

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

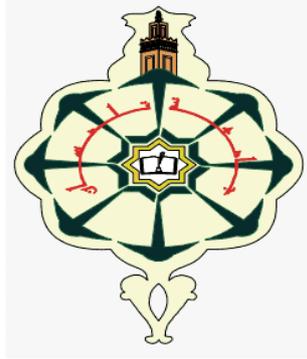
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلكايد تلمسان

Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de Technologie



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par : YAHIA BERROUIGUET Mounir

Sujet

Comparaison entre les contrôles non destructifs
(visuel, ressuage, radiographie) d'un assemblage
soudé par différents métaux d'apports.

Soutenu le 21 / 06 / 2022

devant le jury composé de :

Mr. HAMZA CHERIF S.M

MCA

Président

Mr. GUEZZEN Samir

MCB

Examineur

Mr. ACHOUI Mohamed

MAA

Encadrant

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le plus puissant qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'études.

Je tiens à remercier en particulier Messieurs **ACHOUI Mohamed** et Madame **SERIARI F.Z** qui ont dirigé ce mémoire et qui ont été toujours à l'écoute et très disponibles tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je désire exprimer toute ma gratitude à mes enseignants qui ont accepté d'être membres dans le jury de soutenance de mon mémoire. Monsieur. **HAMZA CHERIF S.M** Le président du jury, Monsieur **GUEZZEN Samir** d'avoir accepté d'examiner mon manuscrit.

Mes remerciements vont également au corps des Enseignants de la Faculté de Technologie pour la richesse et la qualité de leurs enseignements.

Je Tiens aussi à remercier Messieurs **AINI Ali** directeur de l'entreprise TESTIAL et tout le staff pour leurs accueils, aides, et efforts.

Sans oublier les camarades de la promo Génie mécanique option construction mécanique à leur tête **BOUSEMAHA Karima**.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers au
Monde. Ma mère et mon père en témoignage de l'amour,
Respect et de la gratitude que je leur porte.*

Y. BERRONIGUET Mounir

Résumé

Il est nécessaire et de la plus haute importance de vérifier la santé des soudures sur des tubes de conduites utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière. A cet effet de très nombreuses méthodes sont utilisées. Dans Ce travail nous présentons une comparaison entre les méthodes des contrôles non destructifs (Visuel, Ressuage et Radiographie) pour des assemblages soudés, et l'interprétation des résultats après chaque examen CND.

Abstract

It is necessary and of the utmost importance to check the health of welds on line pipes used in the oil and gas industry. Many methods are used for this purpose. In this work we present a comparison between non-destructive testing methods (Visual Testing, Penetrant Testing and Radiographies testing) for welded assemblies and interpretations of the results after each NDT examination.

المخلص

من الضروري والأكثر أهمية التحقق من صحة اللحامات على الأنابيب الخطية المستخدمة في تمرير النفط والغاز. يتم استخدام العديد من الطرق لهذا الغرض. يقدم هذا العمل مقارنة بين طرق الاختبار الغير إتلافيه (الفحص البصري ، السائل المتغلغل و التصوير الإشعاعي) للتجمعات الملحومة ، وتفسيرات النتائج بعد كل امتحان مراقبة.

-Liste des figures.....	I
-Liste des tableaux.....	II
-Liste des abreviations.....	III
-Liste des symboles.....	IV
-Introduction generale.....	V

