



N° d'ordre : GM/...../2018

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par :

MAHDI Hocine et HASNAOUI Djabir

Thème :

Inspection et contrôle des assemblages soudés par méthodes non destructives

Soutenu Devant le jury composé de :

Dr. MENASRLN	Université mohamed boudiaf -M'sila	Président
Dr. ZAOULM	Université mohamed boudiaf -M'sila	Encadreur
Dr. EL HADIA	Université mohamed boudiaf -M'sila	Examineur
Dr. FERSLC	Université mohamed boudiaf -M'sila	Examineur

Année Universitaire : 2017 / 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tous, Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir aidé et éclairé notre chemin.

Nous adressons spécialement nos remerciements à :

Monsieur ZAOUI Moussa, notre encadreur, pour ses remarques et conseils qu'ils nous ont aidé énormément.

Nous remercions également du fond du cœur, tous les enseignants du département de génie mécanique, qui ont contribué à notre formation, en particulier :

Mr. SALAMANI Mohammed, Mme. MOUSSAOUI Nafissa

Mme. BENHAMADOUCHE Lamia, Mr. AMROUNE Saleh, Mr. FARSI Chawki

Mr. EL HADI abd el Malek ET Mr. MENASSRI Noureddine.

Nous tenons à remercier aussi les personnes qui sans eux, nous ne serons jamais là : nos parents .

Ainsi que toute ma famille.

Nos vifs remerciements vont également à tout le personnel de MEI de M'sila

Tous les gens qui nous ont aidés de près ou de loin.

Tous les membres de jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Enfin nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés dans notre projet.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

***A** Mes chers parents **Ma** mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. **Mon** père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

***A** tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé*

***A** mes frères. Salah ,tayab,abd el nour*

Je leur souhaite tout le succès et tout le bonheur

***A** mes amis et mes camarades. Sur tout, ismail, bayzid, haytham, lakhdar, Azzouz, oussama, amar, islem, et mon binôme Djâbir ; pour une sincérité si merveilleuse, jamais oubliable, en leur souhaitant tout le succès et tout le bonheur.*

***S**ans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire jusqu'à l'université .*

***A** toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie*

***A** tous ceux que j'aime.*

Mahdi Hocine

Dédicaces

Jedédie ce mémoire

À mes chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et

Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études, et

Mon très cher père est la plus belle perle du monde

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

À tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

À mes frères et soeurs

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

À mes amis et mes camarade. Sur tout

Binôme Mahdi Hocine.

Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant

Tout le succès ...tout le bonheur.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

À tout personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

À tous ceux que j'aime.

Hasnaoui Djabir

Table des matières

Introduction générale	1
<u>Chapitre I</u>	
I.1. Introduction	3
I.2. généralité sur le soudage	3
I.2.1. Historique sur le soudage	3
I.2.2. Le soudage de nos jours	4
I.3. phénomène de soudage	4
I.3.1. Les soudures autogènes	4
I.3.2. Les soudures hétérogènes	5
I.4. Procédé de soudage	5
I.4.1. Procédé de soudage MIG – MAG	6
I.4.2. soudage au gaz ou chalumeau	7
I.4.3. soudage à l’arc avec électrode enrobée	8
I.4.4.Soudage à l’arc électrique type TIG Tungstène Insert Gas	9
I.4.4.1. Principe	9
I.4.5. Soudage par friction	10
I.4.5.1. Principe	10
I.4.5.2.Paramètres de soudage	11
I.4.6. Le soudage laser	11
I.4.6.1. Principe du soudage laser	11
I.5. Caractères généraux de l’opération de soudage	12
I.5 .1. Aspect thermique du soudage	12

I.5 .2. Aspect chimique du soudage	13
I.5.3. Aspect thermomécanique du soudage	13
I.6. Notion de métallurgie de soudage	14
I.7. Les cycles thermiques de soudage	15
I.8.Choix d'un procédé	16
I.8.1.Approche en fonction du domaine d'application	16
I.9. Conclusion	17

Chapitre. II

II.1.Introduction	18
II.2.Definition	18
II.3. Qualités et défauts d'un cordon de soudure	18
II.4. Facteurs de défaillance des assemblages soudés	19
II.4.1. Facteurs technologique	19
II.4.2. Facteurs métallurgiques	19
II.4.3. Facteurs mécaniques	20
II.5. Les principaux défauts de soudures	20
II.5.1. Les inclusions gazeuses	20
II.5.2.Les inclusions solides	20
II.5.3.Les soufflures	20
II.5.4. Défauts de fusion (collage)	21
II. 5.4. 1. Localisations possibles des manques de fusion	21
II. 5.4. 2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure ..	22
II.5.4.2.1. Causes possibles	22

II.5.4.2.2. Mesures préventives	23
II.5.4.3. Manque de fusion entre passes	23
II.5.4.4. Manque de fusion à la racine de la soudure	23
II.5.5. Défauts de pénétration	24
II.5.6. Sillons aux caniveaux et morsures en surface	25
II.5.7. Retassures de cratère	25
II.5.8. Effondrement à la racine	25
II.6. Fissurations	25
II.7. Orientation des fissures	26
II.7.1. Les fissures longitudinales	26
II.7.2. Les fissures transversales	27
II.8. Types des fissures	28
II.8.1. Fissuration à chaud	28
II.8.1.1. Définition	28
II.8.1.2. Causes possibles	30
II.8.2. Fissuration à froid	31
II.8.2.1. Définition	31
II.8.3. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)	32
II.8.4. Fissures par arrachement lamellaire	34
II.8.4.1. Identification	35
II.8.4.2. Surface de Rupture	35
II.8.4.3. Les causes	36
II.8.4.4. Facteurs à considérer pour réduire le risque d'arrachement	36
I.9. Conclusion	36

Chapitre III

III.1. Introduction	37
III.1.2 Bref historique	37
III.2. Généralités sur le contrôle non destructif	38
III.2.1 Principe	38
III.2.2.Principes de détection des défauts. Différentes techniques du(CND)	38
III.2.2.1 Hétérogénéités et défauts	38
III.2.2.2 Les défauts surfaciques	38
III.2.2.3 Les défauts internes	39
III.2.3 Principe de la détection d'un défaut	39
III.2.4 Procédure de (CND)	40
III.3. Les techniques de contrôle non destructif	41
III.3.1 Examen visuel	41
III.3.2. Ressuage	42
III 3.2.1.Méthode de contrôle	43
III 3.2.2.Procédure de contrôle	45
III.3.3. Essais ultrasonores	45
III.3.3. Nature des ultrasons	46
III.3.3. Production des ultrasons de fréquence élevés	47
III.3.3.1 Fonctionnement d'un appareil à ultrasons	47
III.3.3.2 Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2	48
III.3.3.3 Principe de la méthode	49
III.3.3.4.Examen par transmission	49

III.3.3.5.Examen par réflexion	49
III.3.4. Radiographie	50
III.3.5. Magnétoscopie	52
III.3.6. Courants de Foucault	53
III.3.7. Thermographie	54
III.4. Utilisation des procédés de (CND)	56
III.5. Les procédures d'emploi	56
III.6. Conclusion	57

Chapitre IV

IV.1 : Introduction	58
IV.2 : préparation des échantillons	59
IV.2 .1 : Premier échantillon	59
IV.2.2 : Présentation du matériau Acier ordinaire (non alliés) E24 ...	59
IV.2.5 : Préparation des éprouvettes	59
IV.2.6 : Présentation du métal d'apport	60
IV.2.9 : Le procédé du soudage utilisé	61
IV.3 : Deuxième échantillon	63
IV.4 : Contrôle par (CND)	64
IV.4.1 : Contrôle par Ressuage	64
IV.4.1.1 Mode Opérateur du ressuage	64
IV.4.1.6 L'Interprétation des Défauts	67
IV.4.1.6.1 Premier échantillon	67
IV.4.1.6.2 Deuxième échantillon	67
IV.4.1.6.3 Interprétation et évaluation des résultats	68

IV.4.2 Contrôle par magnétoscopie	69
IV.4.2.1 Principe	69
IV.4.2.2 Mise en œuvre	69
IV.4.3 Contrôle par ultrasons	72
IV.4.3.1 Définition	72
IV.4.3.2 Émission et réception des ultrasons	72
IV.4.3.3 Technologie des palpeurs	73
IV.4.5 Méthode de contrôle	74
IV.4.6 Etalonnage et bloc d'étalonnage	75
IV.4.7 Paramètres à régler avant l'examen	77
IV.4.7.1 Evaluation des indications	77
IV.4.8 Pratique du contrôle	78
IV.4.8.1 Vérification des caractéristiques des palpeurs	78
IV.4.8.1.1 Détermination de la zone de silence ou la zone morte ...	78
IV.4.8.1.2 Détermination du point d'émergence (ou d'incidence)	79
IV.4.8.4 Choix du Palpeur	81
IV.4.9 Exécution du contrôle	81
IV.4.9.1 Le recule max (R_{max})	81
IV.4.9.2 L'échelle minimale (l'étendu)	82
IV.4.9.3 Localisation du défaut	86
IV.5 conclusion	88
Interprétation des résultats	89
Conclusion et perspectives	90
Références bibliographiques	91
Annexe	93

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Classification des procédés de soudage	5
Figure. I.2 : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion.....	6
Figure I.3 : Schématisation du soudage MIG-MAG.....	7
Figure I.4 : Soudage au chalumeau.....	7
Figure I.5 : Schéma de principe du Soudage à l'arc électrique	8
Figure 1.6 : Principe du soudage TIG	9
Figure I.7 : Principe du soudage par friction.....	10
Figure I.8 : Procédé de soudage par laser	12
Figure I.9 : Influence du métal de base sur la composition du métal fondu.....	13
Figure I.10 : Présentation macrographique d'un joint soudé.....	14
Figure I.11 : $\Theta = f(t)$	16
Figure I.12 : $\Theta_m = f(x)$	16

Chapitre II

Figure. II.1 : Les différents types de soufflure.....	20
Figure. II.2 : Exemple de soufflures.....	21
Figure. II.3 : Localisations possibles des manques de fusion.....	22
Figure. II.4 : manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	22
Figure. II.5 : Manque de fusion entre passes.....	23
Figure. II.6 : Manque de fusion à la racine de la soudure.....	23
Figure. II.7 : Défaut manque de pénétration	24
Figure. II.8 : Effondrement à la racine.....	25

Figure. II.9 : La fissure longitudinale.	26
Figure. II.10 : La fissure transversale.....	27
Figure. II.11 : Les types de fissure.....	28
Figure. II.12 : Fissure de cratère.....	29
Figure. II.13 : Préparation d'un joint pour la prévention de la fissure à chaud	29
Figure. II.14 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.....	30
Figure. II.15 : Types de fissures à froid.....	31
Figure. II.16 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	31
Figure. II.17 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	33
Fig. II.18 : fissure par arrachement lamellaire dans le métal de base.....	34
Fig. II.19 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.....	34
Fig. II.20 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.....	35

Chapitre III

Figure. III.1 : Schéma synoptique d'un système de(CND)	40
Figure. III.2 : principe de l'examen visuel.....	41
Figure. III.3 : principe de Ressuage	43
Figure. III.4 : principe du contrôle par ultrasons.....	46
Figure. III.5 : nature des ultrasons	46
Figure. III.6 : bloc des étalonnages.....	48
Figure III.7 : Examen par transmission.....	49
Figure III.8 : Examen par réflexion.....	50
Figure. III.9 : Inspection par radiographie.....	52
Figure. III.10 : Inspection par Magnétoscopie - Electroaimant.....	53

Figure. III.11 : Inspection par Courants de Foucault.....	55
Figure. III.12 : Inspection par thermographie.....	55

Chapitre IV

Figure. IV.1 : 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.....	60
Figure IV.2 : le croquis du chanfrein.....	60
Figure IV.3 : réalisé par fraisage un chanfrein à (30°).....	60
Figure IV.4 : le principe de Soudage à l'arc avec électrode enrobée.....	62
Figure IV.5 : Forme de l'échantillon avant et après le soudage.....	63
Figure IV.6 : Forme de l'échantillon avant soudage.....	63
Figure IV.7 : nettoyage de la pièce.....	64
Figure IV.8 : Application du produit ressuage Rouge.....	65
Figure IV.9 : Élimination du produit de ressuage rouge.....	66
Figure IV.10 : application du révélateur.....	66
Figure IV.11 : les défauts détectés dans la pièce après ressuage.....	67
Figure IV.12 : pièce à contrôle par ressuage.....	67
Figure IV.13 : Application d'une couche de peinture blanche.....	69
Figure IV.14 : Application du champ magnétique.....	70
Figure IV.15 : Contrôle par magnétoscopie.....	71
Figure IV.16 : pièce à contrôlé par magnétoscopie.....	71
Figure IV.17 : chaines de mesure de contrôle par ultrason.....	73
Figure IV.18 : élément des palpeurs.....	73
Figure IV.19 : méthode de contrôle par réflexion.....	75

Figure IV.20 : le volume à contrôler.....	77
Figure IV.21 : matériel utilisé.....	78
Figure IV.22 : détermination de la zone morte.....	79
Figure IV.23 : détermination du point d'émergence.....	80
Figure IV.24 : Déterminer la point d'émergence de Palpeur (70°).....	80
Figure IV.25 : Choix le Palpeur (70°).....	81
Figure IV.26 : calcul de recul max.....	81
Figure IV.27 : calcul de l'étendu.....	82
Figure IV.28 : localisation du défaut.....	83
Figure IV.29 : Contrôle la pièce par ultrasons.....	84
Figure IV.30 : la détection du défaut était par ½ bond.....	84
Figure IV.31 : tracé de l'écho de défaut I.....	85
Figure IV.32 : tracé de l'écho de défaut II.....	85
Figure IV.33 : la détection du défaut était par bond complet.....	85
Figure IV.34 : tracé de l'écho de défaut III.....	86
Figure IV.35 : tracé de l'écho de défaut.....	87

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau. II.1 : Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention.....24

Chapitre IV

Tableau IV.1 : paramètres de soudage.....62

Tableau IV.2 : Localisation des défauts.....86

Liste des symboles

Symboles	Signification
Θ_m	La température maximale atteinte
λ	longueur d'onde de rayonnement X incident
V	vitesse de propagation d'une onde ultrasonore
δ	principe du contrôle par rayons
X	principe du contrôle par rayons
P	Phosphore
Mn	Manganèse
Ni	Nickel
MIG	Soudage (Metal Inert Gas)
MAG	Soudage (Metal Active Gas)
TIG	Soudage (tungstène inert Gas)
C	Carbone
Si	Silicium
MB	Métal de base
ZAT	Zone affectée thermiquement.
ZF	Zone fondue
ZL	Zone de liaison
MT	Contrôle par magnétoscopie
PE	point d'émergence
UT	Contrôle par ultrasons
PT	Contrôle par ressuage
CND	les contrôles non destructifs
Z	profondeur de défaut
D	longueur de défaut
ép	L'épaisseur de la pièce
PS	Le parcours sonore
PE	le point d'émergence
MEI	Société de Maintenance des Equipements Industriels
Rm	résistance à la traction
U	la tension d'arc entre les deux électrodes
ReH	Limite élastique
ZM	la zone morte

Introduction générale

La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier ; agroalimentaire... etc. la connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement permet de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adoptées à son utilisation.

Le soudage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité.

On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électrons, soudage au plasma, soudage par laser, ...). La non-conformité de la composition chimique d'un acier peut gêner, et la soudabilité, et l'obtention d'une structure nécessaire pour une optimisation de ses caractéristiques mécaniques. Pour ces raisons des travaux de recherches au niveau international sont périodiquement publiés dans ce domaine de constructions soudées.

Le but de notre travail est l'inspection et le contrôle par des méthodes non destructives des assemblages soudés. Notre partie expérimentale est réalisé au niveau des ateliers MEI – M'sila. Le contrôle non destructif est réalisé sur un cordon de soudure bout à bout pour des deux assemblages :

- Le premier assemblage des tôles en acier E24 est réalisé à l'arc électrique avec baguette métallique de même composition c.-à-d. l'électrode de soudure est en 'acier au carbone/Rod -- E7018.
- Le deuxième assemblage d'une pièce en Fonte, est aussi soudé par arc avec une électrode d'enrobage Graphite diamètre (3.25*350mm), cette électrode est SOF 510. Electrode alliée au Nickel.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage.
- Le deuxième chapitre est réservé à la description des défauts de soudage.
- Le troisième chapitre contient une présentation des Concepts généraux sur les techniques de Contrôle Non Destructif.
- Le quatrième chapitre est une étude expérimentale par les techniques de CND appliquées sur le joint soudé, résultats et interprétations des défauts observés dans le cordon de soudure bout à bout des deux métaux acier A33 sous forme de tôles fortes au niveau de MEI Msila où ce travail a été réalisé.

Chapitre I

Généralité sur le soudage

I.1. Introduction :

Le soudage est un procédé qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique. L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires [1].

I.2. généralité sur le soudage :

I.2.1. Historique sur le soudage :

Les origines du soudage moderne datent de la fin du 19^{ème} siècle et du début de 20^{ème} siècle.

A cette époque s'inventent :

- Le soudage par aluminothermie (procédé chimique) : Goldsmith, Allemagne
- Le soudage avec électrode de charbonne : Bernardo et Olszewski, Russie
- Le soudage avec électrode fusible flue : Slavian, RUSSIE
- Le soudage avec électrode enrobée Keller, Suède
- Le soudage par résistance Thompson, USA
- Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard, France

Le développement des procédés de soudage est devenu de plus en plus rapide avec l'invention du soudage avec les électrodes enrobées et le soudage au chalumeau Oxyacétylénique, ce dernier a rendu possible la réalisation des premiers ouvrages importants comme les bateaux, les ponts, le bâtiment et les chaudières (surtout aux USA et en Angleterre).

L'introduction massive du soudage par résistance joua le rôle décisif dans le

Développement rapide de l'industrie automobile et parmi les nouveaux procédés nous

Pouvons nommer :

- Le soudage avec électrode de tungstène : 1924 à l'USA
- Les soudages sous flux en 1935 à l'USA
- Le soudage vertical sous laitier en 1950 en URSS

- Le soudage sous la protection gazeuse de 1950 à 1960
- Le soudage avec fils fourre de 1950 à 1960
- Le soudage explosion de 1950 à 1960
- Le soudage par bombardement électronique en 1956 en France
- Le soudage au laser en 1965 [2].

I.2.2. Le soudage de nos jours :

Nous n'estimons aujourd'hui que (60 à 80) % de la production mondiale de l'acier soient destinés à la fabrication des produits soudés. A noter que le soudage est particulièrement utilisé dans les domaines de la fabrication des assemblages métallique à partir de la microélectronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydraulique. Actuellement nous avons la possibilité de des éléments d'épaisseur de 0.01mm jusqu'à 1000 mm et même plus en bref, on soude presque tous les métaux et alliages utilisés dans les techniques modernes. Les procédés de soudage appelés soudage de rechargement existent aussi et sont Largement utilisés pour la remise en état de pièces et assemblage usés ou endommagés. Le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie telle que le LASER [2].

I.3. Phénomène de soudage :

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Dans le soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation de la température dans les pièces. Les sources d'énergie utilisées sont de type électrique, chimique, mécanique (friction) ou optique (Laser) [5].

On distingue deux grandes classes de soudures :

I.3.1. Les soudures autogènes :

Ce sont des assemblages homogènes car les éléments sont assemblés soit sous le même métal d'apport soit avec un métal d'apport de même nature chimique [2].

I.3.2. Les soudures hétérogènes :

Elles sont réalisées à l'aide d'un métal d'apport déposé par fusion et d'une nature chimique différent de celle des éléments soudés [2].

I.4. Procédé de soudage :

Les différents types du soudage ne peuvent s'effectuer que selon l'un des deux modes suivants [8] :

- En phase solide : la continuité atomique entre les bords à joindre est assurée par une déformation à froid ou à chaud. Cette déformation est due soit à une pression soit à une friction suivie d'une pression ;
- En phase liquide : liaison par fusion localisée des joints des pièces à assembler ou par ajout de métal d'apport en fusion. La majorité des procédés de soudage s'opèrent selon ce mode.

La classification des multiples variantes du soudage peut être faite selon la source d'énergie utilisée. Cette classification est présentée dans la (Figure I.1.).

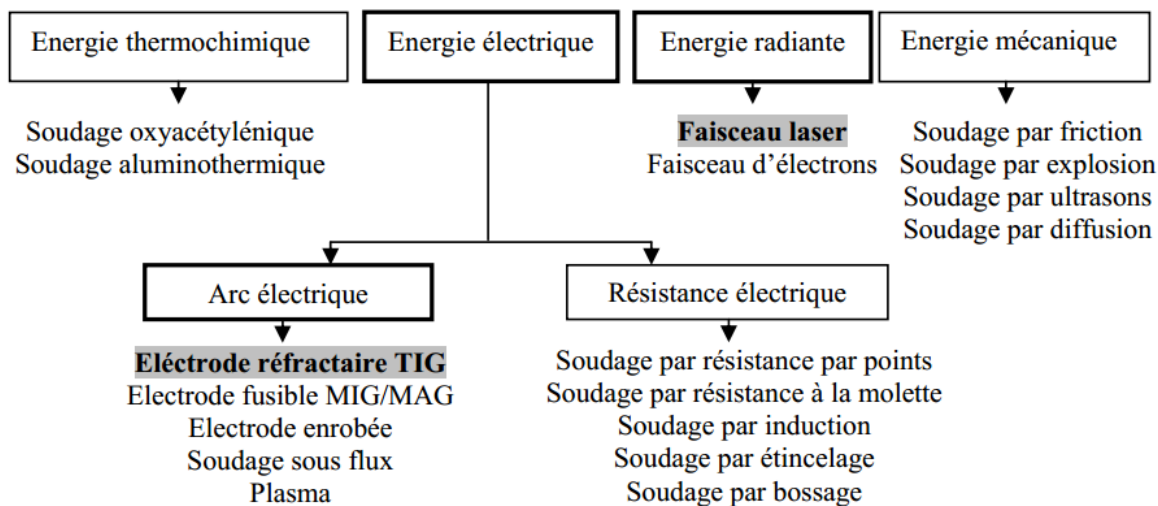


Figure I.1 : Classification des procédés de soudage.

