniques physiques pour le contrôle non destructif*, Éditions Techniques, 2018.

[8] HÉBERT P., *Thermodynamique du soudage laser*, Presses Polytechniques, Montréal, 2017.

[9] VACHER B., *Détection des défauts en CND : principes et applications*, Revue Générale de CND, 2016.

[10] AFNOR, *Guide des essais non destructifs – normes françaises*, Paris, 2021.

[12] DUPONT A., *Comparaison des méthodes de contrôle non destructif*, Techniques de l'Ingénieur, 2019.

[13] CARRÉ J., *Ondes ultrasonores et détection des fissures internes*, CND Magazine, Vol. 5, 2020.

[14] LECOMTE F., *Tableau comparatif des méthodes CND*, Séminaire CND 2022, ENSAM Paris.

[15] ZERROUKI N., *Risques d'arrachement lamellaire dans les soudures*, Université de Blida, Mémoire de Master, 2018.

Références Bibliographiques :

- [16] SWITZER R. et SWITZER J., *Procédé de ressuage moderne*, Industrial Inspection, 1941.
- [17] CHAABANE H., *Inspection par courants de Foucault – Théorie et pratique*, Tizi-Ouzou, 2019.
- [18] THOMAS G., *Thermographie infrarouge pour la détection des défauts*, Infratech, 2016.
- [19] BELLIL M., *Méthodes optiques de contrôle non destructif*, USTHB, 2020.
- [20] LEROY C., *Analyse thermique active et passive*, Université de Lyon, 2019.
- [21] COTTEZ J.-P., *Défauts surfaciques et internes dans les métaux soudés*, Éditions Techniques, 2018.
- [22] ALLOUCHE R., *Essais de ressuage dans l'aéronautique*, Revue AéroMatériaux, 2021.
- [23] BENAÏSSA S., *Contrôle magnétique et limites de détection*, Centre CND Alger, 2020.
- [24] BUREAU VERITAS, *Procédures de contrôle qualité après soudage*, Norme BV-WELD-QC-40, 2021