Chapitre I: Généralités sur les procédés de soudage

1-Introduction.....	1
2-Histoire du soudage.....	1
3- Generalites sur le soudage.....	2
3-1- Définition du soudage.....	2
3-2- Cycle thermique en soudage.....	3
3-3- Différents types d'assemblages.....	4
3-4- Positions de soudage.....	5
4-Les Principaux procedes de soudage.....	6
4-1-Définitions des procédés de soudage.....	6
4-2- Soudage à l'arc à l'électrode enrobée SMAW (111).....	8
4-2-1- Définitions du soudage à l'électrode enrobée.....	8
4-2-2-Principe de soudage a l'électrode enrobée.....	9
4-2-2-1-schéma du soudage à l'électrode enrobée.....	9
4-2-2-2-L'arc électrique.....	9
4-2-3- Rôle de l'enrobage.....	10
4-2-3-1-Avantages et Inconvénients du procédé SMAW.....	10
4-3-1-Définition du procédé.....	12
4-3-2-Principe du procédé.....	13
4-3-3-Les gaz de soudage en soudage MAG.....	14
4-3-4-Les gaz de soudage en soudage MIG.....	15
4-3-5-Les deux sens de déplacement de la torche de soudage.....	16
4-3-6-Influence de la hauteur d'arc.....	17
4-3-7-Avantages et Inconvénients du procédé.....	17
4-4- Soudage TIG (GTAW).....	18
4-4-1- Définition de soudage TIG.....	18
4-4-2- Principe du procédé TIG.....	18
4-4-2-1- Buses utilisées en soudure TIG.....	19
4-4-3- Gaz utilisés en procédé TIG.....	19
4-4-4-Transfert du métal.....	20
4-4-5-Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG.....	20
4-4-6- Les avantages et les inconvénients de procédé TIG.....	20
4-5- Soudage à l'arc submergé SAW (12).....	21
4-5-1- Définition de soudage à l'arc submergé.....	21
4-5-2- Principe du procédé.....	21
4-5-3- Schéma du soudage sous flux.....	22
4-5-4- Domaines d'applications.....	22
4-5-5- Les avantages et les inconvénients.....	22

4-6- Soudage par résistance.....	23
4-6-1-soudage par point	23
4-6-1-1- Définition du procédé.....	23
4-6-2-Soudage à la molette	23
4-6-2-1-Définition du procédé	23
4-6-3-Les avantages et les inconvénients du procédé	24
5-Les défauts de soudage	24
5-1-Caniveaux	24
5-2-Manque de fusion : collage.....	25
5-3-Porosites.....	26
5-4-Projections excessives	26
5-5-Difficultés d’amorçage	27
5-6-Fissuration sous cordon	28
5-7-Fissures de solidification	28
5-8-Soufflage magnétique de l’arc	29
5-9-Deformation.....	29
5-10-Defaut de la passe de fond : manque de penetration	30
5-11-Fissure de cratere	31
5-12-Inclusions de laitier.....	31
Chapitre II: Présentation des contrôles non destructifs	
1-Introduction.....	33
2-Applications et tendances	33
2-1- Champ d’application actuel	33
2-1-1-Le contrôle en cours de fabrication	34
2-1-2- Le contrôle de réception.....	34
2-1-3- Le contrôle en service	34
3- Principes de detection des défauts par CND	35
3-1-Hétérogénéités et défauts.....	35
3-1-1- Les défauts de surface	35
3-1-2- Les défauts internes	36
3-2- Procédure de CND	38
3-3- Principe de la détection d’un défaut	38
4-Techniques de controle	40
4-1-Examen visuel (VT) [20]	40
4-1-1- Introduction	40
4-1-2- Éclairage.....	40
4-1-3- L’œil et ses limitations	41
4-1-4- Aides optiques à la vision.....	41
4-1-4-1- Appareils optiques classiques	41
4-1-4-2- Appareils optiques spécifiques	42
4-2- contrôle par ressuage (PT).....	42
4-2-1- Introduction	42
4-2-2- Principe de ressuage	42
4-2-3- Domaine d’application	43
4-2-4-Produits de ressuage	43
4-2-5-Fiabilité.....	44
4-2-6- Interpretation des resultats.....	44