Les procédés de soudage par fusion peuvent aussi être classés suivant l'intensité de la source d'énergie qui induit des différences de caractéristiques importantes sur les cordons de soudure (figure I.2). L'énergie spécifique de chaque procédé agit sur la pénétration, qui est le rapport de

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

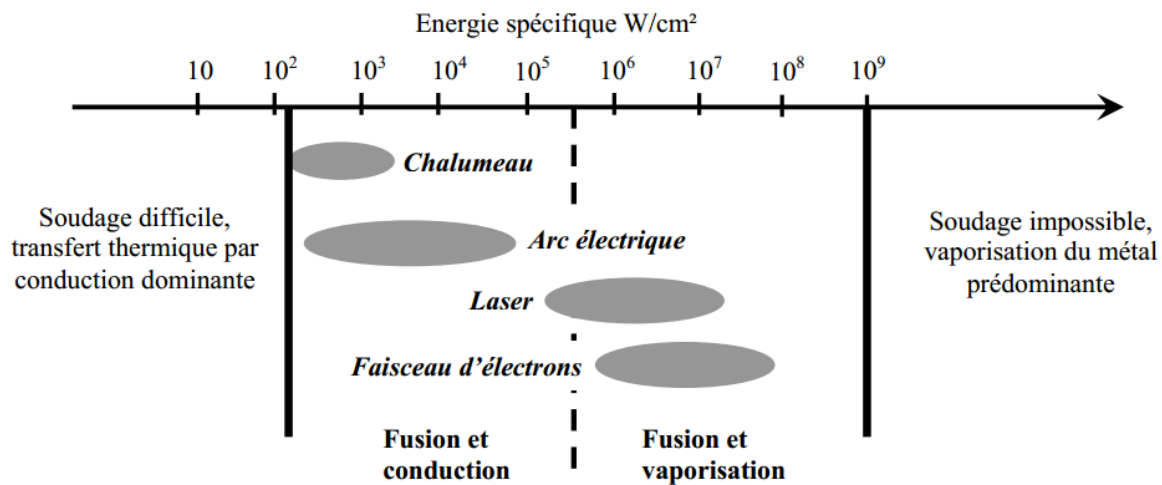


Figure. I.2 : Energies spécifiques des différents procédés de soudage par fusion.

I.4.1. Procédé de soudage MIG – MAG :

Ce procédé est l'un des nombreux types de soudage utilisant l'arc électrique pour fournir la chaleur nécessaire à la fusion locale des pièces à assembler. L'arc électrique s'établit grâce aux déplacements des électrons entre l'électrode et le joint de soudure dans un gaz ionisé formant la colonne d'arc (plasma). Selon le cas, du gaz inerte (Argon, Hélium) ou actif (CO₂) est utilisé pour protéger l'arc et le bain de fusion ce qui donne leur nom aux procédés : M.I.G. (Métal insert Gas) et M.A.G. (Métal Active Gas). Le procédé M.I.G. est utilisé pour le soudage de l'aluminium et de ses alliages quant au procédé M.A.G. il est employé pour le soudage des aciers. Le métal d'apport se dévide automatiquement sous forme de fil à l'intérieur de la buse de la torche pour se déposer en fusion, par régime de court-circuit ou de pulvérisation, sur le métal de base. La dilution du métal d'apport avec le métal de base puis leur solidification constituera la liaison métallique visée par le soudage. Ce procédé (M.I.G. ou M.A.G.) est particulièrement adapté au soudage, en toutes positions, des tôles d'épaisseurs faibles ou moyennes (1 à 15 mm) [3].

Domaines d'application :

Les procédés MIG – MAG, de haute productivité, faciles à mettre en œuvre en atelier comme sur les chantiers, sont employés aussi bien en manuel qu'en automatique et avec robots. Ils sont utilisables en toutes positions sur des épaisseurs à partir de 0,6 mm

On rencontre les procédés MIG – MAG dans de nombreuses industries : chaudronnerie, constructions navale et ferroviaire, off-shore, construction automobile, menuiserie métallique, etc.

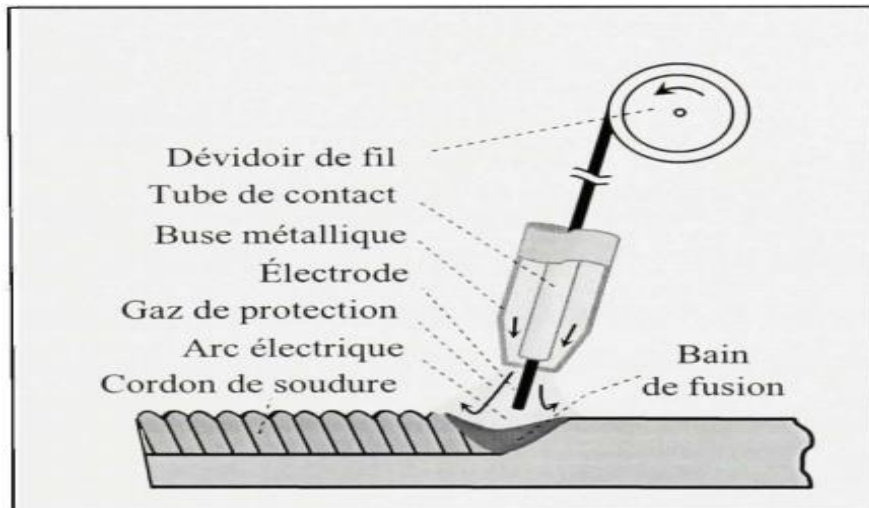


Figure I.3 : Schématisation du soudage MIG-MAG.

I.4.2. soudage au gaz ou au chalumeau :

Le soudage au gaz ou à la flamme, consiste à assembler des pièces de métal à l'aide d'un métal d'apport amené à fusion par la chaleur de la flamme d'un chalumeau. Selon le type de pièces à assembler et la résistance de l'assemblage que l'on souhaite obtenir, on utilise différentes techniques [3].

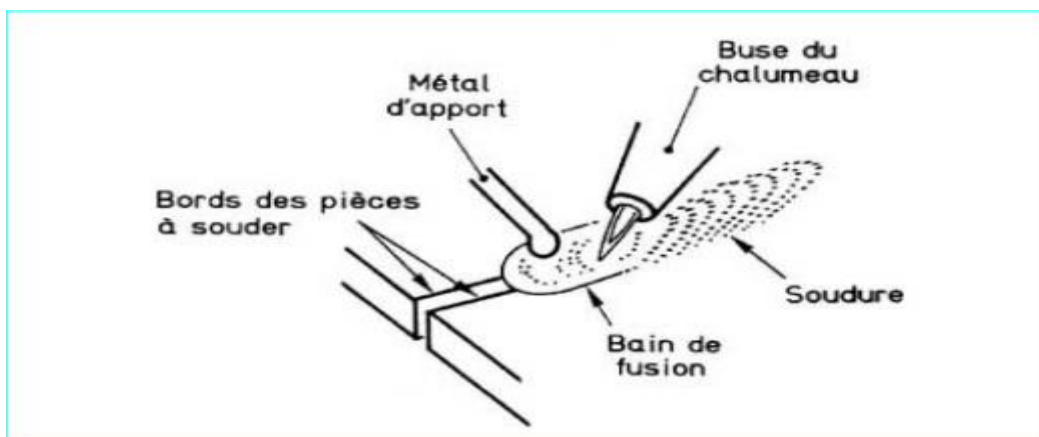


Figure I.4 : Soudage au chalumeau.

I.4.3. soudage à l'arc avec électrode enrobée :

Le soudage à l'arc électrique est le plus répandu comme procédé d'assemblage des pièces métalliques. Une fusion rapide localisée fait que les déformations des pièces soudées à l'arc sont peu importantes. Cette localisation de la chaleur implique une grande rapidité de soudage et un rendement important, avantages indéniables de ce procédé, même sur des tôles de faible épaisseur. Cette rapidité de soudage est encore accentuée par l'emploi d'électrode à haut rendement [2].

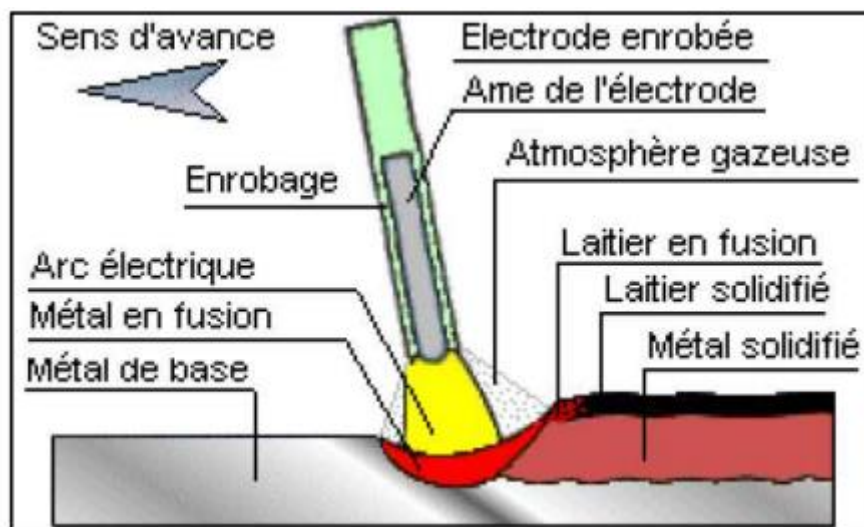


Figure I.5 : Schéma de principe du Soudage à l'arc électrique.

Source d'énergie :

Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, produit un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et les deux pièces à assembler [5].

Métal d'apport :

Le métal d'apport se présente sous forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage.

Élément de protection :

La protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique est assurée par des gaz provenant de la dissociation de l'enrobage dans l'arc. La protection du métal déposé est assurée par la formation d'un laitier adhérent à la surface de ce métal [5].

Matériaux concernés :

Ce procédé est utilisable pour tous les métaux courants tels que l'acier, les aciers faiblement alliés, les aciers inoxydables, nickel, et éventuellement les cuivreux, l'aluminium et leurs alliages.

Le soudage à l'électrode enrobée ne convient pas pour la soudure des métaux très oxydables tels que le titane et le zirconium, car la protection du bain n'est pas suffisante.

I.4.4.Soudage à l'arc électrique type TIG Tungstène Inert Gas :

Le procédé de soudage TIG remonte aux années 1930 et son développement remonte à la deuxième guerre mondiale avec l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les alliages d'aluminium et de magnésium [4].

I.4.4.1. Principe :

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) également appelé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding,) aux USA est d'abord un procédé à arc. L'arc s'établit entre l'électrode non fusible et la pièce à souder sous la protection d'un gaz inerte.

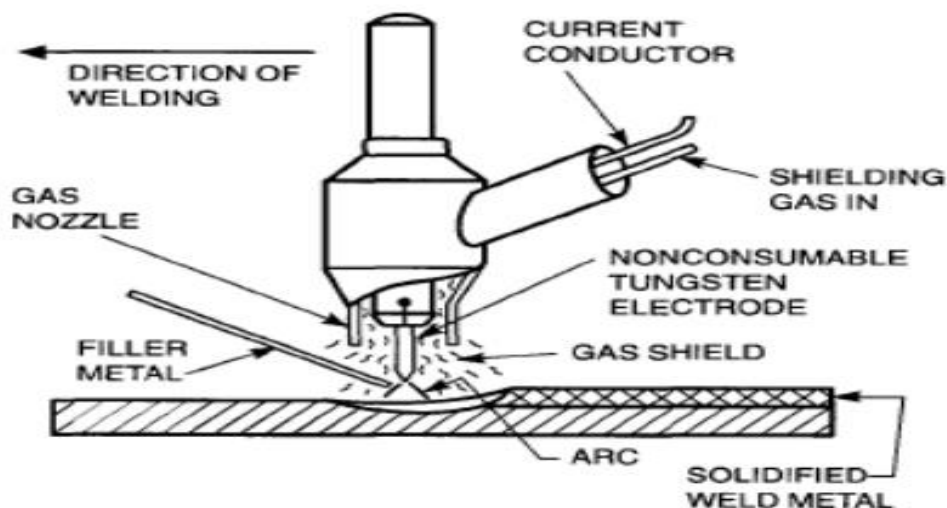


Figure 1.6 : Principe du soudage TIG.

L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. L'argon est le gaz le plus

couramment utilisé mais il peut être parfois mélangé avec de l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité. L'électrode n'est pas fusible et ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport.

I.4.5. Soudage par friction :

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard. Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte. Il est difficile d'emploi sur des matériaux n'ayant pas de caractéristiques favorables au phénomène de friction et en particulier les matériaux très électro conducteurs tels le cuivre et ses alliages [7].

I.4.5.1. Principe :

La rotation est le moyen presque exclusivement utilisé pour créer la friction (figure 1). La pièce qui tourne est serrée dans un mandrin rotatif entraîné par un moteur ou un volant d'inertie aussi doit-elle présenter au moins dans la zone de soudage une symétrie de révolution.

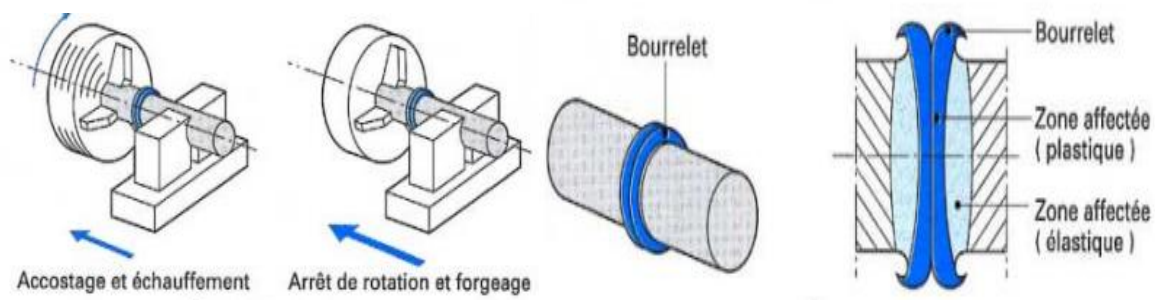


Figure I.7 : Principe du soudage par friction.

I.4.5.2. Paramètres de soudage :

Les paramètres de soudage par friction pilotée se déterminent d'après Les caractéristiques des matériaux, leur coefficient de friction et leur section (surface et nature : pleine ou creuse).

Ce sont essentiellement :

- pour la friction, la vitesse, l'effort et la durée ;
- pour le forgeage, l'effort et la durée d'application de cet effort.

I.4.6. Le soudage laser :

Le soudage laser est réalisé à l'aide d'une source laser émettant dans l'infrarouge. Le faisceau représente un réel danger pour la sécurité des travailleurs. En conséquence, le soudage est effectué par un robot (ou tout autre manipulateur) dans une enceinte fermée, étanche à la lumière. Il est possible de souder au laser selon deux modes : en conduction ou en trou de serrure (keyhole). Le soudage par conduction s'effectue à l'état liquide et requiert une densité d'énergie d'environ 10^5 W/cm². Le soudage en trou de serrure, quand à lui, implique la vaporisation du métal sous l'action d'une énergie d'au moins 10^6 W/cm²

Le capillaire, petit « tube » de vapeur métallique se formant dans la pièce, permet l'obtention d'un joint présentant le profil étroit et profond typique au soudage laser, alors que le soudage par conduction produit des joints plus larges que profonds. Sachant que le diamètre du faisceau laser frappant le matériel est de l'ordre du demi-millimètre, une source laser de plus de 1 kW est le plus souvent requise pour souder en trou de serrure [11].

I.4.6.1. Principe du soudage laser :

Le faisceau laser est orienté par un jeu de miroirs ou par fibre optique de la source vers une tête de soudage où il passe par un système de focalisation permettant de réduire son diamètre. Après focalisation, le faisceau est envoyé directement sur la surface des pièces à souder. L'effet du rayon laser sur la matière est dû à son absorption en surface où il se transforme en chaleur. Cette énergie peut être concentrée par focalisation sur une surface Extrêmement réduite (figure I.3), produisant de fortes densités de puissances de l'ordre de 10^5 W/cm² à 10^7 W/cm² [10].

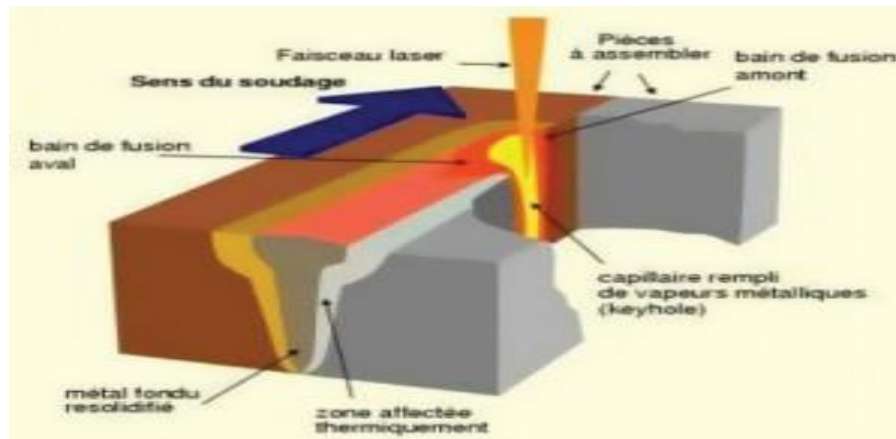


Figure I.8 : Procédé de soudage par laser.

I.5. Caractères généraux de l'opération de soudage :

Pour présenter les caractères généraux de l'opération de soudage, il faut en examiner trois aspects, à savoir :

- l'aspect thermique
- l'aspect chimique
- l'aspect thermomécanique

Mais il ne faut pas perdre de vue le fait que l'objet d'une soudure est de réunir les éléments d'une construction.

La continuité ainsi établie confère à la construction soudée un caractère particulier sur lequel il convient aussi de s'arrêter [1].

I.5.1. Aspect thermique du soudage :

Les caractéristiques mécaniques d'un acier pouvant être profondément modifiées en jouant sur le traitement thermique de la même façon, les cycles thermiques engendrés par l'opération de soudage vont modifier les propriétés de l'acier dans la zone affectée thermiquement et vont conditionner celles de la zone fondue. Généralement, on caractérise le cycle thermique de soudage par le temps qui s'écoule pour passer de 800 à 500 ° C (Δt 800/500) ou de 700 à 300°C (Δt 700/300). Ces critères ont été retenus parce qu'ils caractérisent les conditions de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite et doivent donc régir les transformations structurales.

Les principaux facteurs qui ont une influence sur le cycle thermique sont :

- l'énergie de soudage,
- la forme du joint,
- le procédé de soudage,
- l'épaisseur du métal de base,
- la température de préchauffage et la température entre passes.

I.5.2. Aspect chimique du soudage :

Constitution du métal fondu :

La composition chimique du métal fondu résulte du mélange du métal déposé par le produit de soudage avec le métal de base. La proportion de métal de base dans un cordon de soudure est caractérisée par le taux de dilution

$$\text{Taux de dilution} = \frac{\text{Surface (B)}}{\text{Surface (A + B)}}$$

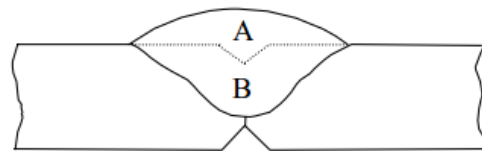


Figure I.9 : Influence du métal de base sur la composition du métal fondu.

I.5.3. Aspect thermomécanique du soudage :

Le caractère localisé de l'opération de soudage et le passage par l'état fondu suivi d'une solidification font intervenir deux comportements physiques importants à savoir le retrait à la solidification et la dilatation thermique qui agissent simultanément pour engendrer déformations et contraintes au niveau des joints soudés.

La prévention des déformations globales provoquées par le soudage et qui sont associées au retrait à la solidification et au refroidissement, pose des problèmes technologiques, mais il faut noter que tout empêchement à la déformation se traduit par la naissance de contraintes résiduelles supplémentaires. Les remèdes à la déformation sont donc, chaque fois que cela est possible, à rechercher dans un mode opératoire qui en réduit l'amplitude, plutôt que dans un effet de bridage des pièces à assembler.

Quant aux contraintes résiduelles, qui naissent au niveau des zones localement déformées à chaud, c'est-à-dire plastiquement, elles s'établissent au cours de refroidissement, affectent un

métal redevenu élastique, ce qui leur assigne une valeur maximale égale à la limite d'élasticité de ce métal. D'autre part, mais ceci ne concerne que certains aciers particulièrement trempant, il y a lieu de tenir compte des contraintes associées à la déformation martensitique [1].

I.6. Notion de métallurgie de soudage :

La métallurgie du soudage renseigne sur les caractéristiques d'un acier, qui sont fonction de sa structure, de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition de l'acier et du traitement thermique qu'il subit. Au cours du soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide, à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage.

On peut considérer quatre zones distinctes dans un joint soudé (figure.I.10) :

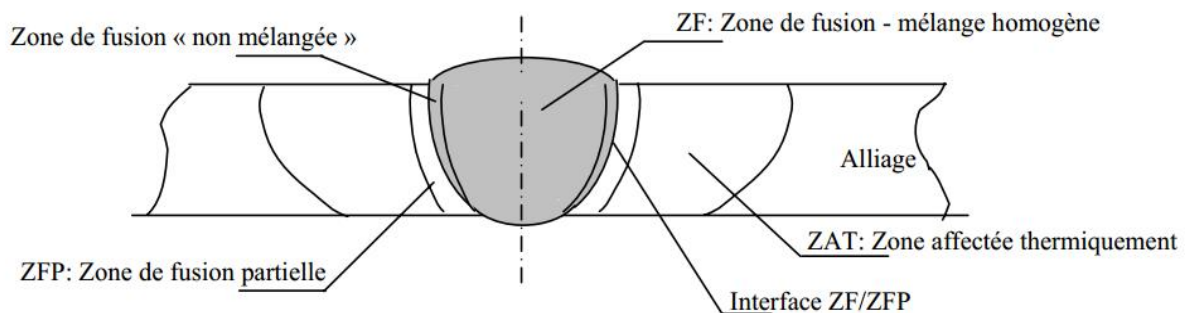


Figure I.10 : Présentation macrographique d'un joint soudé.

- Le métal de base (MB)
 - La zone affectée thermiquement (ZAT)
 - La zone de liaison (ZL)
 - La zone fondue (ZF)
- Métal de base (MB) : Le métal de base, est la partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
 - Zone affectée thermiquement (ZAT) : La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison ; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage

- Zone de liaison (ZL) : Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.
- Zone fondue (ZF) : Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification [9].

I.7. Les cycles thermiques de soudage :

Pendant que la source de chaleur (arc ou flamme) se déplace le long des bords à souder, le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale, puis se refroidit. L'apport localisé de la chaleur et l'écoulement de celle-ci engendrent des cycles thermiques qui permettent de connaître l'importance des modifications locales créées, donc d'évaluer selon le milieu et les conditions de service, la tenue des constructions soudées dans les zones ainsi affectées.

Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance pendant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage, il faut donc connaître le cycle thermique de soudage, c'est-à-dire la variation de la température Θ en fonction du temps.

La courbe correspondante $\Theta = f(t)$, tracée en un point A voisin d'une soudure (figure I.11) nous renseigne sur les grandeurs associées au cycle thermique.

- La température maximale atteinte Θ_m
- Le temps de séjour T_s au-dessus d'une température Θ_s
- Le temps de refroidissement entre deux températures Θ_1 et Θ_2
- $TR(\Theta_1, \Theta_2)$, ou la vitesse de refroidissement V_r à une température Θ_r [6].

Si on veut accéder à la répartition topographique des modifications de structure aux alentours de la soudure, il faut connaître les courbes qui traduisent la répartition thermique et en particulier la courbe $\Theta_m = f(x)$ (figure I.12) donnant la variation de la distance x parcourue de part et d'autre de la zone fondue. Chaque phénomène étant caractérisé, comme première condition, par la température Θ atteinte, on peut situer grâce à la courbe $\Theta = f(x)$, la limite extérieure de la zone où ce phénomène est susceptible de se produire. Ainsi se trouve définie d'une manière générale la zone affectée thermiquement (ZAT). La variation de la température en fonction du temps renseigne sur la nature des phénomènes qu'engendrent les cycles thermiques de soudage en chaque point voisin de la soudure, la répartition thermique pour une bonne interprétation de l'étendue et la topographie de ces phénomènes.

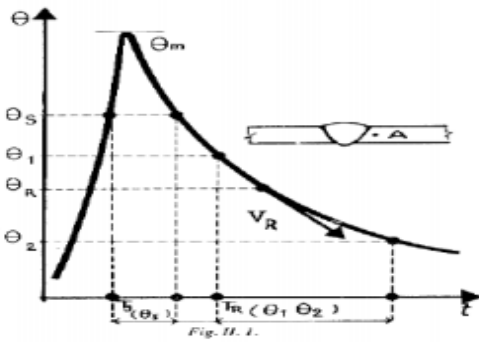


Figure I.11 : Cycle thermique de soudage.

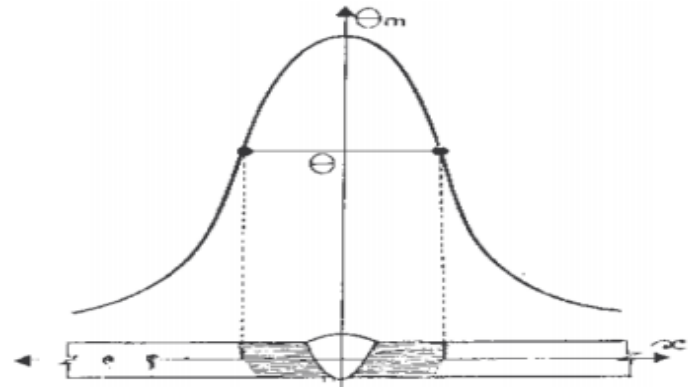


Figure I.12 : Répartition thermique
Dans une soudure.

I.8. Choix d'un procédé :

Selon la situation, le choix d'un procédé s'effectuera :

- par une analogie ou une extrapolation à partir d'une expérience déjà acquise que l'on adaptera ; c'est le cas de ce que nous appellerons les assemblages conventionnels ;
- par nouvelle évaluation.

Dans certains domaines où le soudage et les soudures sont fortement réglementés, le choix du procédé n'est généralement pas libre.

On peut à l'opposé, comme c'est surtout le cas dans les constructions dites légères ou de pièces généralement peu sollicitées, disposer d'une grande liberté de choix de la méthode et du procédé de soudage. Il faut alors adopter une approche qui inclut nécessairement la connaissance des possibilités des différents procédés [7].

I.8.1.Approche en fonction du domaine d'application :

On a coutume de distinguer trois grands domaines d'application du soudage :

- les produits semi-finis ;
- les fabrications mécaniques en général ;
- les composants de toutes sortes, se rapportant à deux sous-domaines relatifs respectivement aux pièces usinées et aux assemblages de tôles formées [7].

I.9. Conclusion :

Parmi les procédés de mise en œuvre des matériaux métalliques, le soudage se situe en première position. En effet, une grande partie des objets manufacturés qui nous entourent font appel à des technologies d'assemblage par soudage.

La connaissance de ces technologies permet d'améliorer et/ou de diminuer les coûts de fabrication. Le principal but de ce chapitre est de faire une introduction générale sur les procédés de soudage des matériaux métalliques. Dans un premier temps, une classification rapide de ces procédés est abordée, ainsi que la définition de différent procédé de soudage selon une application donnée.

Les procédés de soudage sont en constante évolution que ce soit du point de vue de la technologie des procédés ou de celui des domaines d'application.

Chapitre II

Les défauts de soudure

II.1. Introduction :

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

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

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

- Facteur technologique : facteurs associés à l'exécution des soudures.
 - Facteur métallurgique : facteurs associés à l'altération métallurgique due au soudage.
 - Facteur mécanique : facteurs associés au dimensionnement des cordons et aux tracés
- Des ensembles soudés [12].

II.2. Définition :

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

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

Un cordon bien exécuté doit présenter les caractéristiques suivantes :

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

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

II.4. Facteurs de défaillance des assemblages soudés :

II.4.1. Facteurs technologique :

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

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

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

II.4.2. Facteurs métallurgiques :

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

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

- L'adoucissement
- La trempe
- Le vieillissement
- La surchauffe
- La structure de solidification

II.4.3. Facteurs mécaniques :

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

II.5. Les principaux défauts de soudures :

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

II.5.1. Les inclusions gazeuses :

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

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

II.5.2. Les inclusions solides :

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

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

II.5.3. Les soufflures :

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

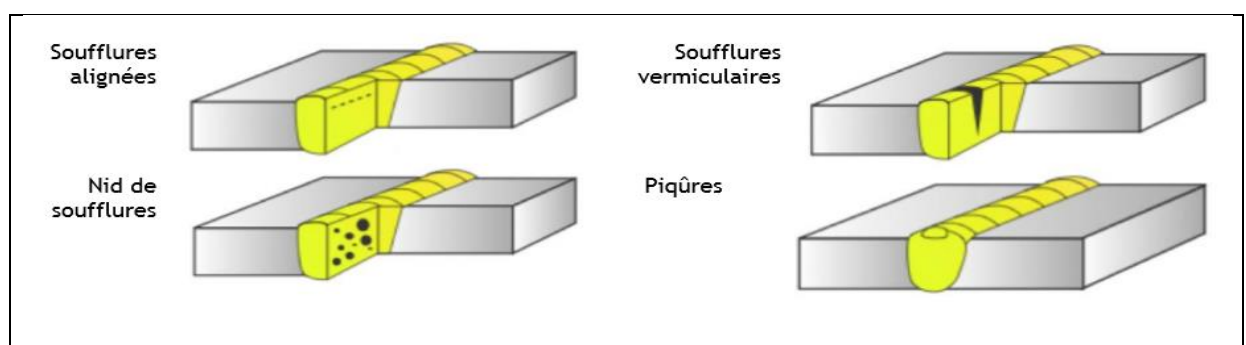


Figure. II.1 : Les différents types de soufflure.

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance 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.



Figure. II.2 : Exemple de soufflures.

II.5.4. Défauts de fusion (collage) :

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

II.5.4. 1. Localisations possibles des manques de fusion :

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

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

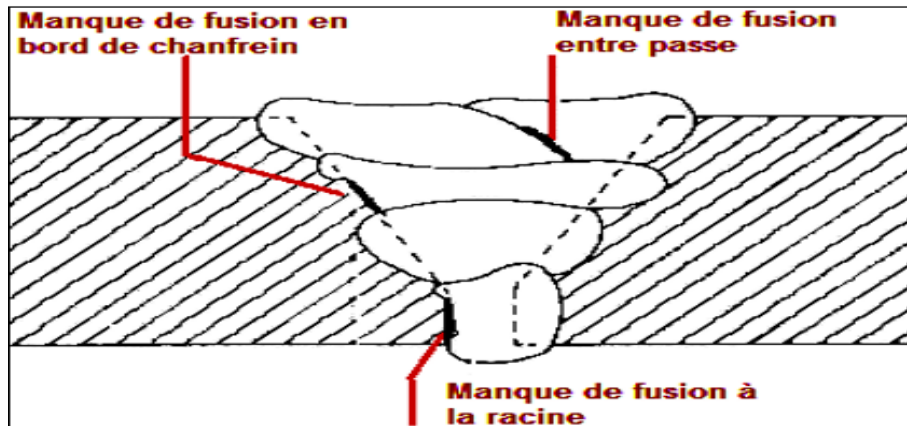


Figure. II.3 : Localisations possibles des manques de fusion.

II.5.4. 2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure :

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

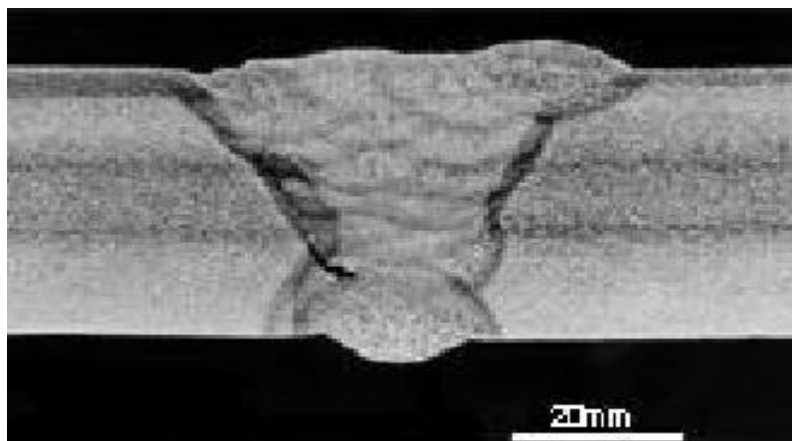


Figure. II.4 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

II.5.4.2.1. Causes possibles :

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

II.5.4.2. Mesures préventives :

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

II. 5.4.3. Manque de fusion entre passes :

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

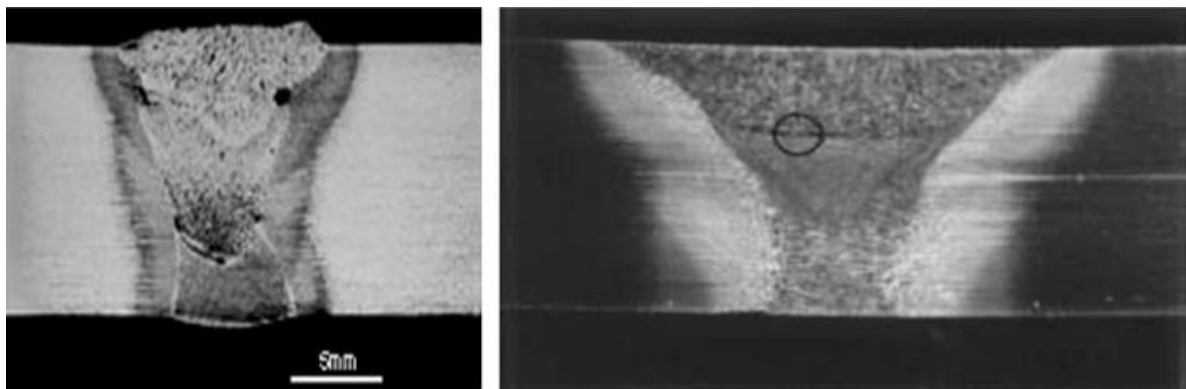


Figure. II.5 : Manque de fusion entre passes.

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

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

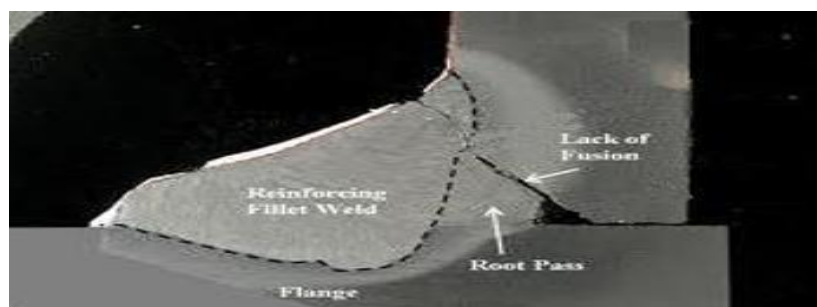


Figure. II.6 : Manque de fusion à la racine de la soudure.

II.5.5. Défauts de pénétration :

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

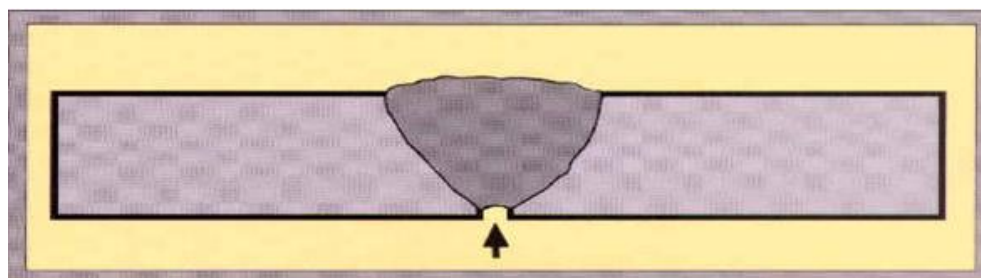


Figure. II.7 : Défaut manque de pénétration.

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

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

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

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

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

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

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

II.5.7. Retassures de cratère :

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

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

II-5.8. Effondrement à la racine :

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

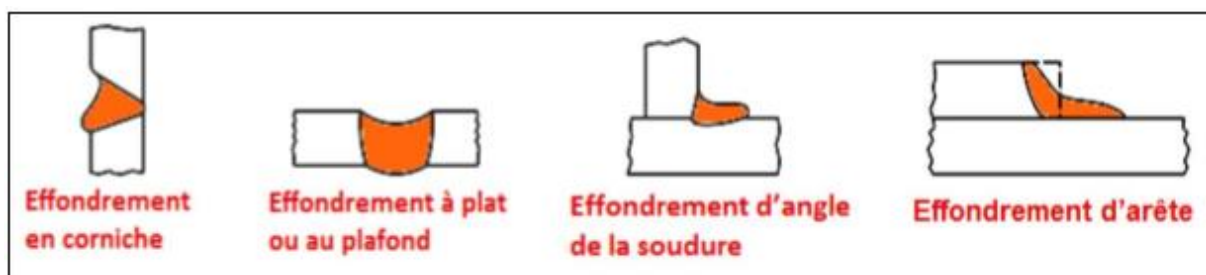


Figure. II.8 : Effondrement à la racine.

II.6. Fissurations :

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

- Dans la ZAT : la fissuration à froid surviennent après que le métal est refroidi (aussi appelée fissuration différée) et la fissuration au réchauffage.
- Dans la zone fondue : les fissurations à chaud, surviennent aux températures élevées sont relatifs à la solidification. Pour réduire ou écarter le risque de fissuration, le niveau de contraintes résiduelles doit être réduit au minimum en agissant sur les séquences de soudage, le taux d'hydrogène diffusible dans le bain de fusion aussi bas que possible et la durée de refroidissement (ΔT 800 - 500) suffisante pour l'obtention d'une structure favorable.
- Dans le métal de base : l'arrachement lamellaire.

II.7. Orientation des fissures :

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

II.7.1. Les fissures longitudinales :

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

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

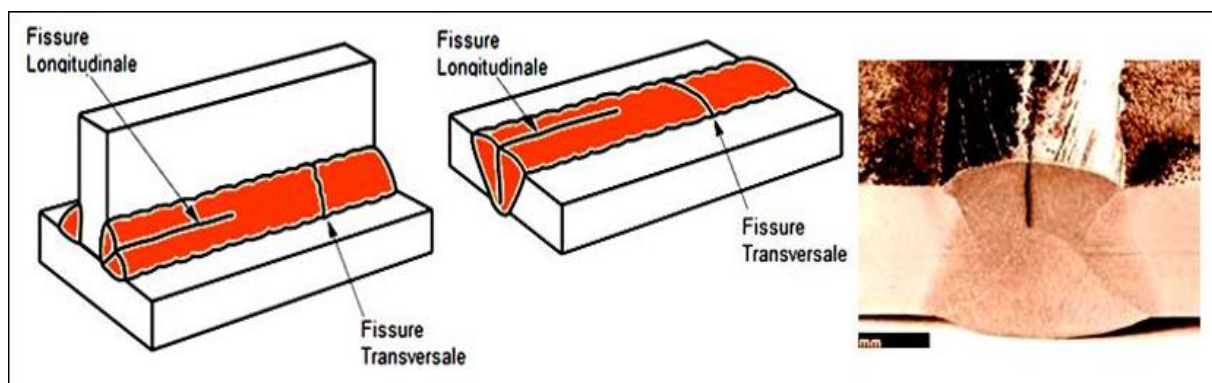


Figure. II.9 : La fissure longitudinale.

II.7.2. Les fissures transversales :

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

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

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



Figure. II.10 : La fissure transversale.

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

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

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

II.8. Types des fissures :

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

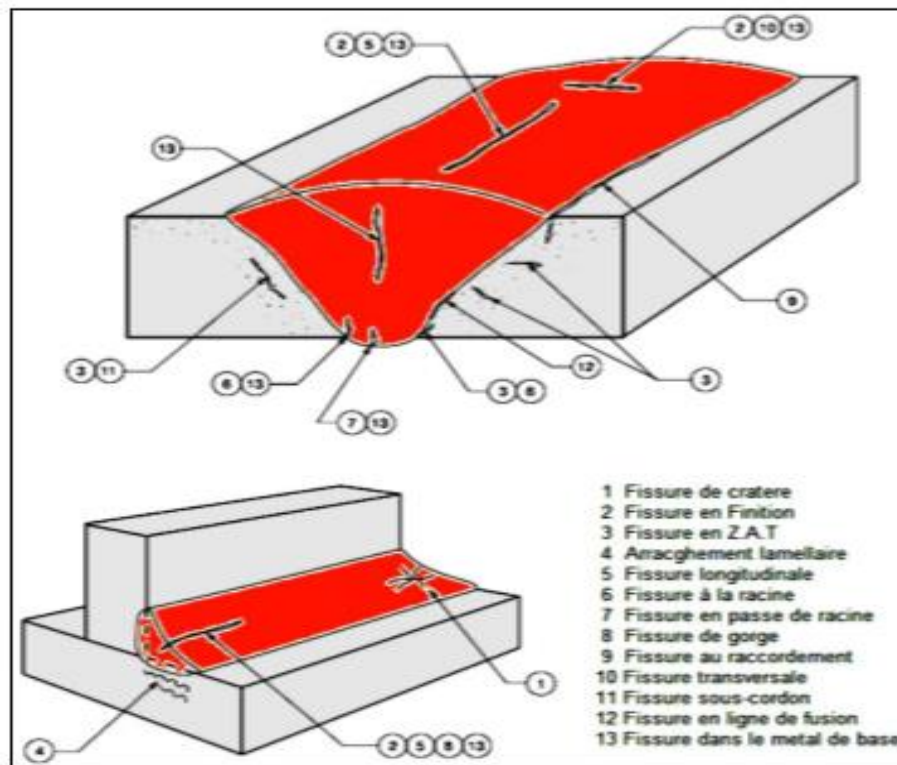


Figure. II.11 : Les types de fissure.

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

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

II.8.1. Fissuration à chaud :

II. 8.1.1. Définition :

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

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

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

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

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

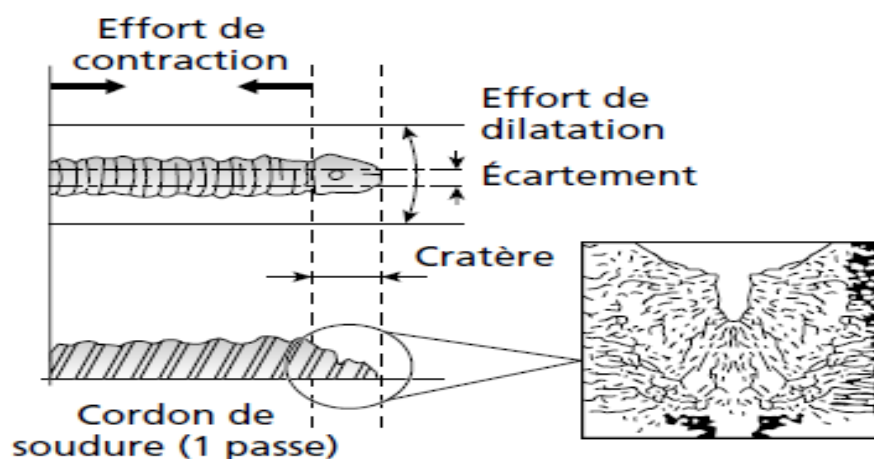


Figure. II.12 : Fissure de cratère.

La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud, car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques (Figure. II.13) [12].