4-2-6-1- Interprétation Evaluation.....	44
4-2-6-2- Origine des indications	45
4-2-6-3- Type d'indications	45
4-2-7-Significations des indications.....	45
4-2-8- Les avantages et inconvénients	46
4-3-Contrôle par magnétoscopie (MT)	46
4-3-1-Introduction	46
4-3-2- Définition	47
4-3-3- Principe de la méthode	47
4-3-4-Produit utilisé en magnétoscope.....	49
4-3-5- Conservation des spectres magnétiques	50
4-3-6- Demagnétisation.....	50
4-3-7-Avantages et Inconvénients.....	51
4-4-Contrôle par radiographie (RT)	51
4-4-1- Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique	51
4-4-2- Les sources de rayonnements	52
4-4-3- Les films radiographiques	54
4-4-4 – Les rayonnements parasites	56
4-4-5- Le flou géométrique	56
4-4-6- La projection elliptique	56
4-4-7- Le tir au contact.....	57
4-4-8- Les indicateurs de qualité d'image (IQI).....	58
4-4-9- Le repérage des radiogrammes.....	59
4-4-10- Les temps de pose	60
4-4-11- Avantages du contrôle par radiographie.....	61
4-4-12- Inconvénients du contrôle par radiographie	61
4-5- Contrôle par ultrasons (UT) [10].....	61
4-5-1- Introduction	61
4-5-2-Fonctionnement d'un appareil à ultrasons	62
4-5-2-1- Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2	62
4-5-2-2- Ondes acoustiques.....	63
4-5-2-3- Principe de la méthode.....	64
4-6- Le contrôle par courants Foucault (ET).....	66
4-6-1- Définition de de contrôle par courants Foucault	66
4-6-2- Principe de contrôle par courants Foucault	66
4-6-3- Domaine d'application	66
4-6-4- Les avantages et inconvénients	67
4-7- Contrôle par la thermographie infrarouge (TT).....	68
4-7-1- Définition de la thermographie infrarouge.....	68
4-7-2- Principe de contrôle par thermographie infrarouge.....	68
4-7-3- Les avantages et inconvénients	68
4-8- Contrôle par émission acoustique (AT).....	69
4-8-1- Définition de contrôle par émission acoustique	69
4-8-2- Principe de l'émission acoustique	69
4-8-3- Domaines d'application.....	69
4-8-4- Les intérêts de la méthode	70

Chapitre III: Etudes expérimentales

1-Introduction.....	72
2- Présentation des assemblages à contrôler	72

2-1-MÉTAL DE BASE.....	72
2-1-1-Composition chimique du métal	72
2-1-2- préparation des tubes avant soudage	72
2-1-3- préparation des tubes avant soudage.....	73
2-2-PROCÉDES ET MÉTAUX D'APPORTS UTILISÉS DANS LES ASSEMBLAGES SOUDÉS	74
3-Contrôle non destructifs des assemblages soudés	75
3-1-Contrôle visuelle.....	75
3-2-Contrôle par ressuage	76
3-2-1-Matériels utiliser.....	76
3-2-2-Procédure d'examen par ressuage	77
3-3-Contrôle par radiographie	78
3-3-1-position de tir par contact	78
3-3-2-Matériel utiliser	78
3-3-3- Rapport radiographie pour chaque assemblage.....	79
3-3-4- Développement des films radiographiques	81
4-Contrôle destructif des pièces soudées	82
4-1-Prélèvement des éprouvettes.....	82
4-2- Essais de traction	82
Chapitre IV: Résultats et Interprétations	
1-Introduction.....	85
2- Interprétation pour contrôles non destructifs	85
2-1- contrôle visuels	85
2-2- contrôles par ressuage	86
2-2-1-Résultats d'examen pour chaque pièce	86
2-3- contrôles par radiographie	89
3-Contrôles destructives	90
3-1- Essai de Traction.....	90
3-1-1- Interprétations des graphes.....	90
Conclusions générales	92
Références bibliographiques	93

Liste de figures

Chapitre I

Figure I.1 : Soudage homogène..... 2

Figure I.2 : Soudage Hétérogène..... 2

Figure I.3 : Différentes régions de la ZAT et microstructures au voisinage de la zone fondue. 3

Figure I.4 : Cycle thermique en soudage et transformations structurales. 3

Figure I.5 : Terminologie des assemblages 4

Figure I.6 : Différents types d'assemblages..... 5

Figure I.7 : Dénominations des positions de soudage pour les soudures bout à bout. 5

Figure I.8 : Dénomination des positions de soudage pour les soudures d'angle, conformément à la norme EN ISO 6947. 6