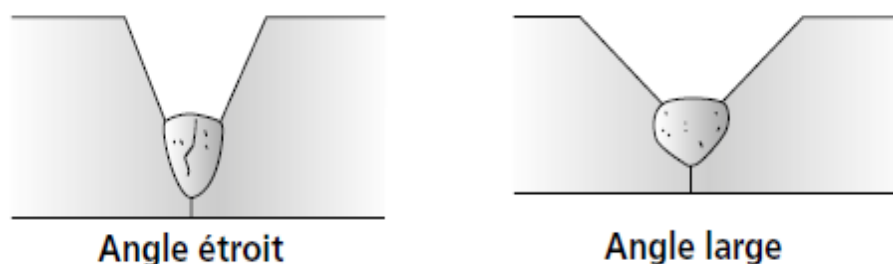


Figure. II.13 : Préparation d'un joint pour la prévention de la fissure à chaud .

II.8.1.2. Causes possibles :

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

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

Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température.

C'est un effet défavorable de la préchauffe.

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

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

-**Transformations allotropiques** : on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier ; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles.

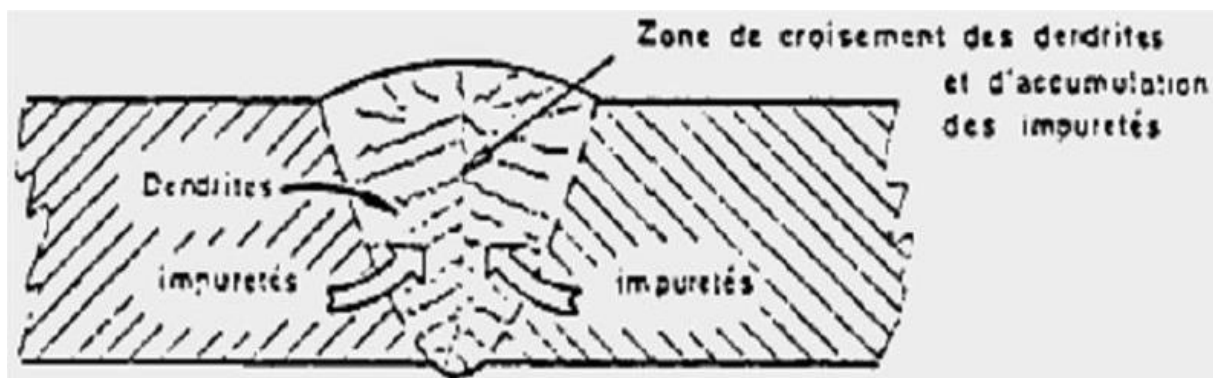


Figure. II.14 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

II.8.2. Fissuration à froid :

II.8.2.1. Définition

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

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

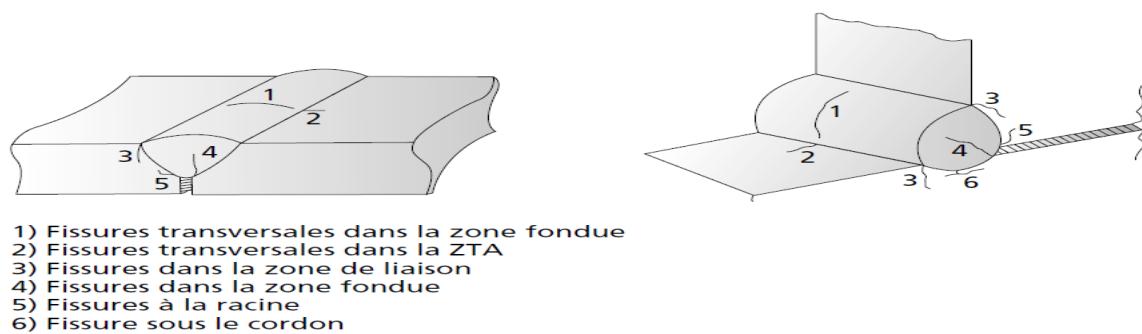


Figure. II.15 : Types de fissures à froid.

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

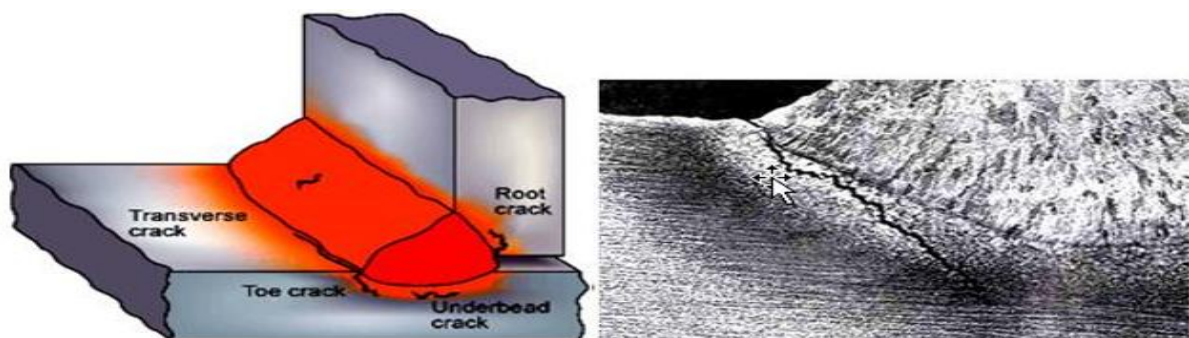


Figure. II.16 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

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

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

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

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

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

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

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

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

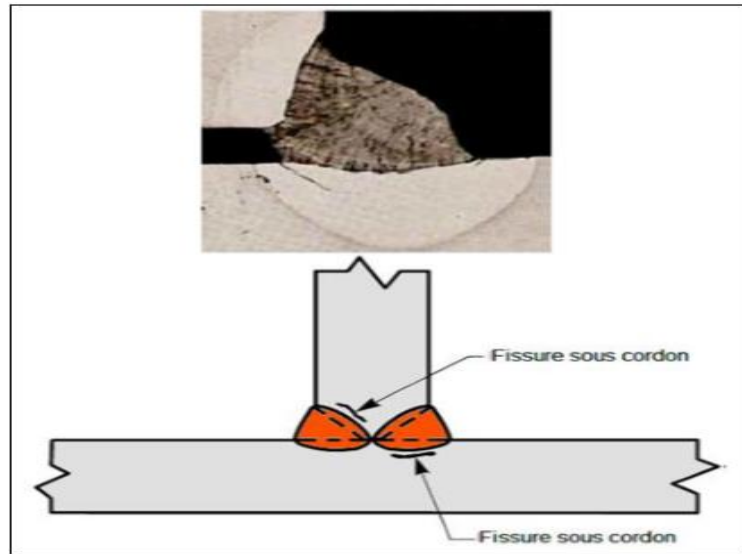


Fig. II.17 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

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

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

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

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

Le taux de diffusion peut être approximé à :

- 450°F, l'hydrogène diffuse à un taux de 1 pouce/h.

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

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

II.8.4. Fissures par arrachement lamellaire :

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

Les fissures de ce type sont conséquence d'une fissuration qui se produit parallèlement à la « peau » d'un produit laminé, au droit d'une soudure sollicitant le joint soudé dans la direction de l'épaisseur.

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

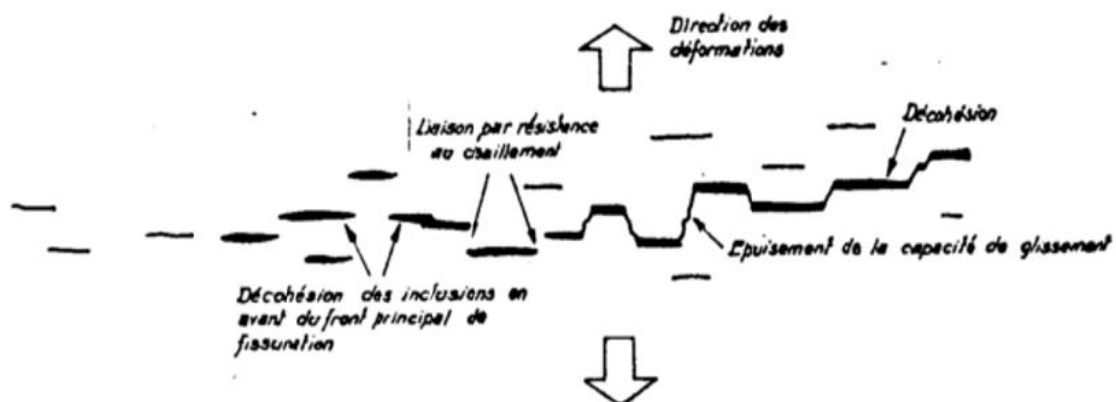


Fig. II.18 : fissure par arrachement lamellaire dans le métal de base.

II.8.4.1. Identification :

Aspect Visuel :

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

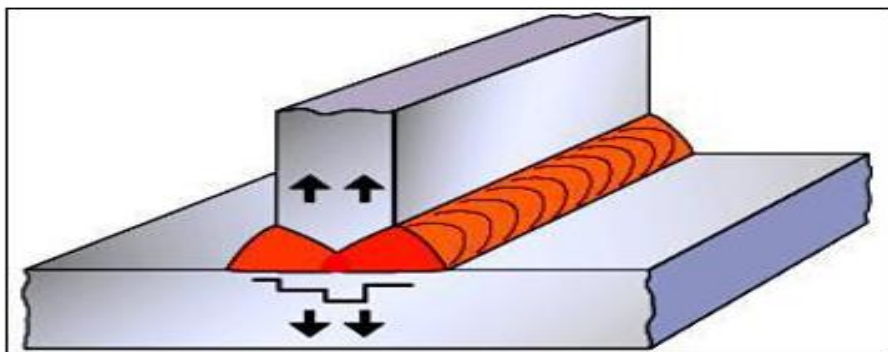


Fig. II.19 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.

II.8.4.2. Surface de Rupture :

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

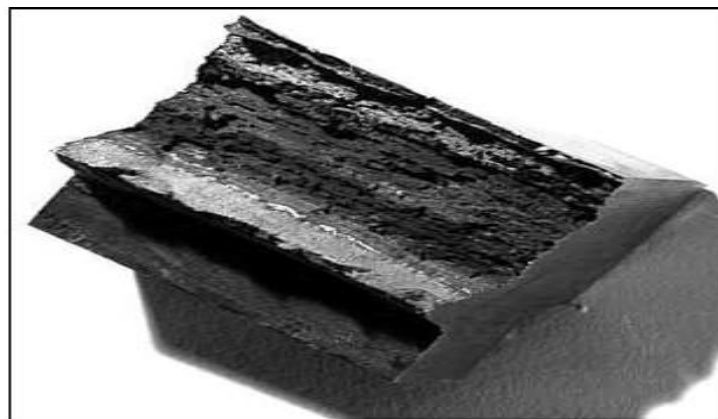


Fig. II.20 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.

II.8.4.3. 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.

II.8.4.4. 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].

II.9. 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

III.1. Introduction :

Le Contrôle Non Destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours

De la production, soit en cours d'utilisation, soit dans la phase de maintenance.

Les termes « Essais Non Destructifs » (END) ou « Examens Non Destructifs » évoquent aussi le diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient. Le même principe appliqué aux pièces industrielles consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour apprécier sans destruction leur état de santé et formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées.

Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition de CND suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps, des lois générales de la mécanique de la rupture et, dans la pratique, les spécialistes en contrôle non destructif sont plutôt confrontés à des problèmes d'interprétation de résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce.

Une définition des contrôles non destructifs plus proche de la réalité industrielle consiste donc à dire qu'il s'agit de « qualifier, sans nécessairement quantifier, l'état d'un produit, sans altération de ses caractéristiques par rapport à des normes de recette ». L'exécution de cette tâche demande une bonne connaissance des méthodes d'investigation mises en œuvre, de leurs limites et surtout une adéquation parfaite entre le pouvoir de détection de chacune d'elle et les critères appliqués pour la mise en œuvre [21, 22,].

III.1.2. Bref historique :

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif (CND) constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Aussi l'histoire des essais non destructifs (END) commence-t-elle avec celle de la physique moderne à la fin du XIX^e siècle découverte des rayons X, des courants de Foucault, de la piézoélectricité, etc...

Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du (CND) ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures. Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des END s'est manifesté ensuite vers les années 60/70 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que le génie des centrales électriques nucléaires, l'aéronautique civile, les gazoducs, oléoducs et les plates-formes offshore.

La dernière décennie enfin voit l'émergence des techniques de (CND) qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide des contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique, comme les contrôles optiques [26].

III.2. Généralités sur le contrôle non destructif :

III.2.1.Principe:

L'ensemble des techniques et procédés de (CND) aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif d'elles qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et/ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné.

Généralement on peut distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la technique d'inspection employée :

- 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.

III.2.2. Principes de détection des défauts. Différentes techniques du(CND) :

III.2.2.1. 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 [26].

III.2.2.2. 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 classer 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.

- 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 [26].

III.2.2.3. 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 [26].

III.2.3. 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...).

III.2.4. Procédure de (CND) :

L'opération de contrôle non destructif 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 et 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.

Ce sont des opérations d'étalonnage, de calibrage, de balayage de la sonde, de traitement des données qui permettent d'atteindre ces objectifs désormais dans des bonnes conditions, grâce à l'apport intensif de l'informatique en temps réel, on peut représenter la mise en œuvre d'un système CND suivant le synoptique de la(figure III.1.)

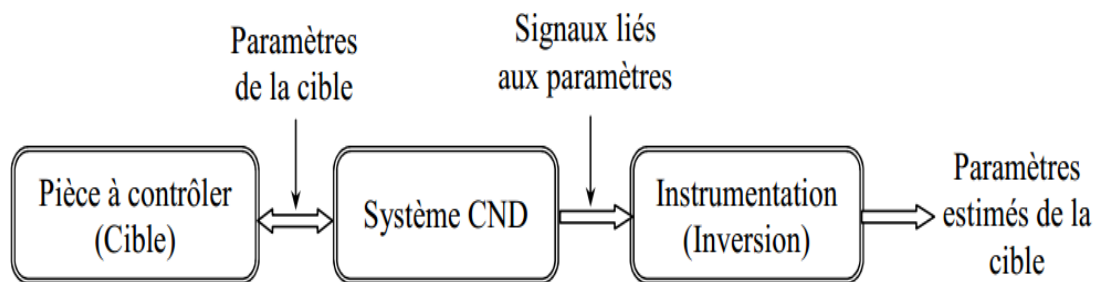


Figure. III.1 : Schéma synoptique d'un système de (CND).

La cible se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système (CND) adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape « d'inversion », plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce [21, 23, 28].

III.3. Les techniques de contrôle non destructif :

Il existe plusieurs techniques de CND, peuvent être classées comme suit :

III.3.1. Examen visuel :

L'inspection visuelle est la plus ancienne procédure de contrôle, continu à développer dans une société américaine d'évaluation des méthodes de contrôle non destructif (ASNT). Cette procédure d'évaluation est la plus simple et générale. L'examen visuel nécessite un bon éclairage localisé sur les régions suspectes. Les résultats prospères ont dépendu de la compétence de l'opérateur, le bon nettoyage, illumination adéquate de la zone inspecté et la qualité de l'instrument optique. Ces facteurs sont encore importants aujourd'hui, mais le matériel est devenu beaucoup plus sophistiqué. Habituellement, l'inspection visuelle ne peut pas être utilisée pour vérifier des résultats de test, ni ce peut être utilisé pour remplacer d'autres méthodes de CND. Cependant, quand l'examen visuel direct ne peut pas être fait, les instruments optiques sophistiqués peuvent être utilisés pour fournir une inspection éloignée de régions critiques [21, 24, 28].

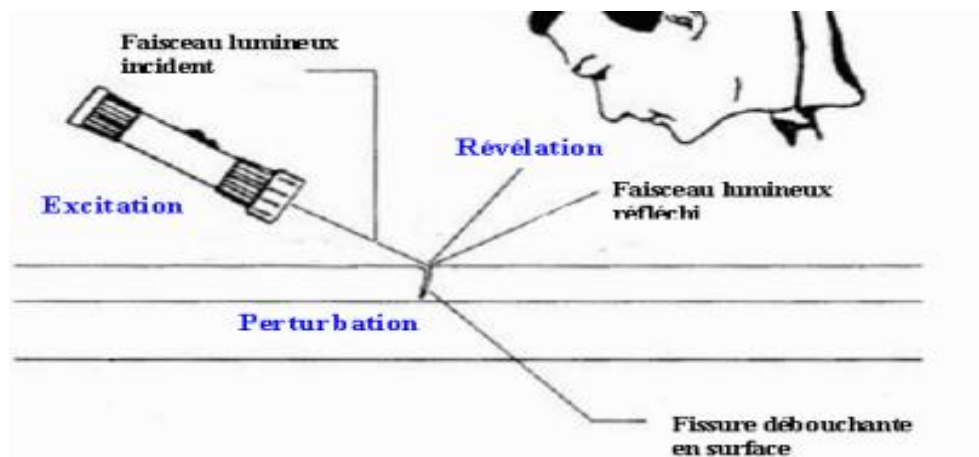


Figure. III.2 : principe de l'examen visuel.

- Avantages
 - Examen simple, rapide et pas coûteux.
 - Souplesse d'inspection.
- Inconvénients.
 - Détection limitée aux défauts superficiels.

- La surface doit être propre.
- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.

III.3.2. Ressuage :

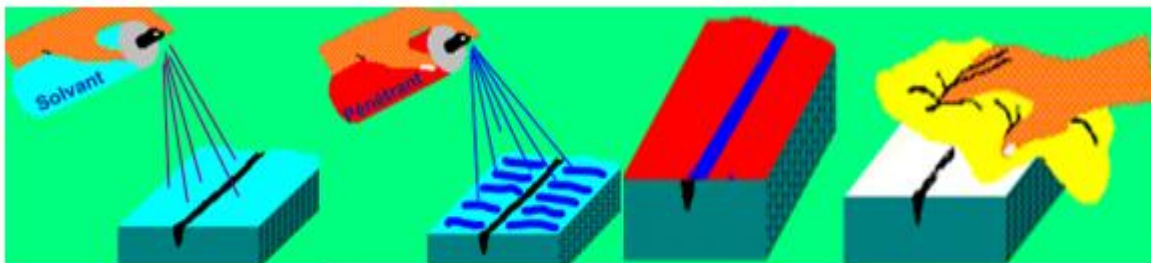
La méthode « huile et poussière de craie », autrefois utilisée par les industries ferroviaires dans les années 1920. Le contrôle par liquide de pénétration (ressuage) a été ranimé en 1941 par Robert et Joseph Switzer. Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste l'amélioration de l'inspection visuelle de défauts. Il consiste à l'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 [21, 24, 27,].

➤ Avantages

- Facilité de mise en œuvre et relativement sensible aux fissures débouchant ;
- Appliqué sur les matériaux diélectriques et non ferromagnétique.

➤ Inconvénients

- Limite de l'application sur les matériaux non poreux ;
- L'interprétation des résultats est subjective : Il est impossible de déterminer les dimensions exactes des défauts ;
- Danger des solvants toxiques, corrosifs et inflammable.



a) Nettoyage préalable

b) application du pénétrant et imprégnation

c) élimination du pénétrant

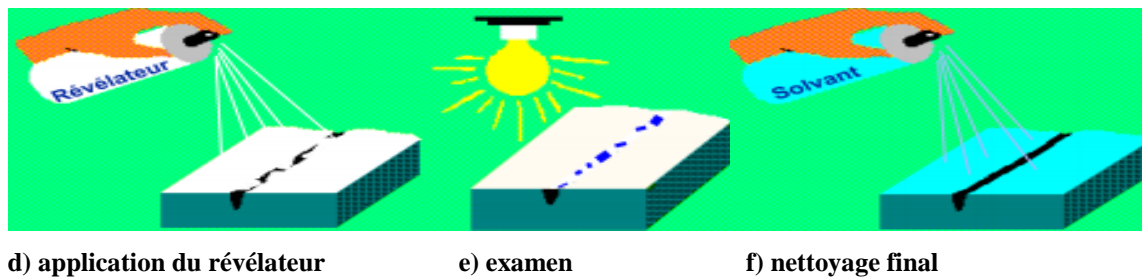


Figure.III.3 : principe de contrôle par Ressuage.

III 3.2.1. Méthode de contrôle :

Préparation de la surface :

La surface de la pièce doit être débarrassée de tout corps susceptible :

- D'empêcher l'étalement du liquide pénétrant,
- De retenir ce même produit dans la phase de nettoyage,
- De boucher les défauts recherchés

Il faut donc éviter la présence de rouille ou calamine (rétention du pénétrant), de produits gras ou peinture.

Phase d'imprégnation :

Les produits pénétrants doivent être très mouillants et comporter des éléments (pigments colorés ou fluorescents) qui faciliteront la détection lors de la phase finale.

L'application du liquide pénétrant peut se faire

- Par pulvérisation (pistolet, bombes aérosols),
- Au trempé,
- Au pinceau.

La durée d'application est un paramètre très important de cette opération. Des temps de l'ordre de 10 à 30 min sont généralement nécessaires.

Il existe des produits pénétrants pouvant être utilisés sur pièces chaudes (jusqu'à 200°C).

Phase de pénétration :

C'est la phase qui traduit l'interaction du pénétrant avec le matériau. Les phénomènes qui expliquent la remontée du liquide dans le défaut sont

- L'effet capillaire,
- La diffusion (liée à la mouillabilité),

- L'adsorption (adhérence du liquide dans l'anfractuosité du défaut).

Les paramètres influençant cette phase sont :

- La géométrie du défaut et son état de surface,
- La nature du produit pénétrant et ses caractéristiques physico-chimiques (masse volumique, tension superficielle, viscosité).

Phase de nettoyage :

Cette phase permet d'enlever l'excédent de pénétrant. Il existe trois possibilités :

- Le rinçage à l'eau
- Le rinçage avec un solvant spécifique,
- Le rinçage avec un émulsifiant.

Cette phase est importante et délicate car elle doit :

- Éliminer toute trace de liquide pénétrant à la surface de la pièce,
- Ne pas éliminer le pénétrant du défaut.

Les principaux paramètres sont :

- La nature du produit de nettoyage,
- Le mode et le temps d'application du produit de rinçage,
- La vérification de l'efficacité du rinçage,
- Les conditions de séchage après rinçage.

Dans tous les cas, on ne peut passer à la phase suivante tant que les surfaces ne sont pas sèches.

Application du révélateur :

Cette application doit se faire immédiatement après le nettoyage sur des surfaces parfaitement sèches. Le produit révélateur est souvent constitué d'une poudre blanche très fine que l'on applique par pulvérisation à sec ou en suspension dans un liquide volatil.

Observation du résultat :

La révélation des défauts se fait plus ou moins rapidement suivant la quantité de pénétrant présent dans les défauts. Le relevé des positions doit se faire dès le début de l'apparition des "indications". Ce temps peut aller de quelques minutes à une demi-heure pour les très petits défauts.

Selon le type de liquides pénétrants, l'examen se fait :

- À la lumière naturelle ou artificielle pour les produits colorés,
- À la lumière UV pour les produits fluorescents.

III 3.2.2. Procédure de contrôle :

La mise au point d'un contrôle par ressuage réclame la détermination précise :

- Des conditions de préparation de la pièce,
- De la nature des produits de ressuage,
- Des conditions d'application du pénétrant,
- Des conditions de nettoyage,
- Des conditions d'application du révélateur,
- Des conditions d'examen.

➤ **Choix des produits en fonction des exigences :**

Le choix d'une procédure pour le contrôle par ressuage d'une pièce est essentiellement

- fonction de deux natures de paramètres :
- Des paramètres liés à la pièce elle-même à contrôler, tels que :
- L'état de surface : rugosité et coloration...
- La nature de l'alliage : acier ordinaire ou inoxydable, alliage léger titane
- Le type de procédé de fabrication : coulé, forgé, laminé, soudé.
- La température de la pièce.
- La nature des défauts recherchés (fins ou grossiers),
- Le nombre des pièces à contrôler.

III.3.3. Essais ultrasonores :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel présentant une certaine élasticité. Les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15kHz à plus de 100MHz. L'ultrason est basé sur la transmission, la réflexion, et l'absorption d'une onde ultrasonore, qui se propage dans la pièce à contrôler (figure III.4). Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur qui joue souvent le rôle d'un émetteur/récepteur. L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut [21, 28].

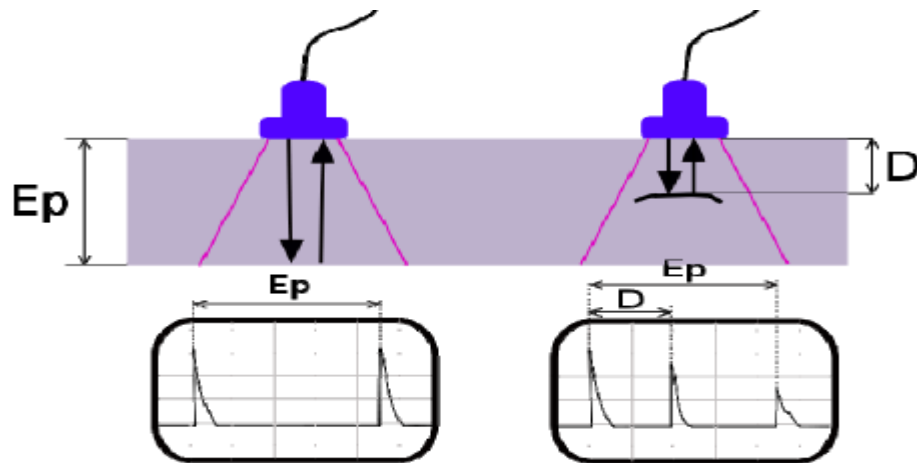


Figure. III.4 : principe du contrôle par ultrasons.

➤ **Avantage :**

- Grand pouvoir de pénétration (plusieurs mètres dans l'acier forge).
- Haute sensibilité de détection de défauts, notamment pour la recherche des défauts plans (dépend de la fréquence de l'onde ultrasonore) ;
- Détection, localisation et dimensionnement des défauts ;
- Inspection et détection en temps réel.

➤ **Inconvénients :**

- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts.
- Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle).
- Inspection limitée par la complexité de la forme de la pièce contrôlée.

III.3.3. Nature des ultrasons :

Les ultrasons sont des vibrations élastiques d'origine mécaniques qui se propagent Dans un milieu matériel.

Les ultrasons sont de même nature que le son mais de fréquence plus élevé.

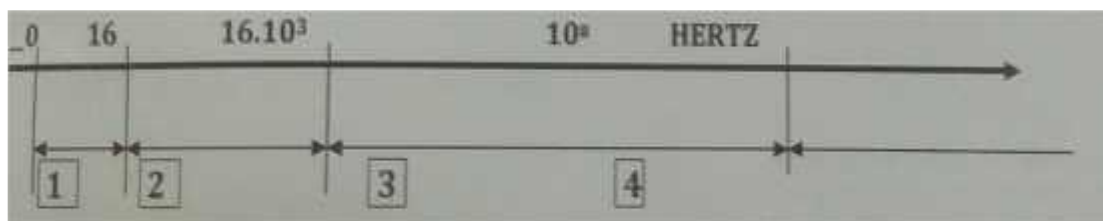


Figure.III.5 : nature des ultrasons.

- 1). Domaine des infrasons, (inaudible) de 0 à 16 Hz
- 2). Domaine des sons, (audible) de 16 à 16.10
- 3). Domaine des ultrasons, (inaudible)
- 4). Domaine des hyper son, (inaudible)

En CND on utilise la bonde de 0.5 à 25 MHz.

III.3.3. Production des ultrasons de fréquence élevés :

On part par des oscillations électriques pour les traduire ensuite en vibrations mécanique, La piézoélectricité est pratiquement la seule méthode utilisée dans l'industrie. [30]

Principe de la piézoélectricité :

- **Effet direct** : une action mécanique provoque l'apparition d'un dipôle électrique dans chaque maille cristalline d'un matériau, par déplacement des centres des charges positives et négatives.
- **Effet inverse** : l'application d'une certaine tension entre les faces métallisées du

Cristal le dilate ou le contracte suivant le sens de la tension appliquée.

Une tension de 500 volts par exemple provoque une contraction d'une lame de quartz.

II.3.3.1. Fonctionnement d'un appareil à ultrasons :

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

Le contrôle par ultrasons utilise généralement les blocs d'étalonnage V1 et V2. Les normes NF A 09-310 et NF A 09-315 ont respectivement pour objet de définir les caractéristiques et de décrire les méthodes d'utilisation des blocs d'étalonnage A et B. [30].

II.3.3.2. Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2 :

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

L'écrouissage après usinage doit être minimale et la rugosité Ra inférieure à 3.2 μm .

Le bloc d'étalonnage V1 est le plus complet. Il existe un modèle réduit et léger appelé V2 pour les applications sur chantier [30].

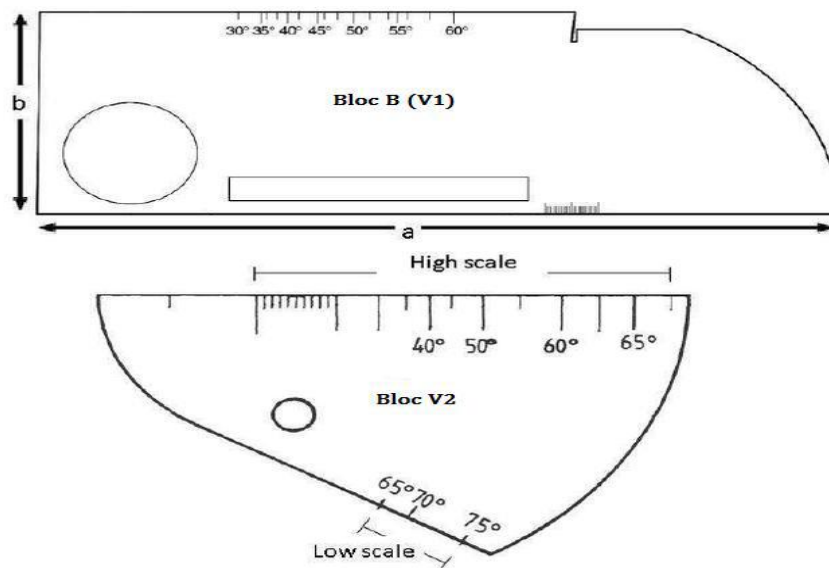


Figure. III.6 : bloc des étalonnages.

Dimensions des blocs de référence V1 et V2 (en mm)		
Épaisseur	25	12.5
Rayon de courbure	100	50
Largeur b	100	
Longueur a	300	

Avant tout contrôle d'une pièce, il est nécessaire d'étalonner la base de temps du générateur à ultrasons et les caractéristiques du palpeur. Les blocs d'étalonnage sont utilisés pour déterminer le point d'émergence du traducteur, l'angle de réfraction. Le réglage est plus précis lorsque le matériau à contrôler ne diffère pas de celui du bloc (acier ferritique faiblement allié).

II.3.3.3 : Principe de la méthode :

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

- Méthode par transmission
- Méthode par réflexion

II.3.3.4. Examen par transmission :

Il nécessite l'utilisation de deux palpeurs : l'un émetteur et l'autre récepteur qui reçoit la quasi-totalité de l'énergie acoustique émise. Si un défaut se trouve dans le parcours du faisceau ultrasonore, l'énergie est partiellement ou totalement occultée [29].

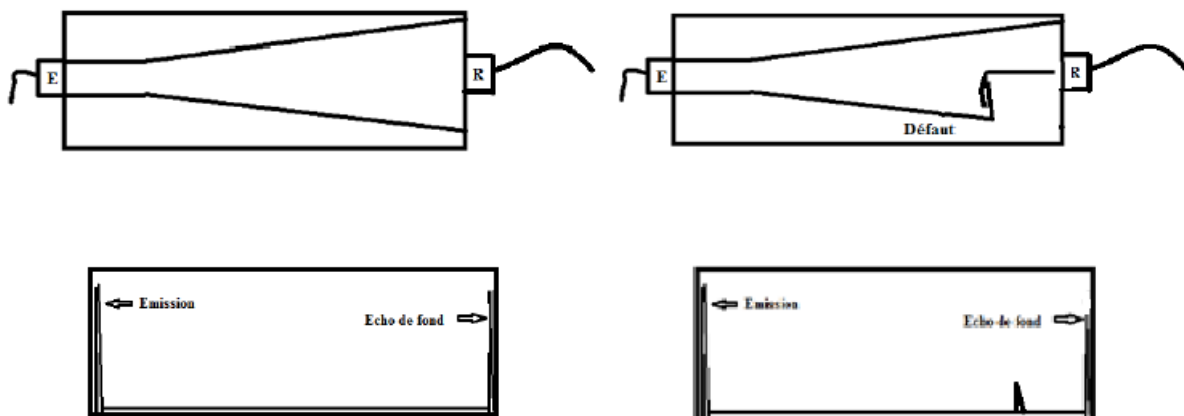


Figure III.7 : Examen par transmission.

II.3.3.5. Examen par réflexion :

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

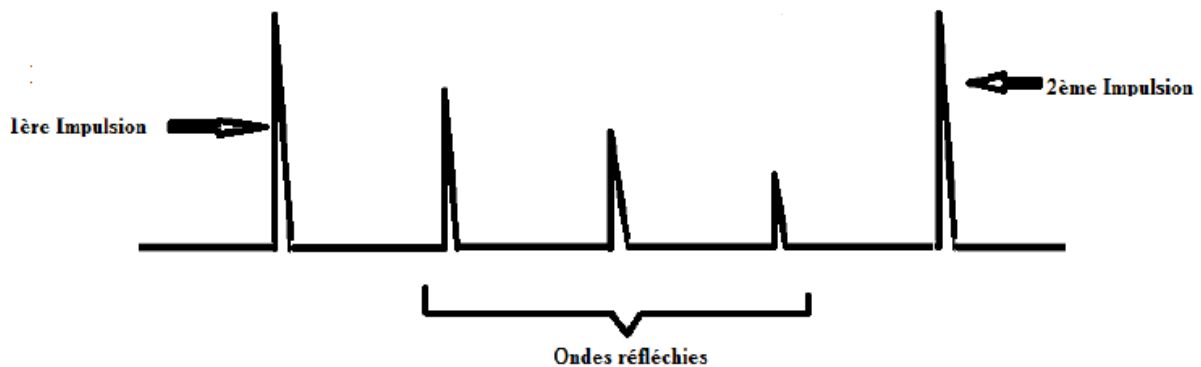


Figure III.8 : Examen par réflexion.

La méthode permet de détecter un défaut à condition qu'il présente une surface réfléchissante normale au faisceau ultrasonore (réflexion spéculaire), sinon l'onde réfléchie revient au palpeur mais faiblement (l'écho n'est pas observé). L'étalonnage correct de la base de temps de l'écran de l'oscilloscope de l'appareil à ultrasons permet de déterminer la position du défaut [29].

III.3.4. Radiographie :

L'examen d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique (rayons X ou γ) de très courte longueur d'onde comprises entre environ 0,1pm et 1000pm, et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure (III.9). On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire, cette dernière requise en contrôle non destructif se situe dans une gamme allant de 50keV à 20MeV. L'interaction entre les rayons X ou γ et la matière implique les phénomènes suivants :

- un effet photoélectrique, correspondant à un transfert complet d'énergie entre le photon Incident et un électron, conduisant à son absorption totale et éventuellement à une Réémission de fluorescence X. Cet effet est d'autant plus grand que l'énergie des photons est basse.
- l'effet Compton, correspondant à un transfert partiel d'énergie du photon vers un Électron ; les photons sont déviés, alors que les électrons activés provoquent une émission Secondaire ; cette diffusion Compton devient prépondérante, vers 1meV, vis-à-vis de L'effet photoélectrique et constitue le phénomène prédominant en radiographie industrielle ;

- la formation de paires électron-positron par annihilation des photons, avec émission de rayonnement secondaire hétérogène ; ce phénomène a fondamentalement un seuil énergétique à 1,02MeV et n'intéresse donc que les hautes énergies.

Ces trois phénomènes d'interaction expliquent d'une part l'absorption des rayons X et γ par la matière, mais aussi un phénomène de diffusion dû aux réémissions d'ondes de plus basse énergie que l'onde incidente. Ce dernier phénomène est très gênant en radiographie, alors que l'on met en œuvre le premier pour détecter et visualiser les défauts.

Dans la pratique, le choix entre radiographie X ou gammagraphie résulte de multiples considérations liées aux avantages et inconvénients de chacune de ces techniques, comme par exemple : taille et coût modeste des sources γ , forte pénétration de ces rayonnements mais durée d'exposition beaucoup plus longue qu'en radiographie X qui elle, par contre, nécessite la présence d'une source électrique mais offre l'avantage de pouvoir choisir plus aisément les paramètres de contrôle [21, 23, 24].

➤ Avantages

- Contrôle des objets de forme compliquée ;
- Facile à Transporté (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radioactive portatifs) ;
- Apprécier la nature et la taille des défauts.

➤ Inconvénients

- L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur ;
- Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel ;
- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité ;
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.

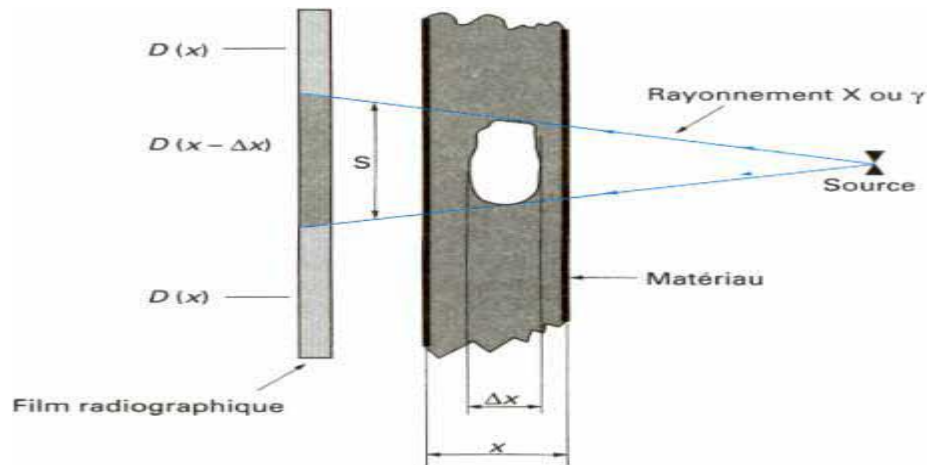


Figure. III.9 : Inspection par radiographie.

III.3.5. Magnétoscopie :

Le contrôle par magnétoscopie fait appel aux propriétés magnétiques du matériau inspecté. L'effet de dispersion du flux de fuite peut être mis en évidence en aspergeant la surface contrôlée d'une liqueur magnétique constituée de très fines particules ferromagnétiques et d'un liquide porteur (poudre de fer ou de magnétite colorée). Les particules noires ou fluorescentes viennent s'agglomérer sur le champ de fuite, à l'endroit du défaut, le rendant ainsi parfaitement visible, comme l'illustre la figure III.10 [21, 24, 25].

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

➤ Avantages

- Simple, peu coûteux et rapide ;
- Détection des défauts débouchant et sous-jacents.

➤ Inconvénients

- Applicable seulement aux matériaux ferromagnétiques ;
- Aimantation dépend de la perméabilité de la pièce examinée ;
- La sensibilité de détection des défauts dépend en effet de la nature, de la direction et de l'intensité de la magnétisation de la pièce.

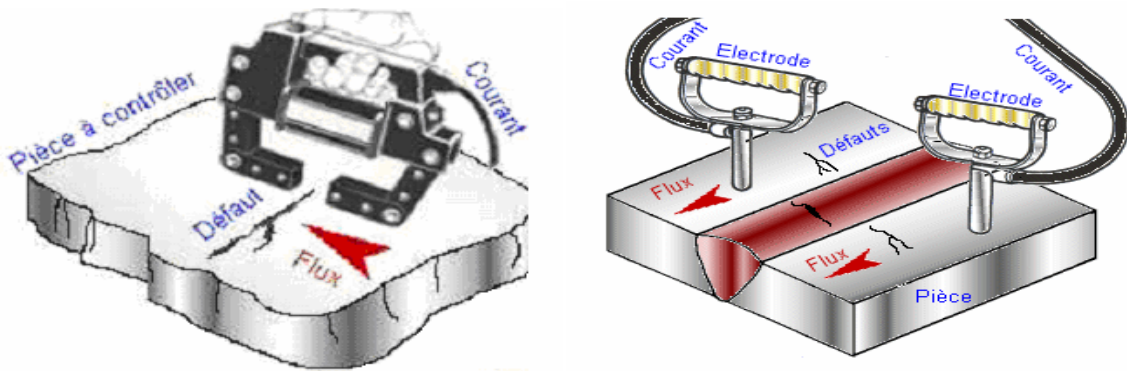


Figure. III.10 : Inspection par Magnétoscopie - Electroaimant.

Domaine d'application

L'examen magnétoscopique s'applique aux matériaux ferromagnétiques (aciers non austénitiques, fonte, nickel, cobalt)

Il est destiné principalement à la détection des défauts superficiels débouchant ou sous-cutanés. Cette technique est couramment employée sur pièce réelle ou sur chantier pour l'examen des réservoirs, des citernes, des pipelines, des plateformes pétrolières.

III.3.6. 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 [22,25, 28].

La (figure III.11) représente le procédé de l'inspection par courants de Foucault.

➤ Avantage :

- Simple, peu coûteux et rapide ;
- Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...) ;

- Evaluer le dimensionnement et la profondeur d'un défaut ;
 - Pas des conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement ;
 - Inspection sans contact ;
 - Efficacité de la technique malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre ;
 - Automatisation possible pour des pièces de géométrie constante (tubes, barres, rubans et câbles).
- Inconvénients :
- La profondeur d'inspection et dépend de la fréquence d'excitation ;
 - La détection du défaut se fait d'une manière locale ;
 - Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs ;
 - La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts ;
 - La compétence et la formation sont exigées pour le personnel d'inspection ;

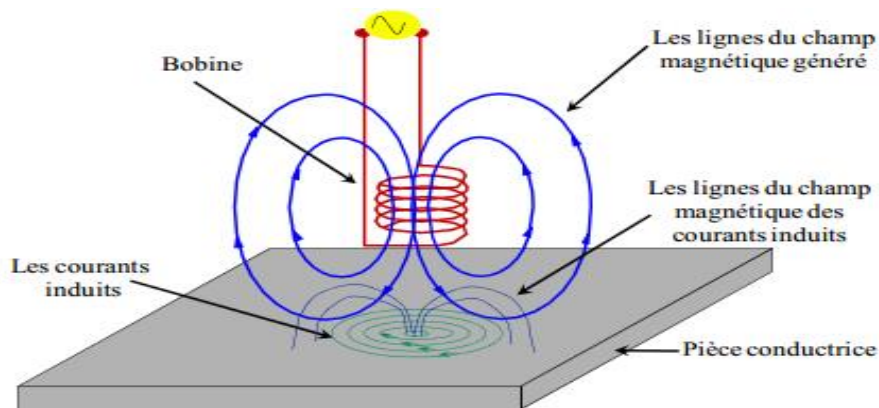


Figure. III.11 : Inspection par Courants de Foucault.

III.3.7. 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 [23, 25].

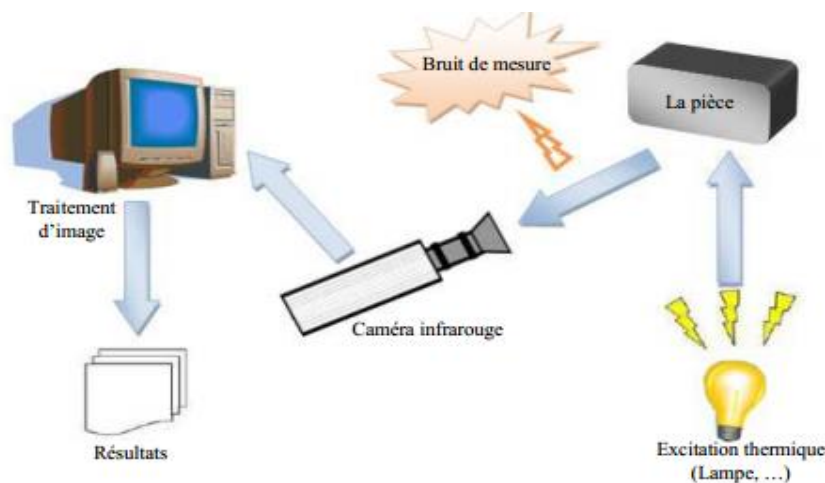


Figure. III.12 : Inspection par thermographie.