Figure I.9 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus..... 7

Figure I.10 : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée SMAW 8

Figure I.11 : Schéma du soudage à l'arc (EE)..... 9

Figure I.12 : L'arc électrique du soudage 10

Figure I.13 : Constitution d'une électrode enrobée..... 10

Figure I.14 : Soudage avec procédé GMAW (MIG/MAG)..... 12

Figure I.15 : Schéma pour torche de soudage GMAW 13

Figure I. 16 : Installation de soudage GMAW 13

Figure I.17 : Influence de la hauteur d'arc en MIG/MAG..... 17

Figure I.18 : Soudage GTAW 18

Figure I.19 : Différents BUSES utilisés en soudure TIG. 19

Figure I.20 : transfert de métal dans le soudage TIG..... 20

Figure I.21 : Soudage à l'arc submergé SAW..... 21

Figure I.22 : Schéma du soudage sous flux..... 22

Figure I.23 : soudage par point 23

Figure I.24 : Soudage à la molette.....	24
Figure I.25 : Caniveaux.....	24
Figure I.26 : Manque de fusion (collage).....	25
Figure I.27 : Porosites.....	26
Figure I.28 :Projections excessives.....	26
Figure I.29 : Difficultes d’amorçage.....	27
Figure I.30 : Fissuration sous cordon.....	28
Figure I.31 : Fissures de solidification.....	28
Figure I.32 : Soufflage magnetique de l’arc.....	29
Figure I.33 : Deformation.....	29
Figure I.34 : Manque de penetration.....	30
Figure I.35 : Fissure de crater.....	31
Figure I.36 : Inclusions de laitier.....	31

Chapitre II

Figure II.1 : Champ d’application du CND.....	35
Figure II.2 : Crique.....	36
Figure II.3 : Pique.....	36
Figure II.4 : Fissure.....	36
Figure II.5 : Crique interne.....	37
Figure II.6 : Porosité.....	37
Figure II.7 : Soufflure.....	37
Figure II.8 : Principe de détection d’un défaut.....	38
Figure II.9 : méthode de flux.....	39
Figure II.10: Contrôle visuelle d’une pièce.....	40
Figure II.11 : Témoin pour examen de ressuage.....	44
Figure II.12 : Exemple de pièce observée blanche présentant un défaut.....	45

Figure II.13 : Exemple de pièce observée en lumière UV présentant un défaut.	45
Figure II.14 : Appareille manuelle de contrôle par magnétoscopie.	46
Figure II.15 : Aimantation directe.	47
Figure II.16: Aimantation indirect	48
Figure II.17 : Principe du contrôle par magnétoscopie	49
Figure II.18 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique	52
Figure II.19 : Schématisation du tube radiogène.	53
Figure II.20: Source radioactive à rayonnement gamma δ .	54
Figure II.21 : Coupe d'un film AGFA type « NEW ».	54
Figure II.22 : Structure d'un Film. Radiographique.	55
Figure II.23 : Flou géométrique	56
Figure II.24 : Projection elliptique	57
Figure II.25 : Tir au contact.	57
Figure II.26 : Indicateur qualité image a fils	58
Figure II.27 : Indicateur qualité image a gradins	59
Figure II.28: Repérage des radiogrammes	59
Figure II.29 :L'abaque de temps de pose aux rayons X.	60
Figure II.30 : Blocs d'étalonnage de type B et V2.	63
Figure II.31: Examen par transmission	64
Figure II.32 : Examen par réflexion	65
Figure II.33 : Signaux réfléchis par différents obstacles.	65
Figure II.34 : Réflexion spéculaire.	66
Figure II.35 : Défaut parallèle à l'onde incidente	66
Figure II.36 : Principe de contrôle par courants Foucault.	67
Figure II.37 : Appareille Contrôle par la thermographie infrarouge.	68
Figure II.38 : Résultats d'un essai par thermographie infrarouge.	68

Figure II.39 : Principe de contrôle par émission acoustique 69

Chapitre III

Figure III.1 : schéma de préparation des chanfreins.....73

Figure III.2 : Préparations des chanfreins $\alpha = 45^\circ$ 73

Figure III.3 : Position des tubes à assembler..... 73

Figure III.4 : Tubes soudé..... 74

Figure III.5 : Tubes soudé 75

Figure III.6 : Schématisation de l'essai de ressuage77

Figure III.7 : Tir radiographique méthode par contact..... 78

Figure III.8 : Unité de traitement manuel..... 81

Figure III.9 : Prélèvements des éprouvettes sure une fraiseuse horizontale.82

Figure III.10 : Machine traction 600 KN.....83

Figure III.11 : Epreuve avant rupture.....83

Figure III.11 : Epreuve après rupture83

Chapitre IV

Figure IV.1 : Procès-verbal d'examen visuel.....85

Figure IV.2 : Procès-verbal d'examen Par Ressuage.....87

Figure IV.3 : Exemple de film a interprété (pièce 1).....88

Figure IV.4 : Procès-verbal d'examen Par radiographie.....89

Figure IV.5: Graphe de traction pour assemblage soudé par différents métaux d'apports.....90

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Numérotation de quelques procédés de soudage par fusion (norme ISO 4063). ..8	
Tableau I.2 : Gaz de protection utiliser dans le procéder MAG. 14	
Tableau I.3 : Gaz de protection utiliser dans le procéder MIG 15	
Tableau I.4 : Soudage en poussant et en tirant. 16	

Chapitre II

Tableau II.1 : Les différents types de radio-éléments δ 53	
Tableau II.2 : Classification des films et coefficient de sensibilité..... 55	
Tableau II.3 : Indicateurs de qualité d'image a fils..... 58	
Tableau II.4 : Dimensions des blocs de référence v1 et v2 (en mm) 62	

Chapitre III

Tableau III.1 : Composition chimique pour API 5L Gr.B 72	
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques 72	
Tableau III.4 : Métaux d'apports et leurs caractéristiques mécanique..... 74	
Tableau III.3 : Procédés de soudage utilisé pour les assemblages soudés 75	
Tableau III.5 : Matériels utilisé pour l'examen de ressuage (pt). 76	
Tableau III.6 : Matériels utilisé pour l'examen de radiographie..... 78	
Tableau III.7 : Paramètre pour chaque assemblage soudé 80	
Tableau III.8 : Conditions de traitement manuel d'un film..... 81	

Liste des abréviations

- SMAW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.
- GTAW : Soudage TIG.
- GMAW : Soudage MIG –MAG.
- SAW : Soudage à l'arc submergé.
- CND : contrôle non destructif.
- CD : contrôle destructif
- VT : contrôle visuel.
- PT : contrôle par ressuges.
- RT : contrôle par radiographie.
- UT : contrôle par ultrasons.
- ET : contrôle par courants Foucault.
- MT : contrôle par magnétoscopie.
- TT : contrôle par thermographie infrarouge.
- AT : contrôle par émission acoustique.
- QMOS : qualification du mode opératoire de soudage
- DSF : Distance Source Film.
- fg : flou géométrique
- ZAT : Zone affecté thermiquement

Liste des symboles

- C : Carbone.
- Mn : Manganèse.
- Si : Silicium.
- P : Phosphore.
- N : Azote

Introduction générale

Introduction générale

Il est nécessaire et de la plus haute importance de vérifier la santé des soudures sur des tubes de conduites utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière. A cet effet de très nombreuses méthodes sont utilisées. Seuls sont habilités à conduire ces essais :

- Les soudeurs eux même, lorsqu'il s'agit d'opérations directement liées à la procédure de soudage.
- Les opérateurs qualifiés dans les essais destructifs et non destructifs.

Le but de notre travail c'est la comparaison entre plusieurs méthodes de contrôle non destructifs (visuel, ressuage et radiographie) sur des assemblages soudée par déférents métaux d'apports, en prenante en considération les essais destructifs (essai de Traction).

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée de quatre chapitres

- Le premier chapitre nous avons abordé des généralités sur les procèdes de soudages les plus utiliser dans le domaine industriel
- Le deuxième chapitre, une présentation de différentes méthodes des contrôles non destructifs
- Le troisième chapitre, études expérimentales sur les contrôles des assemblages soudés par déférents métaux d'apports.
- Le quatrième chapitre : résultats et Interprétations

Nous avons clôturés par une conclusion générale.

Chapitre I :
**Généralités sur les procédés
de soudage**

1-Introduction

Le soudage peut être défini comme étant un procédé d'assemblage, qui a pour but la création de la continuité physique entre deux éléments métalliques de telle sorte que l'assemblage réalisé satisfait en tout point aux exigences relatives à ses propriétés.

Dans ce chapitre nous allons voir plusieurs procédés de soudage les plus utilisés dans le domaine industriel [1].

2-Histoire du soudage

L'origine du soudage revient à l'âge des métaux (à l'Âge de bronze, on soudait à la poche et à l'Âge du fer, on soudait à la forge.)

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'Âge de bronze : le joint est constitué de deux surfaces se recouvrant et assemblées par chauffage et martelage.

Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2 000 ans. Pendant l'Âge de bronze, les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3 000 ans ont été retrouvés.

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

Fin XIX^e siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés :

- le soudage oxyacétylénique.
- le soudage aluminothermique.
- le soudage à l'arc électrique.
 - Soudage à l'électrode enrobée : inventé en 1904 par Oscar Kjellberg, ingénieur suédois, qui fonde la société ESAB,
 - Soudage à l'électrode réfractaire sous atmosphère protectrice (TIG) : inventé en 1944.
 - Soudage à l'électrode fusible semi-automatique sous atmosphère gazeuse protectrice ou active (MIG, MAG) : inventé en 1947.
- le soudage par résistance.