➤ **Avantage :**

- Méthode relativement rapide et sans contact ;
- Toute l'épaisseur de la pièce est généralement contrôlée ;
- Les cavités (champs de bulles d'air, fissures, délaminages, ...) Sont bien détectées ;
- La sensibilité à la détection des défauts de faibles dimensions ;

- L'archivage des résultats est garanti à l'aide de la caméra infrarouge.
- Inconvénients :
 - Des difficultés de mesure liées aux effets perturbateurs ;
 - Des difficultés de localisation de la profondeur des défauts, du fait que l'image obtenue donne une projection de ces derniers sur le plan de la pièce testée ;
 - L'interprétation des mesures pas toujours facile, surtout pour identifier la nature des défauts ;
 - La phase d'interprétation des résultats présente des restrictions pour une automatisation totale de la technique.

III.4. Utilisation des procédés de (CND) :

Au-delà de la mise en œuvre propre à chacun des procédés de contrôle décrits plus haut, un projet ou une réelle opération de contrôle implique un certain nombre de considérations et de facteurs dont l'ignorance pourra conduire à des échecs tels qu'une mauvaise fiabilité de la méthode, du matériel utilisé ou des résultats annoncés, ou encore une rentabilité économique insuffisante de l'opération de contrôle, ces deux aspects allant d'ailleurs souvent de pair. C'est ainsi qu'il s'agit en fait de prendre en compte, non seulement les paramètres physiques et techniques mais aussi l'importance du facteur humain et des procédures d'emploi, et la nécessité éventuelle d'avoir à financer des travaux préalables de mise au point ou de faisabilité du procédé retenu.

III.5. Les procédures d'emploi :

Des procédures précises et bien suivies doivent guider l'utilisation des procédés dans une opération de contrôle. Elles permettent de garantir l'objectivité, la reproductibilité, les performances limites, sinon la fiabilité totale d'un contrôle. Les procédures doivent être établies tant pour le matériel utilisé que pour les paramètres et conditions de son utilisation. Elles résultent généralement d'un accord commun entre les diverses parties concernées par le contrôle ; elles sont nombreuses mais on cherche en fait à éviter la confusion en édictant des normes et spécifications à caractère plus général. Il en est ainsi, par exemple, pour les procédures de qualification des palpeurs ultrasonores, pour les étalons de certains défauts artificiels, pour le réglage des paramètres des appareillages de contrôle à ultrasons, à courants de Foucault (choix de la fréquence, du seuil de détection significatif, etc...). Les spécifications

peuvent de même concerner le choix du procédé, de la méthode, de la préparation de la pièce à contrôler, de la façon d'effectuer les sondages lorsqu'il s'agit d'un contrôle purement manuel, enfin de la façon d'interpréter et de consigner les résultats obtenus. Le contrôle automatique n'exclut pas totalement la notion de procédure qui, dans ce cas, doit concerner plus spécialement les étalonnages et le réglage du matériel [26].

III.6. 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***

IV.1. 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. [40]

IV.2. préparation des échantillons :

IV.2 .1. Premier échantillon :

IV.2.2. Présentation du matériau Acier ordinaire S 235 JR (E24) :

Acier de construction non allié d'usage général, non destiné aux traitements thermiques. Pièces mécaniques peu sollicitées et ne nécessitant pas de ténacité spéciale.

IV.2.3. Domaines d'utilisation

Eléments de fixation, axes, arbres de transmission, construction métallique.... Eléments mécano - soudés, bâtis de machine, pièces diverses ne nécessitant pas de caractéristiques particulières Soudabilité bonne (pour acier non - effervescent)

IV.2.4. Caractéristiques mécaniques et chimique de l'acier :

AFNOR	DIN	AISI	NF EN 10 027-1
E24	ST 37-2		S 235 JR

*propriétés mécaniques moyennes :

R Mpa N/mm ²	Re Mpa N/mm ²	A %	Dureté HB
340/510	≥175/235	17/26	

*composition chimique %

C	S	Mn	P	N
0.17 Maxi	0.045 Maxi	1.40 Maxi	0.045 Maxi	0.009 Maxi

IV.2.5. Préparation des éprouvettes :

L'acier A33 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°.

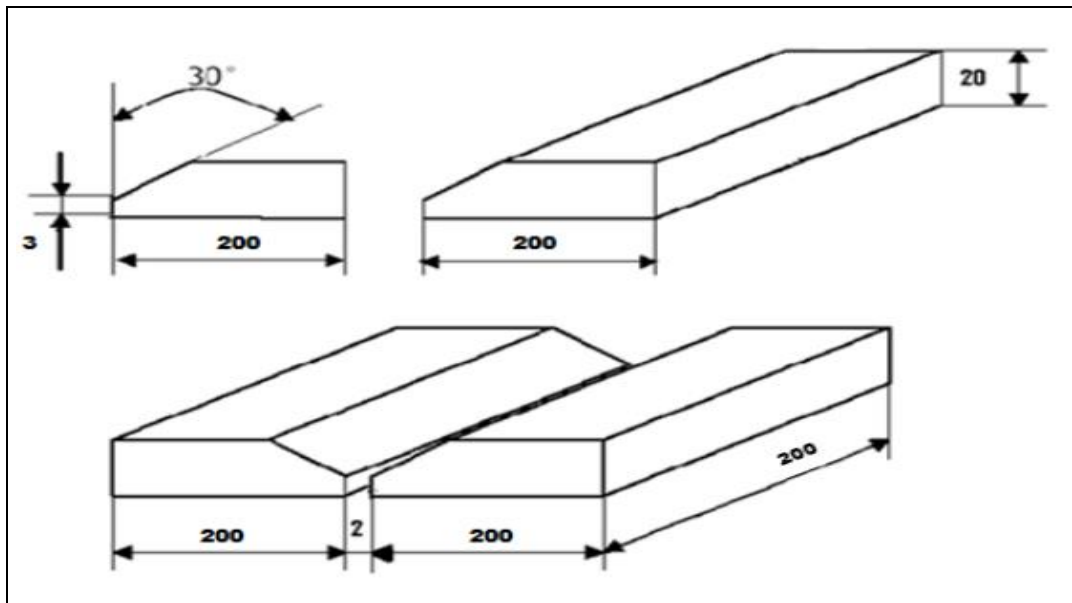


Figure. IV.1 : Schéma de principe pour l'assemblage bout à bout des deux métaux de base acier E33 sous forme de tôles fortes de 20 mm d'épaisseur.

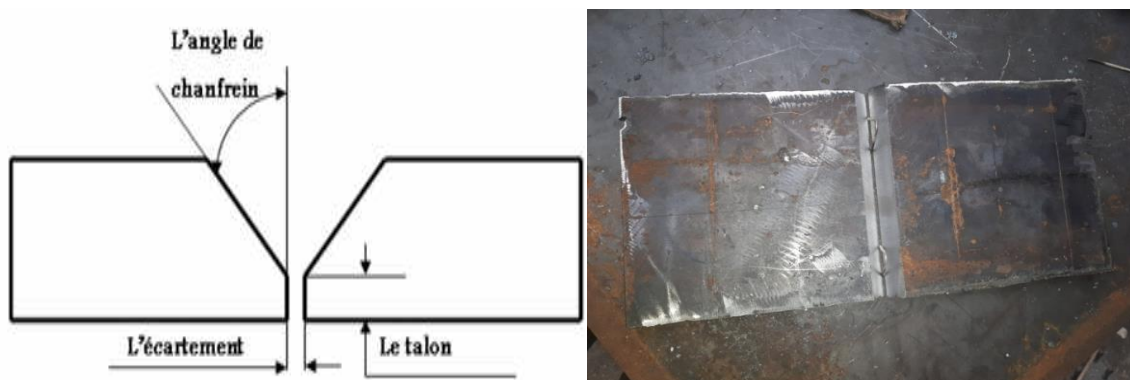


Figure IV.2 : le croquis du chanfrein.

Figure IV.3 : réalisé par fraisage un chanfrein à 30°.

- Ecartement des bords : 4mm
- Angle du chanfrein : 30°
- Talon : 3mm.

IV.2.6. Présentation du métal d'apport :

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

E7018 est une qualité d'outstanding 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.

IV.2.7. 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 1-2 hords avant la soudure, 2.5mm qu'un devrait être fait par 350 degrés alors soit tenu pendant 1 heure.

IV.2.8. composition chimique du métal d'apport :

Données techniques :

Composition chimique de métal déposé (%) :

	C	Manganèse	SI	S	P	Cr	Ni	v
Standard	≤0.15	≤1.60	≤0.075	≤0.035	≤0.040	≤0.20	≤0.30	≤0.08
Typique	0,068	1,36	0,51	0,010	0,016	0,047	0,022	0,014

Propriétés mécaniques de métal déposé :

	Limite élastique ReH (MPA)	Rm de résistance à la traction (MPA)	Élongation A 5 (%)
Standard	≥ 375	490-660	≥22
Typique	440	540	30

IV.2.9. Le procédé du soudage utilisé :

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.

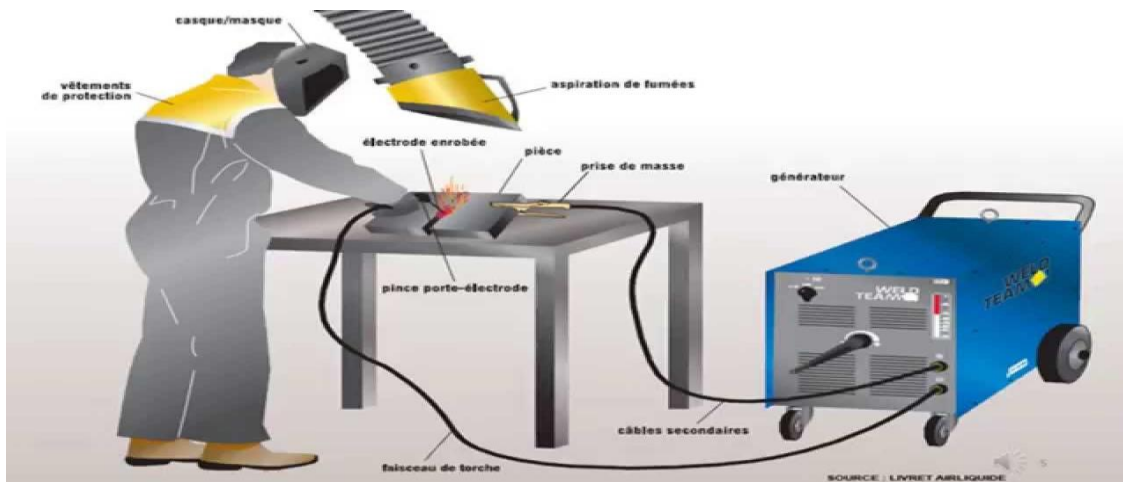


Figure IV.4 : le principe de Soudage à l'arc avec électrode enrobée.

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.

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 IV.1 : paramètres de soudage.



Figure IV.5 : Forme de l'échantillon avant et après le soudage.

IV.3. Deuxième échantillon :

Nous avons utilisé les mêmes méthodes que le premier échantillon :

Préparer deux pièces en fonte sous forme ronde fortes d'épaisseur 17 mm (FigureIV.6)

- Nous avons réalisé avec sur un coté de chaque plaquette un chanfrein à 30° et un talon 2mm
- Le soudage bout à bout des deux plaquettes chanfreinées à 30°
- Le soudage utilisé par (MEI) dans ce travail est du type soudage à l'arc avec électrode enrobage Graphite diamètre (3.25*350mm), cette électrode est SOF510. Electrode alliée au Nickel pour le soudage de la fonte



Figure IV.6 : Forme de l'échantillon avant soudage.

IV.4. Contrôle par (CND) :

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

- 1- Contrôle par ressuage ;
- 2- Contrôle par ultrason ;
- 3- Contrôle par magnétoscopie ;

IV.4.1. Contrôle par Ressuage :

Le ressuage est un procédé de contrôle non destructif. Au niveau du soudage, il permet d'observer des défauts débouchant tels que des piqures, fissures, retassures...

Un liquide pénétrant et coloré ou fluorescent est infiltré dans les défauts, puis ensuite mis en valeur par un produit révélateur.

IV.4.1.1. Mode Opérateur du ressuage :

IV.4.1.2. Nettoyage des pièces :

- Nettoyer, dégraisser et sécher les pièces à traiter.



Figure IV.7 : nettoyage de la pièce.

- L'utilisation de produits nettoyant est une opération préliminaire à l'opération de ressuage,
- L'objectif est d'obtenir une surface propre pour permettre au pénétrant de s'infiltrer dans les défauts.

- L'opération de nettoyage consiste à enlever toute crasse, graisse, trace de repérage, huile ou autre substance pouvant masquer les indications du test à l'aide d'un chiffon blanc propre, sec, non pelucheux imbibé d'un solvant fourni par un fabricant agréé.

IV.4.1.3 Application du pénétrant :

Appliquer un produit pénétrant. Le produit pénétrant peut être coloré ou fluorescent. Ce produit a pour particularité de pouvoir s'insérer par capillarité dans les interstices les plus fins. Beaucoup de produits pénétrants sont de couleur rouge. Au niveau de la sécurité, il est important de rappeler que ce produit est inflammable et parfois nocif (prendre des dispositions de sécurité pour effectuer un contrôle avec cette méthode : masque, s'éloigner des poste à souder, ...). Les produits fluorescents sont utilisés sous rayons ultra-violet pour la détection. Certains pénétrants sont à post-émulsion et auront une opération supplémentaire d'émulsification avant le rinçage.

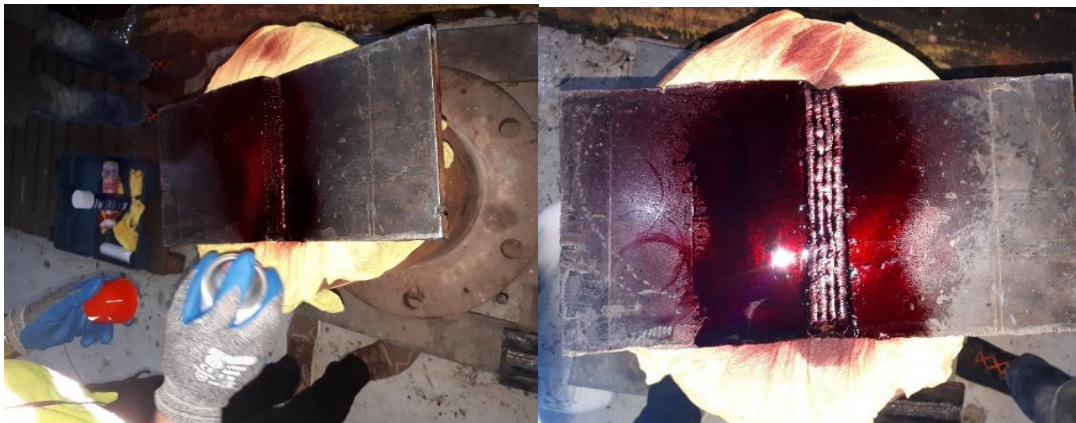


Figure IV.8 : Application du produit ressuage Rouge.

Application du pénétrant rouge suivant la sensibilité de l'examen, pour un temps d'imprégnation de 20 minutes.

IV.4.1.4. Élimination de l'agent pénétrant en excès :

Après avoir appliqué l'agent pénétrant et le temps spécifié, il faudra enlever l'excédent du pénétrant restant sur la surface à l'aide des chiffons blancs, secs et propres non pelucheux ou par un papier absorbant, ou par un pistolet air- eau à condition que la pression d'eau ne doive pas dépasser 2 bars.



Figure IV.9 : Élimination du produit de ressuage rouge.

IV.4.1.5. Application de l'agent développant (Révélateur) :

L'application du révélateur ne doit être effectuée que sur une surface sèche (non mouillée).

Appliquer le révélateur immédiatement, pulvériser le révélateur sur la surface concernée, À une distance de 25 cm de la surface et pour avoir une couche uniforme.

Une quantité trop faible peut être insuffisante pour extraire l'agent pénétrant.



Figure IV.10 : application du révélateur.

Application du révélateur en fine couche uniforme. L'interprétation des indications se fait immédiatement et durant les 30 minutes suivantes.

IV.4.1.6. L'Interprétation des Défauts :

IV.4.1.6.1. Premier échantillon :

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

- de forme arrondie
- de forme linéaire



Figure IV.11 : les défauts détectés dans la pièce après ressuage.

Conclusion :

- Apparition de quelques souffleurs éparpillés sans incidences sur le joint de soudure.

Parce que, l'importance du défaut est caractérisée par la grosseur de l'indication

IV.4.1.6.2. Deuxième échantillon :

Pour le deuxième échantillon le contrôle a révélé la présence d'une fissure débouchant.



Présence de la fissure
débouchant

Figure IV.12 : pièce à contrôle par ressuage.

- **Conclusion :**
- **Apparition de fissure débouchant claire sur le joint de soudure.**

IV.4.1.6.3. 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).

IV.4.2. Contrôle par magnétoscopie :

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

IV.4.2.1. 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 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 électroaimant ou si sa forme l'exige, en déplaçant un électroaimant le long de la zone à contrôler

IV.4.2.2. Mise en œuvre :

La technique nécessite trois étapes pour sa mise en œuvre :

IV.4.2.3. 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 IV.13 : Application d'une couche de peinture blanche.

IV.4.2.3.1. 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.



Figure IV.14 : Application du champ magnétique.

IV.4.2.3.2. 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 IV.15 : Contrôle par magnétoscopie.

Résultat :

Pour le premier échantillon, ce contrôle n'a révélé aucun défaut.

- Pour le deuxième échantillon le contrôle a révélé la présence d'accumulation de particules causé par des fissures débouchants



Figure IV.16 : pièce à contrôlé par magnétoscopie.

OBSERVATION :

- **Observation des fissures débouchants sur le joint de soudure.**

IV.4.3. Contrôle par ultrasons :

IV.4.3.1. 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.

IV.4.3.2. 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 oscillations mécaniques.

➤ **Un palpeur (ou des palpeurs) :**

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.

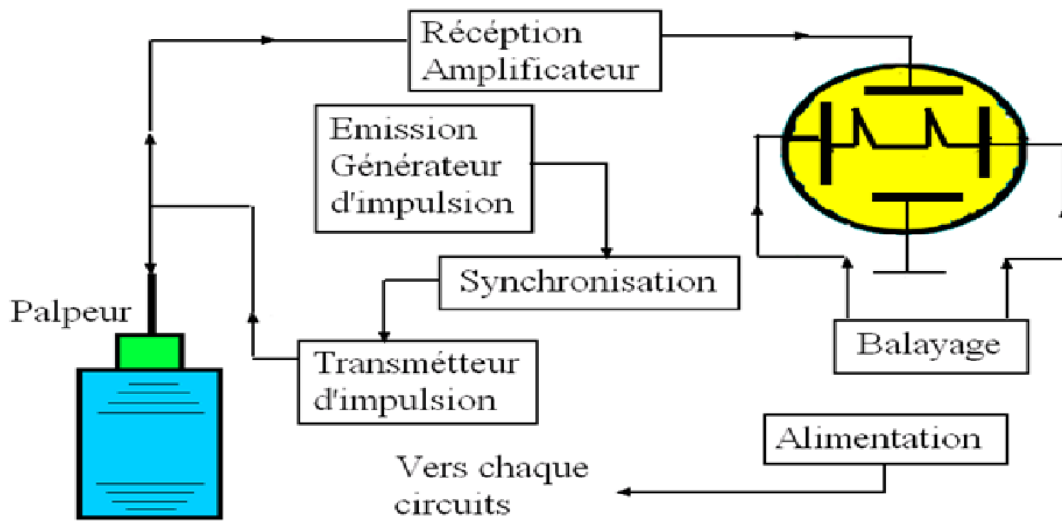


Figure IV.17 : chaînes de mesure de contrôle par ultrason.

IV.4.3.3. 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

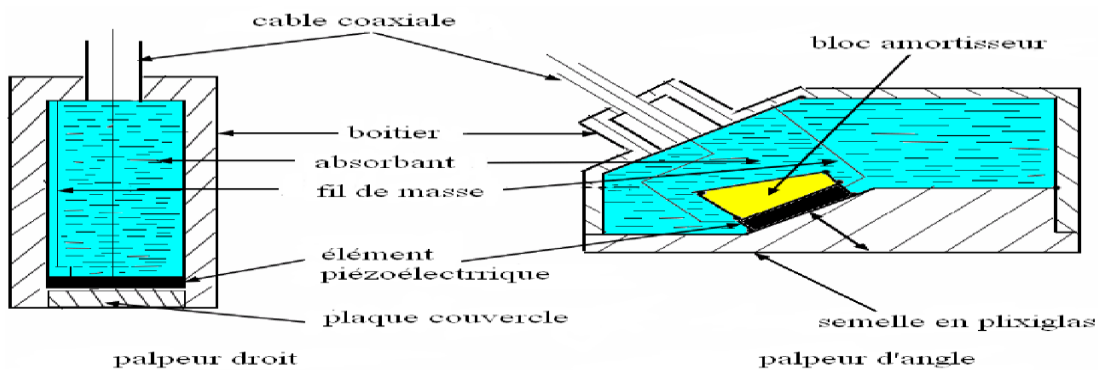


Figure IV.18 : élément des palpeurs.

IV.4.4. Les type des palpeurs :

L'utilisation des ultrasons pour le contrôle des pièces de formes complexes nécessite la conception de palpeurs parfaitement adaptés. [32].

- Palpeurs droits ou normaux
- Palpeurs doubles monoblocs
- Palpeurs d'angle

IV.4.4.1. Le choix du palpeur :

Il est guide par son utilisation ultérieure, et les Considérations essentielles sont :

- **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.

- **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.

IV.4.5. Méthode de contrôle :

IV.4.5 .1.Méthodes par réflexion ou par écho :

En utilisant un appareil ultrasonore contient 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. [33-30].