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

3-Généralités sur le soudage

3-1-Définition du soudage

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

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression.

Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. Dans le cas particulièrement important des matériaux métalliques, le soudage se présente sous deux aspects [3] :

a. Le soudage homogène : Lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de nature Identique (figure I.1).

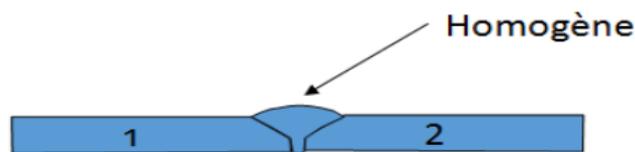


Figure I.1 : Soudage homogène. [4]

b. Le soudage hétérogène :

Le soudage est hétérogène (figure I.2) lorsque le métal de base et le métal d'apport sont de nature différente. [3]

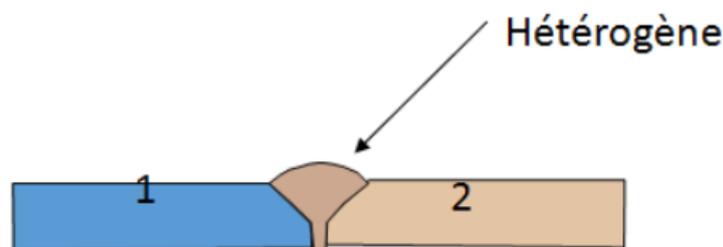


Figure I.2 : Soudage Hétérogène. [4]

3-2-Cycle thermique en soudage

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé [5]

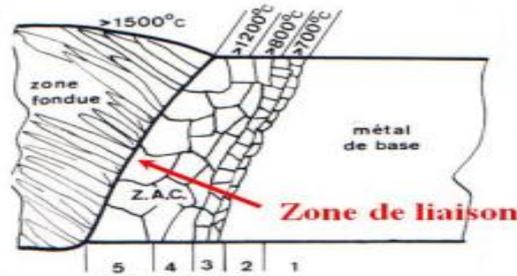


Figure I.3 : Différentes régions de la ZAT et microstructures au voisinage De la zone fondue. [5]

Dans la (figure I.3) 1 et 2 Métal de base : température peu élevée ou ambiante, aucune transformation

3, 4 et 5 – Le grain grossi jusqu’à l’approche du bain de fusion, c’est la ZAT

C’est dans cette région que les risques de fissures à froid peuvent naître, ainsi que les modifications des caractéristiques mécaniques du métal (figure I.4) [5].

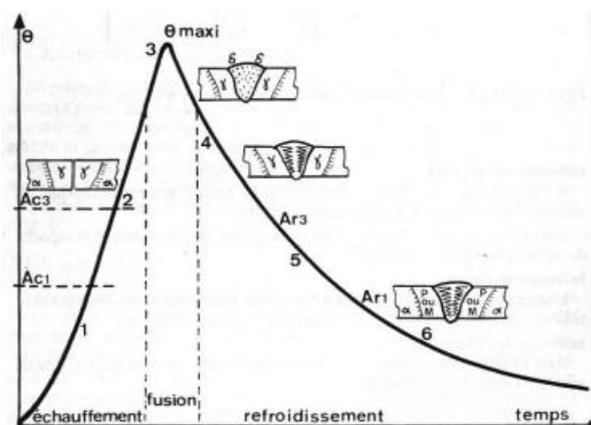


Figure I.4 : Cycle thermique en soudage et transformations structurales. [6]

1. Dilatation, plastification, Ac1 : cessation des états hors équilibre.
2. Dilatation, plastification, Ac3 : austénitisation (maille γ).
3. Dans la zone fondue: fusion, dilution du métal d'apport et du métal de base, dissolution de l'hydrogène (maille δ).
4. Solidification, formation des dendrites (maille γ), retrait, contraintes, Ar3
5. Transformations allotropiques (M ou, M + F + C ou, F + C) diffusion de l'hydrogène, contraintes locales, Ar1, avec (M : Martensite, F : Ferrite et C : Cémentation).
6. Fin de transformation, contraction, contraintes résiduelles, dans certains cas, la fissuration à froid et la diffusion de l'hydrogène jusqu'à la température ambiante [6].

3-3- Différents types d'assemblages

Le choix du type de soudure dépend, dans chaque cas particulier, du procédé, de la nature et de l'épaisseur du matériau. L'objectif est d'obtenir la meilleure résistance mécanique et la meilleure qualité possibles de la soudure, en limitant les coûts. Pour limiter les coûts, il faut limiter la quantité de métal d'apport (le coût est proportionnel au volume de la soudure), l'apport de chaleur (plus il est important et plus il risque d'y avoir des problèmes de résistance aux chocs et de déformation), et le travail de préparation (on choisira de préférence des types d'assemblages dans lesquels les surfaces font partie de la pièce à souder, et donc généralement une soudure d'angle).

La figure (I.5) réunit les principaux termes clés en matière de technologies d'assemblage et la figure (I.6) montre les assemblages les plus courants.[7]

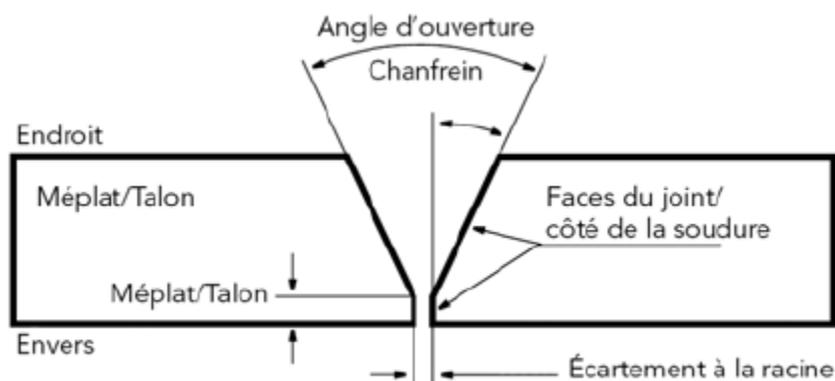


Figure I.5 : Terminologie des assemblages. [7]

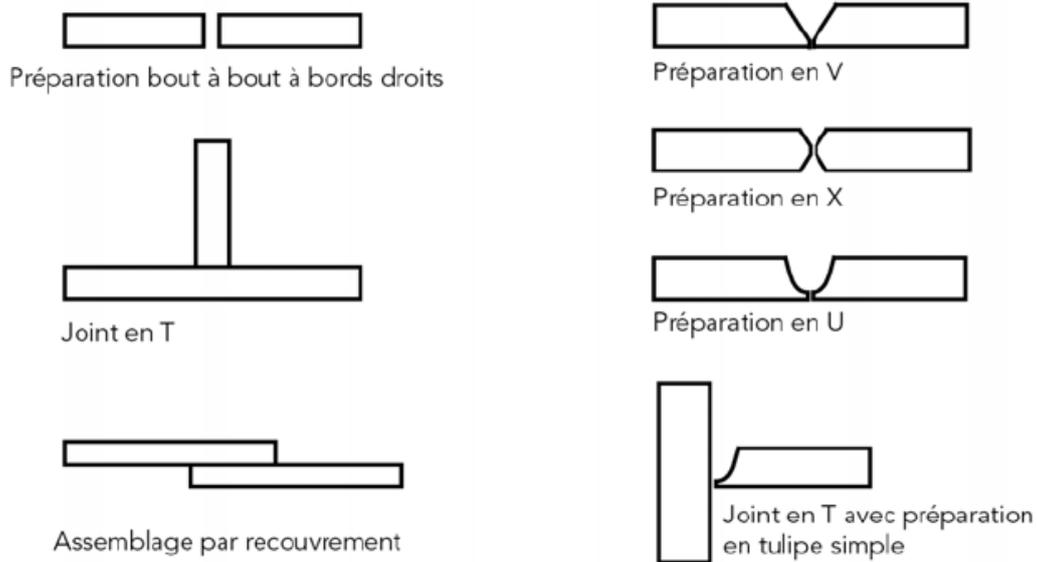


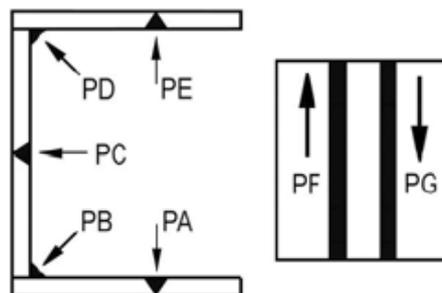
Figure I.6 : Défèrents types d'assemblages. [7]

3-4-Positions de soudage

Le soudage peut se faire à plat, en corniche, au plafond ou en position verticale.