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

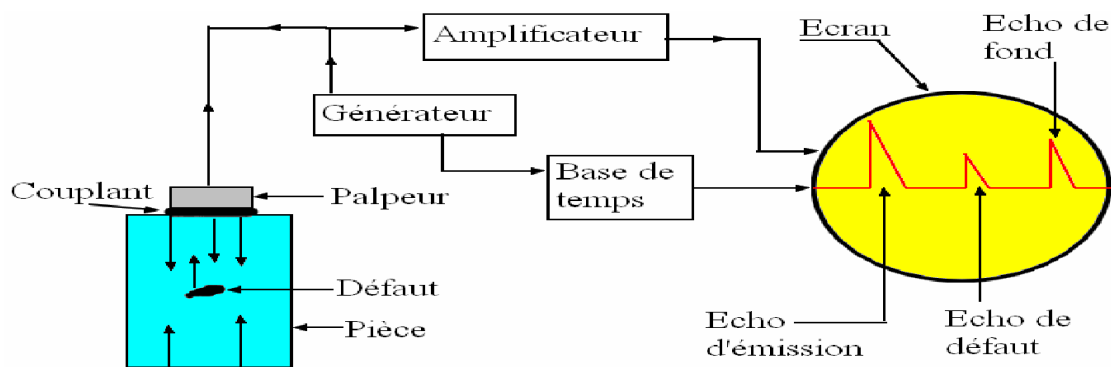


Figure IV.19 : méthode de contrôle par réflexion.

IV.4.5.2. 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.

IV.4.5.3. 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.

IV.4.5.3.1. Les couplants les plus utilisés :

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

IV.4.6. 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 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].

IV.4.6.1. Caractéristiques du bloc d'étalonnage :

a) 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.

IV.4.7. Paramètres à régler avant l'examen :

a) Détermination de l'axe de soudure :

Pour repérer les distances utilisées pendant l'examen, il faut déterminer un repère, souvent l'axe des soudures.

b) 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).

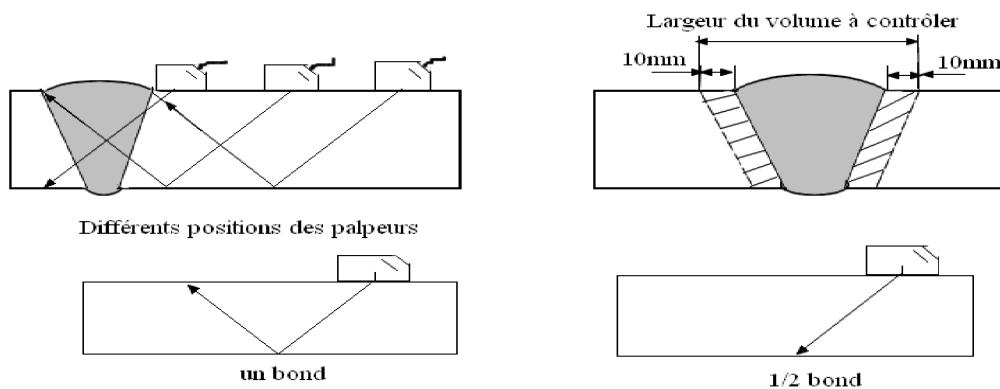


Figure IV.20 : le volume à contrôler.

c) Préparation des surfaces d'examen :

Elles doivent être assez larges pour couvrir le volume à contrôler, lisses, exemptes d'impuretés susceptibles de perturber le couplage du traducteur ou de gêner le déplacement du palpeur.

IV.4.7.1. Evaluation des indications :

Lors de l'examen, pour chaque indication égale ou dépassant le seuil de notation, on doit effectuer :

- La détermination du pouvoir réfléchissant maximum.
- La localisation.
- L'évaluation de la longueur.
- La classification en indication volumique ou non volumique.
- L'appréciation de la hauteur (si requise).

IV.4.8. Pratique du contrôle :

Le matériel utilisé :

- **Appareil à ultrasons** : Sonatest D-10+.
- **Producteur** : sofranel « Allemagne ».
- **Traducteurs** : -palpeur droit émetteur-récepteur, $\varnothing 10$, 4MHz.
-palpeur à angle émetteur-récepteur, « 45°, 60°, 70° », 4MHz, 8×9
- **Blocs d'étalonnages** : V1 type B.
- **Blocs de référence** : ce sont des blocs réalisés dans un matériau présentant des caractéristiques acoustiques voisines, qui présentent des réflecteurs artificiels tels que :
 - des trous cylindriques à fond plat,
 - des génératrices de trous cylindriques,
 - des rainures ou entailles.



Figure IV.21 : matériel utilisé.

IV.4.8.1. Vérification des caractéristiques des palpeurs :

➤ Palpeur droit :

IV.4.8.1.1. 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 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].

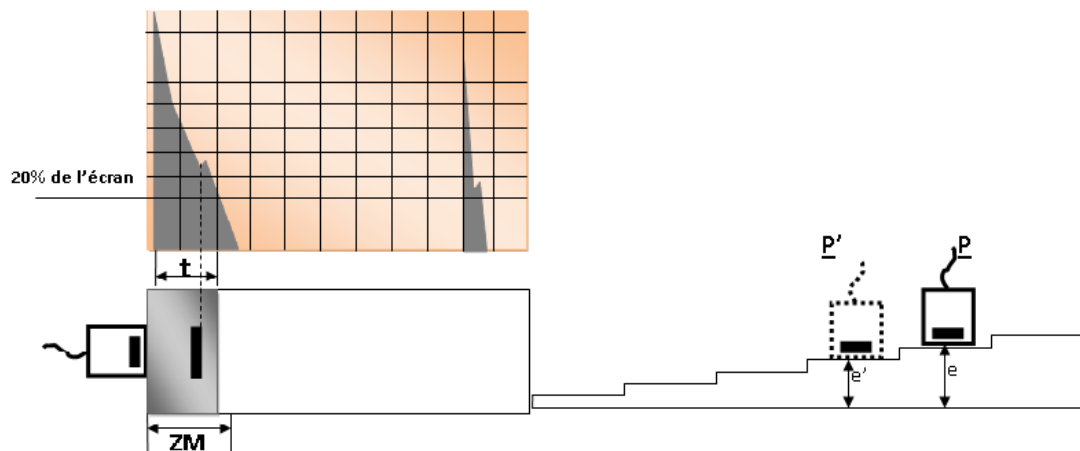


Figure IV.22 : détermination de la zone morte.

Pour notre palpeur la zone de silence égal à 3mm.

➤ **Palpeur à angle :**

IV.4.8.1.2. Détermination du point d'émergence (ou d'incidence) :

Lorsque l'écho atteint son maximum d'amplitudes, le « point d'émergence » du faisceau ultrasonore coïncide avec le centre de l'arrondi de (rayon=100mm) exactement. [32].

On peut lire la graduation qui correspond sur face latérale du palpeur

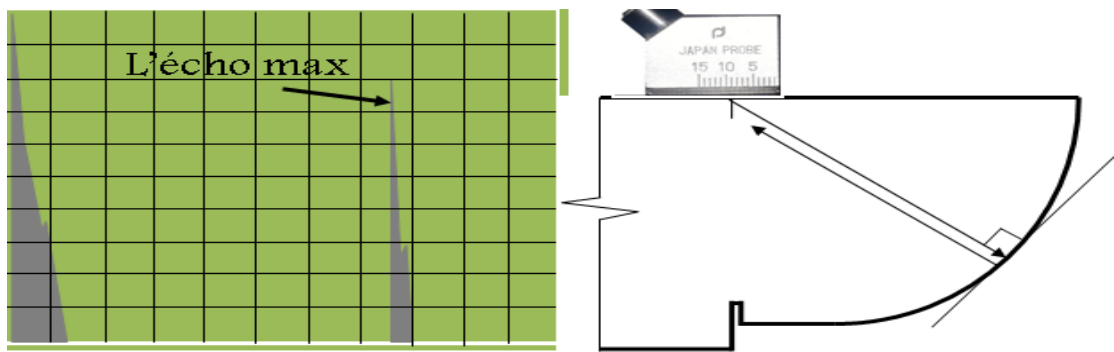


Figure IV.23 : détermination du point d'émergence.

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.



Figure IV.24 : Déterminer la point d'émergence de Palpeur (OT 70°).

IV.4.8.3. 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]
- ✓ **vitesse de balayage** :

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

IV.4.8.4. Choix du Palpeur :

- $D \leq 20\text{mm}$: angle 70°
- $20 < D \leq 35$: angle $70^\circ + 60^\circ$
- $D > 35$: angle $45^\circ + 60^\circ$

L'épaisseur de la pièce $< 20\text{mm}$ donc le Palpeur utilisée est : Palpeur 70°



Figure IV.25 : Choix le Palpeur (OT 70°).

IV.4.9. 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.

IV.4.9.1. 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].

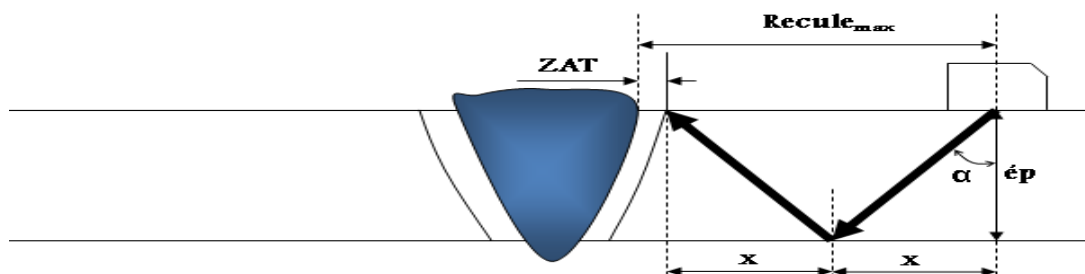


Figure IV.26 : calcul de recul max.

Calcul recule max (R_{max}) :

$$\text{ép} = 20\text{mm} ; \alpha = 70^\circ$$

$$R_{max} = x + x + ZAT = 2x + ZAT$$

$$x = \text{ép} \cdot \text{tg}(\alpha) \rightarrow x = 20 \cdot \text{tg}(70) = 54.94\text{mm}$$

Donc :

$$R_{max} = 2 \cdot \text{ép} \cdot \text{tg}(\alpha) + ZAT$$

Tel que : ép : c'est l'épaisseur de la pièce

ZAT : généralement on la prend 10mm

Dans notre cas : ép = 20 mm ; $\alpha = 70^\circ$; ZAT= 10 mm.

Donc :

$$R_{max} = 2 \cdot 20 \cdot \text{tg}(70) + 10 = 119.88\text{mm}$$

IV.4.9.2. L'échelle minimale (l'étendu) :

C'est le parcours sonore minimal à afficher sur l'écran de visualisation et il est défini par la relation suivante [1] :

Etendu = 1.25 X (un bond complet)

Un bon complet = 2. y

$$y = \frac{\text{ép}}{\cos \alpha} \text{ Dons notre cas :}$$

$$y = \frac{20}{\cos 70} = 58.47 \text{ mm}$$

Etendu = 1,25 * 2 * 58.47 = 146.175 mm

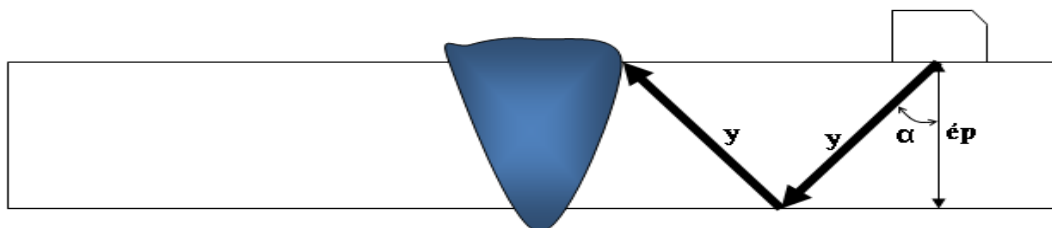


Figure IV.27 : calcul de l'étendu.

IV.4.9.3. Localisation du défaut :

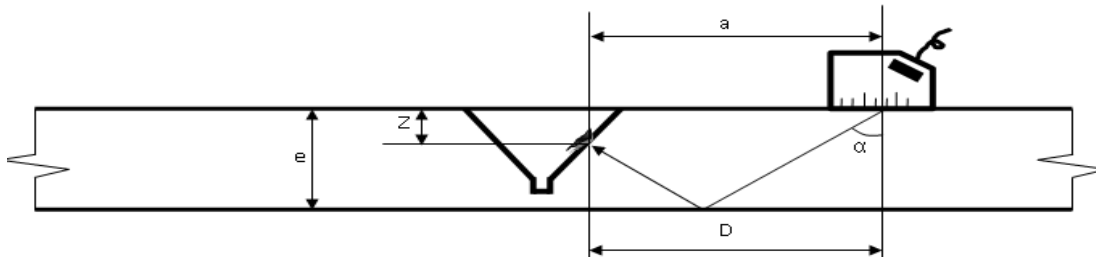


Figure IV.28 : localisation du défaut.

Lorsqu'un écho est apparu sur l'écran de l'appareil à ultrason :

- L'amplitude maximale est d'abord recherchée.
- Le parcours sonore est déterminé (lu directement sur l'écran de l'appareil)
- La cote « a » est mesurée du point d'émergence du transducteur à l'axe de la soudure.

Ensuite la localisation, c'est à dire l'endroit exacte de l'indication dans le joint de soudure (cote « D » et « Z ») est déterminée par **calcul**.

Connaissant l'angle de réfraction « aréel » ainsi que l'épaisseur de la pièce « ép » :

1er cas : détection en ½ bond

$$D = PS \times \sin \alpha, Z = PS \times \cos \alpha$$

2em cas : détection en bond complet

$$D = PS \times \sin \alpha, Z = 2 \times e - (PS \times \cos \alpha).$$

IV.4.9.4. Localisation de défaut :

Détermination du palpeur pour ½ bond et le bond complet.

➤ la détection du défaut

Nous présentons ci-dessous les échos des défauts en contrôle par la méthode d'écho d'anomalie



Figure IV.29 : Contrôle la pièce par ultrasons.

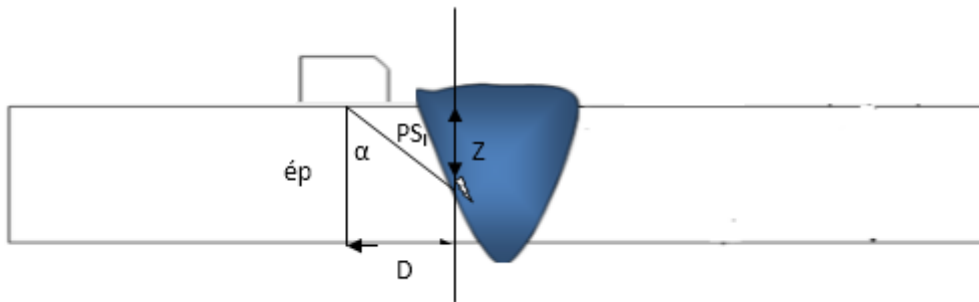


Figure IV.30 : la détection du défaut était par ½ bond.

1^{er} cas : détection en ½ bond

1/ ép=20mm ; $PS_I=22.12$

$$D=PS \times \sin \alpha = 22.12 \times \sin 70 = 20.78 \text{ mm}$$

$$Z=PS \times \cos \alpha = Z=22.12 \times \cos 70 = 7.56 \text{ mm}$$

2/ ép =20mm; $PS_{II} = 26.26$

$$D=PS \times \sin \alpha = 26.26 \times \sin 70 = 24.67 \text{ mm}$$

$$Z=PS \times \cos \alpha = Z=26.26 \times \cos 70 = 8.98 \text{ mm}$$



Figure IV.31 : tracé de l'écho de défaut I.

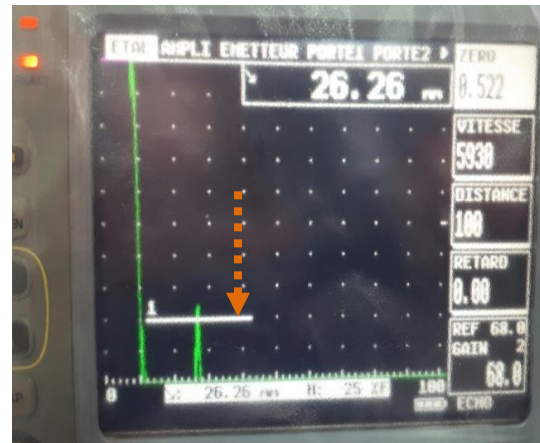


Figure IV.32 : tracé de l'écho de défaut II.

IV.4.9.4.2. la détection du défaut étai par bond complet :

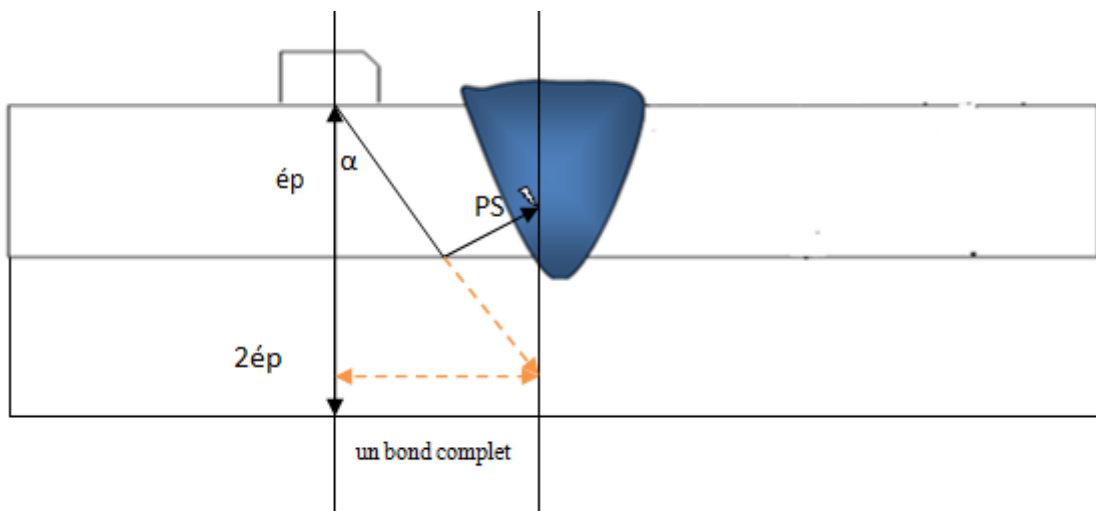


Figure IV.33 : la détection du défaut étai par bond complet.

$$\text{ép} = 20\text{mm} ; \quad \text{PS}_{III} = 87.59$$

$$D = \text{PS}_{III} \times \sin \alpha = 87.59 \times \sin 70 = 82.30 \text{ mm}$$

$$Z = 2 \times \text{ép} - (\text{PS}_{III} \times \cos \alpha) = 2 \times 20 - (87.59 \times \cos 70) = 10.05 \text{ mm}$$



Figure IV.34 : tracé de l'écho de défaut III.

Interprétation des défauts :

Les défauts	Longueur D (mm)	Profondeur Z (mm)
1ere défaut	$D_I = 20.78$	$Z_I = 7.56$
2éme défaut	$D_{II} = 24.67$	$Z_{II} = 8.98$
3éme défaut	$D_{III} = 82.30$	$Z_{III} = 10.05$

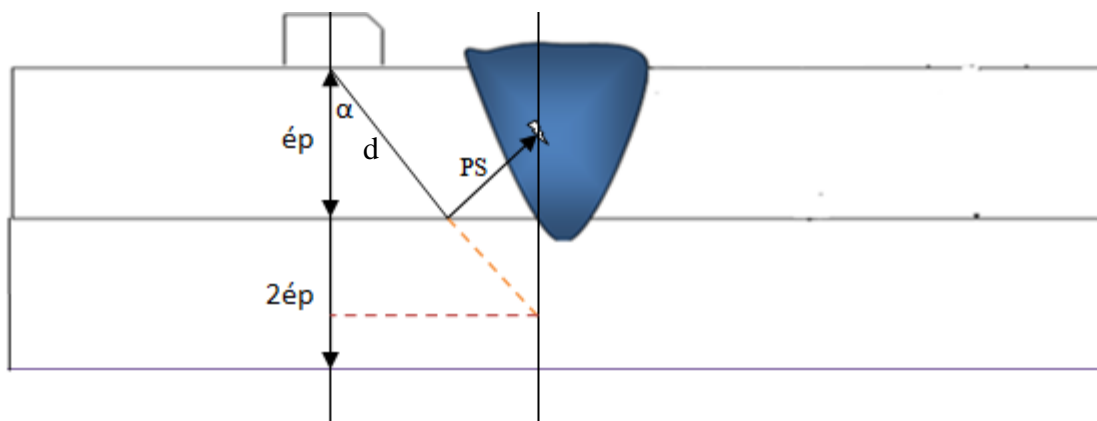
Tableau IV.2 : Localisation des défauts

D'après les résultats obtenus le défaut est volumique de type « manque de fusion »

- Pour le Deuxième échantillon le contrôle a révélé les résultats suivants :

IV.4.9.5. Localisation des défauts :

IV.4.9.5.1. calcul de la position du palpeur :



Demi-Bond :

Calculer la valeur (d)

$$\text{ép} = 17\text{mm} ; \quad \alpha = 70 ; \quad \text{PS} = 61.57$$

$$\cos \alpha = \frac{\text{ép}}{d} \text{ donc } d = \frac{\text{ép}}{\cos \alpha} = \frac{17}{\cos 70} = 49.70 \text{ mm}$$

Nous avons remarqué que : $\text{PS} > d$ ($\frac{1}{2}$ bond) donc le défaut dans le bond complet

Bond complet :

$$\text{ép} = 17\text{mm} ; \quad \text{PS} = 61.57$$

$$D = \text{PS} \times \sin \alpha = 61.57 \times \sin 70 = 57.85 \text{ mm}$$

$$Z = 2 \times \text{ép} - (\text{PS} \times \cos \alpha) = 2 \times 17 - (61.57 \times \cos 70) = 12.94 \text{ mm}$$



Figure IV.35 : tracé de l'écho de défaut.

Interprétation :

D'après les résultats obtenus le défaut est volumique de type « manque de fusion »

Sa longueur est $D = 57.85\text{mm}$. et Profondeur $Z = 12.94$

IV.5. 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.

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 1^{er} 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 êtres 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 et perspectives :

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 créé.

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.

Références Bibliographiques

- [1] - MOUSSAI A. TOUFIK « Thèse MAGISTER 2004 ».
- [2] - B. HICHEM « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers », Juin 2013.
- [3] -R. VARISELLAZ Soudage : Eléments de conception de réalisation (Duodi 1987).
- [4] A. Chehaïbou, Soudage laser : les bénéfices des procédés hybrides, Soudage et techniques connexes (2004) P33-38.
- [5] - Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; www.angers.ensam.fr.
- [6] - Soudage et coupage au chalumeau. Conseils d'utilisation. Edition INRS ED 742. 2000.
- [7] -Roland CAZES Ingénieur de l'École supérieure d'électricité ex-Directeur des recherches, Société Sciaky.
- [8]- VARISELLAZ, R. 1987. « Soudage : éléments de conception et de réalisation ». p. 4-49 p.160-176.
- [9]- Saint-Germain, Benoît. 2006. «Étude expérimentale et numérique des distorsions de structures mécano-soudées». Ph .D. France, École centrale Paris (France).
- [10] -A. Belhadj ; “ Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : Application aux alliages de magnésium ” ; Doctorat de l'Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis (2009).
- [11] -L. Blais ; “ Introduction au soudage laser ” ; Centre spécialisé de technologie physique du Québec Inc. (2006).
- [12] - CSMOFMI : Soudage et assemblage-soudage « Défauts de soudure • Chapitre 6 ».
- [13] - B. BARTHELEMY Notions pratiques de mécanique de la rupture - Editions EYROLLES -Paris 1980.
- [14]- D. SEFERIAN : Métallurgie de la soudure - DUNOD - 1959.
- [15] L. Mouchat, S. Malek, “Mise en œuvre de classificateurs basés sur la notion de distance et classification statistique. Applications : Identification des défauts de joint de soudure sur les images radiographiques”. Mémoire d'ingénieur. Université de Blida. 2002.
- [16]- F. DELATRE : Le soudage des aciers inoxydables - DUNOD – 1965.
- [17]- MAKRI HOCINE « Thèse MAGISTER ».
- [18] - Jean-Michel VIGO OTUA le soudage applique à la construction de ponts métalliques « 30/01/03 ».

- [19] - S. LAROZE Résistance des matériaux et structures, (Eyrolles, Masson 1982).
- [20] Documents Yamani Institute of Technology.
- [21] J. DUMONT-FILLON, "Contrôle non destructif (CND)", technique de l'ingénieur R1400, 1996, pp. (1-42).
- [22] Bruno GEORGEL, "Traitement des signaux Courants de Foucault pour le contrôle des tubes de générateurs de vapeur dans les centrales nucléaires REP", traitement du signal (vol. 8-n°5), pp. 373-381, juin 1991.
- [23] Abelhak. ABDOU, " Contrôle non destructif par courant de Foucault ; Etude et réalisation d'un capteur inductif", Mémoire de Magister, Spécialité électrotechnique, Option matériaux d'électrotechnique, Université de Batna, 2006.
- [24] PAUL E. MIX, "Introduction to nondestructive testing: a training guide", Wiley Interscience, 2nd edition, United States of America, 2005.
- [25] Yahya. CHOUA, "Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault", Thèse de Doctorat, Spécialité Physique, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Université de Paris-Sud 11, 2009.
- [26] Jacques DUMONT-FILLON Ingénieur de l'École Centrale de Paris Ancien Directeur Technique de l'Institut de Recherches de la Sidérurgie (IRSID).
- [27] Mohamed K. Bencharif, "Contrôle par Ressaage", Vinçotte International Algérie, Mai 2007.
- [28] Brahim BENRAMDAN, "Contribution à la modélisation tridimensionnelle de la technique thermo-inductive de contrôle non destructif : Développement d'un outil de conception, d'analyse et d'aide à la décision", Thèse de Doctorat, Spécialité électrotechnique et génie électrique, Université de Nantes, 2009.
- [29] Le contrôle non destructif par ultrasons, Jean Perdijon, Traité des nouvelles technologies Hermes Science Publications, 1993.
- [30] cours théorique et pratique de l'ultrason : Programme de formation « Gtp ». (02/01/2008).
- [31] : Guide réalisé par Auteur : Imad ABBAS Version 2010.
- [32] : manuel pour l'examen par ultrasons des soudures, institut international de la soudure, Commission V. 1978.
- [33] : ultrasons techniques particulières de contrôle : Cahiers de formation CETIM (2eme édition 1996).

Annexes

Annexe A :

Le travail présenté dans cette mémoire a été réalisé dans la société de **Maintenance des Equipements Industriels (MEI)** en l'atelier de fabrication service de contrôle qualité.

Représentation de MEI (m'sila) :

La Société de **Maintenance des Equipements Industriels (MEI / SPA)** a pour mission principale la maintenance des équipements industriels et de production d'énergie.

Créée le **02/01/1998**, **MEI** est devenue au fil du temps un professionnel industriel capable de répondre à l'ensemble des besoins en matière de maintenance industrielle pour Sonelgaz.


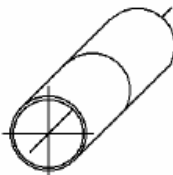

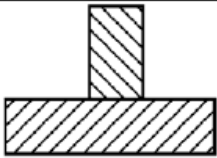






Outre les ateliers de **M'sila**, **MEI** dispose aussi de deux ateliers régionaux situés l'un à **BECHAR** et l'autre à **TOUGGOURT**, ce qui lui donne la capacité d'assurer :

- la rénovation des groupes électrogènes en ateliers,
- l'inspection des turbines gaz, vapeur et groupe diesel sur site,
- la rénovation des machines électriques tournantes **MT**, **BT**,
- les travaux de grosse mécanique (tournage, fraisage, rectification ...),
- l'équilibrage de roues de turbines, rotors de gros moteurs électriques, rotors turbocompresseurs et turboalternateurs,
- Les traitements thermiques.
- la chaudronnerie (rebutage, fabrication de ballons BP, distillateurs thermiques, moules de buses, réparation de vannes hydrauliques, fabrication des baffles et réparation des cheminées turbines à Gaz,
- la réparation de coussinets tous types confondus...,
- la réparation et le revêtement des pièces par projection plasma (APS et HVOF).

La Société de Maintenance des Equipements Industriels **MEI** a certifié Depuis Octobre **2003** son **SMQ** selon la norme **ISO 9001/2000**. Pour améliorer ses performances environnementales **MEI** a lancé en **2007** une démarche pour obtenir la certification d'un système de management environnemental selon le référentiel **ISO 14001/2004**.

Annexe B :**Les différents types d'assemblage :**

Codification européenne des types d'assemblage : (Norme EN 287-1)

Symboles		Significations	
P (Plate)	 Figure 1 : Tôle	Tôle	
T (Tubing)	 Figure 2 : Tube	Tube	
BW (Butt Welding)	 Figure 3 : Soudage bout à bout	Soudage bout à bout	Soudure bout à bout
FW (Fillet Welding)	 Figure 4 : Soudage en angle	Soudage en angle	Soudure en angle
nm (Not Métal)		Sans métal d'apport	
wm (With Métal)		Avec métal d'apport	
ss (Single Side)	 Figure 5 : Soudage d'un seul côté	Soudage d'un seul côté	
bs (Both Side)	 Figure 6 : Soudage des deux côtés	Soudage des deux côtés	
nb (Not Backing)	 Figure 7 : Soudage sans support envers	Sans support envers	
mb (Métal Backing)	 Figure 8 : Soudage avec support envers	Avec support envers solide	
ng (Not Gouging)	 Figure 9 : Soudage sans gougeage	Sans gougeage (ou meulage) envers	
gg (Gouging)	 Figure 10 : Soudage avec gougeage envers	Avec gougeage envers	

LISTE DES PRINCIPALES NORMES (Liste non exhaustive) :

Référence	Edition	Objet
NF E 52-109-2	déc-90	Levage et manutention – Assemblages soudés – Partie 2 : Classes de qualité de soudure – Etendue des contrôles non destructifs (remplace NF E52-109 : 1986)
NF EN 444	avr-94	Essais non destructifs – Principes généraux de l'examen radiographique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux métalliques
NF EN 571-1	sept-97	Essais non destructifs – Examen par ressuage – Partie 1 : Principes généraux (remplace NF A 09-120 : 1984)
NF EN 970	mai-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion – Contrôle visuel
NF EN 10246-1	août-96	Essais non destructifs des tubes en acier – Partie 1 : Contrôle automatique électromagnétique pour vérification de l'étanchéité hydraulique des tubes en acier sans soudure et soudés ferromagnétiques (sauf à l'arc immergé sous flux en poudre)
NF EN 10246-7	août-96	Essais non destructifs des tubes en acier – Partie 7 : Contrôle automatique par ultrasons sur toute la circonférence pour la détection des imperfections longitudinales des tubes en acier sans soudure et soudés (sauf à l'arc immergé sous flux en poudre) – (remplace NF A49-870 : 1987, NF A49-890 : 1986)
NF EN 12062	oct-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Règles générales pour les matériaux métalliques
NF EN 12517	sept-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1289	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ressuage des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1290	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés
NF EN 1291	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par magnétoscopie des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1330-1	août-99	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 1 : Liste des termes généraux
NF EN 1330-2	août-99	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 2 : Termes communs aux méthodes d'essais non destructifs
NF EN 1330-3	déc-97	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 3 : Termes pour le contrôle radiographique industriel. (remplace NF A09-200 : 1985)
NF EN 1330-4	juil-00	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 4 : Termes utilisés en contrôles ultrasonores (remplace NF A 09-300 : 1987)
NF EN 1330-5	oct-98	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 5 : Termes utilisés en contrôle par courants de Foucault (remplace A09-150 : 1988)
NF EN 1330-8	oct-98	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 8 : Termes utilisés en contrôle d'étanchéité (remplace A09-450 : 1988)

Référence	Edition	Objet
NF E 52-109-2	déc-90	Levage et manutention – Assemblages soudés – Partie 2 : Classes de qualité de soudure – Etendue des contrôles non destructifs (remplace NF E52-109 : 1986)
NF EN 444	avr-94	Essais non destructifs – Principes généraux de l'examen radiographique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux métalliques
NF EN 571-1	sept-97	Essais non destructifs – Examen par ressuage – Partie 1 : Principes généraux (remplace NF A 09-120 : 1984)
NF EN 970	mai-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion – Contrôle visuel
NF EN 10246-1	août-96	Essais non destructifs des tubes en acier – Partie 1 : Contrôle automatique électromagnétique pour vérification de l'étanchéité hydraulique des tubes en acier sans soudure et soudés ferromagnétiques (sauf à l'arc immergé sous flux en poudre)
NF EN 10246-7	août-96	Essais non destructifs des tubes en acier – Partie 7 : Contrôle automatique par ultrasons sur toute la circonférence pour la détection des imperfections longitudinales des tubes en acier sans soudure et soudés (sauf à l'arc immergé sous flux en poudre) – (remplace NF A49-870 : 1987, NF A49-890 : 1986)
NF EN 12062	oct-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Règles générales pour les matériaux métalliques
NF EN 12517	sept-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1290	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés
NF EN 1291	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par magnétoscopie des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1330-1	août-99	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 1 : Liste des termes généraux
NF EN 1330-2	août-99	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 2 : Termes communs aux méthodes d'essais non destructifs
NF EN 1330-3	déc-97	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 3 : Termes pour le contrôle radiographique industriel. (remplace NF A09-200 : 1985)
NF EN 1330-4	juil-00	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 4 : Termes utilisés en contrôles ultrasonores (remplace NF A 09-300 : 1987)
NF EN 1330-5	oct-98	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 5 : Termes utilisés en contrôle par courants de Foucault (remplace A09-150 : 1988)
NF EN 1330-8	oct-98	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 8 : Termes utilisés en contrôle d'étanchéité (remplace A09-450 : 1988)

Référence	Edition	Objet
NF EN 1330-9	avr-00	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 9 : Termes utilisés en contrôle par émission acoustique (remplace NF A09-350 : 1984)
NF EN 1435	oct-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés (remplace NF A89-550 : 1987, NF A89-551 : 1987, NF A89-552 : 1987, NF A89-562 : 1987)
NF EN 1712	nov-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation.
NF EN 1714	oct-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons des assemblages soudés
NF EN 25817	nov-92	Assemblages en acier soudés à l'arc – Guide des niveaux d'acceptation des défauts
NF EN 26520	fév-92	Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec les commentaires explicatifs (remplace NF A89-230)
NF EN 30042	juil-94	Assemblages en aluminium et alliages d'aluminium soudables soudés à l'arc – Guide des niveaux d'acceptation des défauts
NF EN 473	déc-00	Essais non destructifs – Qualification et certification du personnel END – Principes généraux (remplace NF EN 473 : 1993 et FD CR 12459 : 1996)
NF EN 970	mai-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés par fusion – contrôle visuel
NF EN 10246-1	août-96	Essais non destructifs des tubes en acier – Partie 1 : Contrôle automatique électromagnétique pour vérification de l'étanchéité hydraulique des tubes en acier sans soudure et soudés ferromagnétiques (sauf à l'arc immergé sous flux en poudre)
NF EN 10246-7	août-96	Essais non destructifs des tubes en acier – Partie 7 : Contrôle automatique par ultrasons sur toute la circonférence pour la détection des imperfections longitudinales des tubes en acier sans soudure et soudés (sauf à l'arc immergé sous flux en poudre) – (remplace NF A49-870 : 1987, NF A49-890 : 1986)
NF EN 12062	oct-97	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Règles générales pour les matériaux métalliques
NF EN 12517	sept-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par radiographie des assemblages soudés – Niveaux d'acceptation
NF EN 1289	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par ressuage des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1290	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par magnétoscopie des assemblages soudés
NF EN 1291	août-98	Contrôle non destructif des assemblages soudés – Contrôle par magnétoscopie des soudures – Niveaux d'acceptation
NF EN 1330-1	août-99	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 1 : Liste des termes généraux
NF EN 1330-2	août-99	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 2 : Termes communs aux méthodes d'essais non destructifs
NF EN 1330-3	déc-97	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 3 : Termes pour le contrôle radiographique industriel. (remplace NF A09-200 : 1985)
NF EN 1330-4	juil-00	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 4 : Termes utilisés en contrôles ultrasonores (remplace NF A 09-300 : 1987)
NF EN 1330-5	oct-98	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 5 : Termes utilisés en contrôle par courants de Foucault (remplace A09-150 : 1988)
NF EN 1330-8	oct-98	Essais non destructifs – Terminologie – Partie 8 : Termes utilisés en contrôle d'étanchéité (remplace A09-450 : 1988)

LES NORMES POUR L'ESSAI DE RESSUAGE :

De nombreuses normes régissent le contrôle par ressuage. La norme ISO 12706, prépare au vocabulaire du ressuage. Les normes ISO 3452 (parties 1, 2, 3, 4, 5, 6) concernent respectivement, les principes généraux, les produits de ressuage, les pièces de référence, l'équipement, l'examen à des températures supérieures à 50°C et la partie n°6 concerne l'examen à des températures inférieures à 10°C.

La norme ISO 3452-1 permet de classer un examen de ressuage. Par exemple, on désignera Ida4 les produits utilisés pour un ressuage avec un pénétrant fluorescent, de sensibilité N° 4, qui est éliminé à l'aide d'un émulsifiant hydrophile, puis révélé avec de la poudre sèche

ISO 3452-1	
Type de pénétrant	
Fluorescent	I
Coloré	II
Mixte (fluorescent et coloré)	III
Méthode d'élimination du pénétrant	
Eau	A
Emulsifiant lipophile	B
Solvant (liquide)	C
Emulsifiant hydrophile	D
Eau et solvant	E
Forme du révélateur	
Sec	a
Hydrosoluble	b
Suspension dans l'eau	c
A base de solvant (non aqueux pour type I)	d
A base de solvant (non aqueux pour types II et III)	e
Application spéciale	f

Annexe C : Les PV de control (CND) dans une société MEI

	Procès-verbal	CODE IS – CQ – 01
	de contrôle qualité	INDICE 01

PV N° 068/18

Client / Désignation : Deux Pièce Assemblées Par SoudageCode affaire : sans code affaireOT N° : sans OTOrgane concerné :Identification :

Rep. /

TITRE :

CONTROLE NON DESTRUCTIF (PT, UT, MT)

Commentaires :Résultats :

Conforme

Non Conforme

A déterminer

Spécifications/Normes : NORMES ISO 3452-1 ; ISO 4386-1

(Examen CND. PT ; UT)

DIFFUSION-D.Ateliers - Sce. Commercial - G.Travaux

Date du contrôle : 30-04-2018

Établi le : 30-04-2018

Par : Mahdi Hocine

Approuvé par : Idoughi

Hasnaoui Djabir

CONTROLE AU RESSUAGE (PT)**Conditions opératoires :**

Pièces	Deux Pièce Assemblées Par Soudage
Zones examinées	Surface, faces & plans de joint

NORME	Méthode d'examen	Date	Nom	Visa
ISO 3452-1	Coloré lavable à l'eau	30/04/2018	HasnaouiDjabir+ Mahdi Hocine	

Préparation de la surface :

Rinçage Meulage restreint Autre

Produits utilisés :

	Marque	Type	N° Lot	Date Péréemption
Nettoyant	SHERWIN	N 120	19416/4	04/2020
Penetrant	SHERWIN	DP 55	09916	07/2020
Revelator	SHERWIN	D100	06517/1	05/2021

Elimination de l'excès de pénétrant et mode de séchage

L'eau + chiffon propre non pelucheux, séchage à l'air libre.

Durée de la révélation

De 10 min. à 20 min.

OBSERVATION :

- Apparition de quelques souffleurs éparpillés sans incidences sur le joint de soudure.

Date du contrôle : 30-04-2018

Établi le : 30-04-2018

Par : Mahdi Hocine

Approuvé par :

Hasnaoui Djabir

Idoughi

I. CONTROLE AUX ULTRASONS (UT)

NORME	Méthode de Contrôle	Date	Nom	Visa
ISO 4386-1	Sansécho de fond	30/04/2018	Idoughi	

Appareil utilisé :

Marque :	SONATEST	Couplant :	GRAISSE/HUILE
Type :	D 10+	Caleétalon :	Régule de mêmeép. ~20mm
N°/		Gain :	60 dB

Transducteurs utilisés :

N°	Type d'onde	Modèle	Type	Angle	Fréquence
57905	Longitudinal	½ Pouce	MB4F-E	70°	4MHz

Résultat :

- Présence de quelques indications sur le joint de soudure

Date du contrôle : 30-04-2018

Établi le : 30-04-2018

Par :

Mahdi Hocine

Approuvé par :

Hasnaoui Djabir

Idoughi

I. CONTROLE MAGNETOSCOPIQUE

NORME ASME V (Article 7)

Désignation de la pièce :

Deux Pièce Assemblées Par Soudage

Quantité : 01

Dimension :

Surface :

Matière :

Condition d'essai :

Appareillage : Electro-aimant

Type : ES - X

Nom du fabriquant :
SOFRANEL

Particules magnétiques :

Granulométrie :

Marque

Type

N° Lot

Date
péremption

**Révélateur
magnétique noir**

BABBCO

B 103 C

06417/1

06/2021

Fond blanc

BABBCO

B 104 A

18114/1

10/2018

Milieu de dispersion des particules
magnétiques

Humide

Concentration du
liquide d'examen

Durée de
magnétisation :
3 s

Courant magnétisant /

Intensité du courant
magnétisant

Durée de passage :

Méthode de magnétisation :

Propagation Axiale & Radiale

Éprouvette standard :

Résultats des essais :

Fissures révélées sur le joint de soudure

Date du contrôle : 30-04-2018

Établi le : 30-04-2018

Par : Mahdi Hocine

Approuvé par : Idoughi

Hasnaoui Djabir



Certaines photos sont prises de la partie pratique dans l'atelier de contrôle de qualité :



ملخص :

مع التطور التكنولوجي زادت الحاجة إلى لحام ذي جودة عالية، حيث أن الصناعات المتقدمة والهامة تحتاج إلى قطع موثوق بها. لأن حصول عطب في جزء من خط اللحام في مثل هذه الصناعات يعني خسارة كبيرة في الأرواح والأموال. لذا تصنف خطوط اللحام الهامة في مثل هذه الصناعات تحت تصنيف خطوط اللحام الحرجة. وللحصول على الجودة المطلوبة يجب الكشف عن العيوب التي تنشأ أثناء اللحام.

عيوب اللحام هو مصطلح يستخدم لوصف الفراغات او الفجوات او أي أخطاء أخرى تحدث في شكل وحجم وصلة اللحام , تتسبب في تشويهه. وذلك حسب المعايير والمواصفات المعتمدة عند الكشف عن عيوب اللحام.

هذه المذكرة تطرقت لبعض اختبارات اللحام الغير إتلافيه، للكشف عن بعض عيوب وصلات اللحام.

Résumé :

Avec le développement technologique, le besoin d'une soudure de haute qualité a augmenté, car les industries avancées et importantes, ont besoin des pièces fiables. Parce que les dommages dans une partie de la ligne de soudure dans ces industries, signifient des pertes matériels et humaines importantes.

Par conséquent, des lignes de soudage importantes dans de telles industries sont classées sous des lignes de soudage critiques. Et pour obtenir la qualité requise, il faut détecter les défauts qui résultent de l'opération de soudage.

Les défauts de soudure est un terme utilisé pour décrire les vides, les lacunes ou toute autre erreur qui se produit dans la forme et la taille du joint de soudure, causant une détérioration. Selon les normes et spécifications adoptées lors de la détection des défauts de soudure.

Cette mémoire, traite quelques essais de soudage non destructifs utilisés pour inspecter et détecter certains défauts dans les joints de soudure.

Abstract:

With technological development, the need for high quality welding has increased as advanced and important industries need reliable parts. Because the damage in part of the weld line in these industries, means significant material and human losses.

Therefore, important welding lines in such industries are classified under critical welding lines. And to obtain the required quality, it is necessary to detect the defects that result from the welding operation.

Welding defects is a term used to describe the voids, gaps or any other error that occurs in the shape and size of the weld seam, causing deterioration. According to standards and specifications adopted during the detection of welding defects.

This study describes some non-destructive welding tests used to inspect and detect certain defects in welding.