Dans ce dernier cas, il peut se faire de bas en haut (en montant --PF) ou de haut en bas (en descendant PG) (figure I.7).

Les soudures d'angle se font en corniche ou à plat, mais aussi dans les positions intermédiaires PB et PD, comme sur la figures (I.8). Des dénominations correspondantes existent pour le soudage de tubes [7].



PA : à plat. PB : d'angle en position horizontale. PC : en corniche. PD : d'angle au plafond. PE : au plafond. PF : verticale montante. PG : verticale descendante

Figure I.7 : Dénominations des positions de soudage pour les soudures bout à bout. [7]

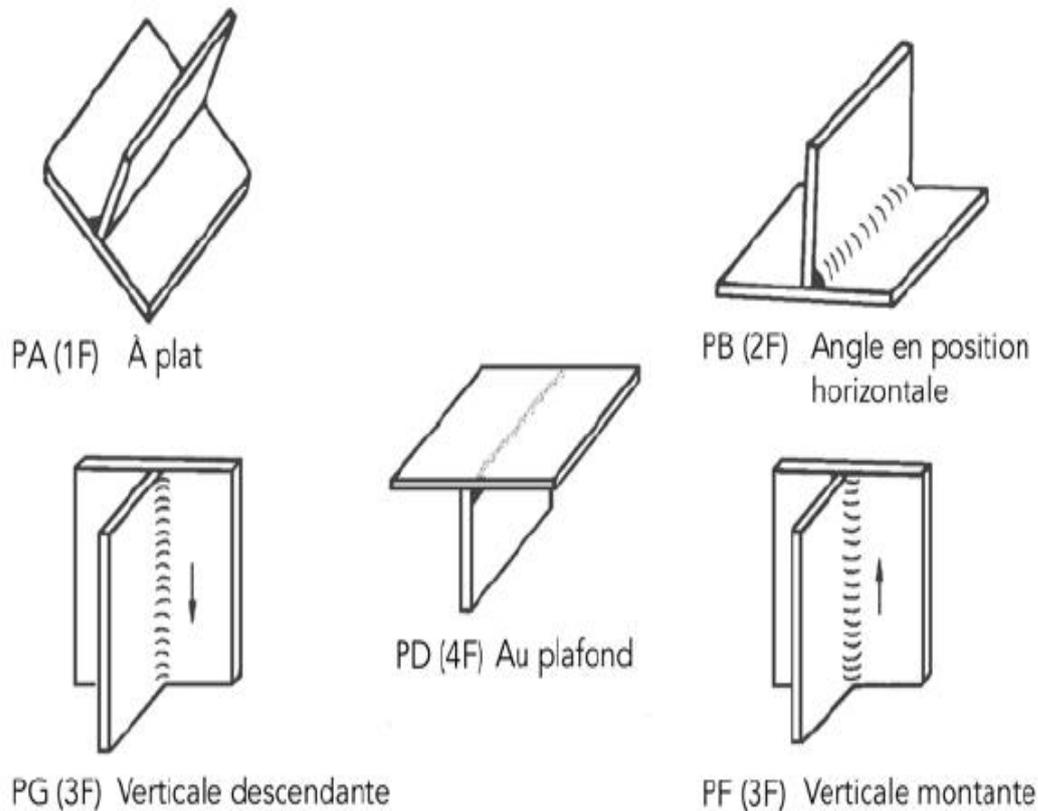


Figure I.8 : Dénomination des positions de soudage pour les soudures d'angle, conformément à la norme EN ISO 6947. [7]

4-Les principaux procédés de soudage

4-1-Définitions des procédés de soudage

La norme ISO 857 définit les procédés de soudage. La norme ISO 4063 définit la nomenclature et la numérotation des procédés. Le tableau (I.1) donne des exemples de numérotation des procédés de soudage. Les désignations numériques figurent sur les dessins (norme ISO 2553) ou les qualifications des modes opératoires de soudage (QMOS) (norme EN ISO 15614-1).[7] (voire figure I.9)

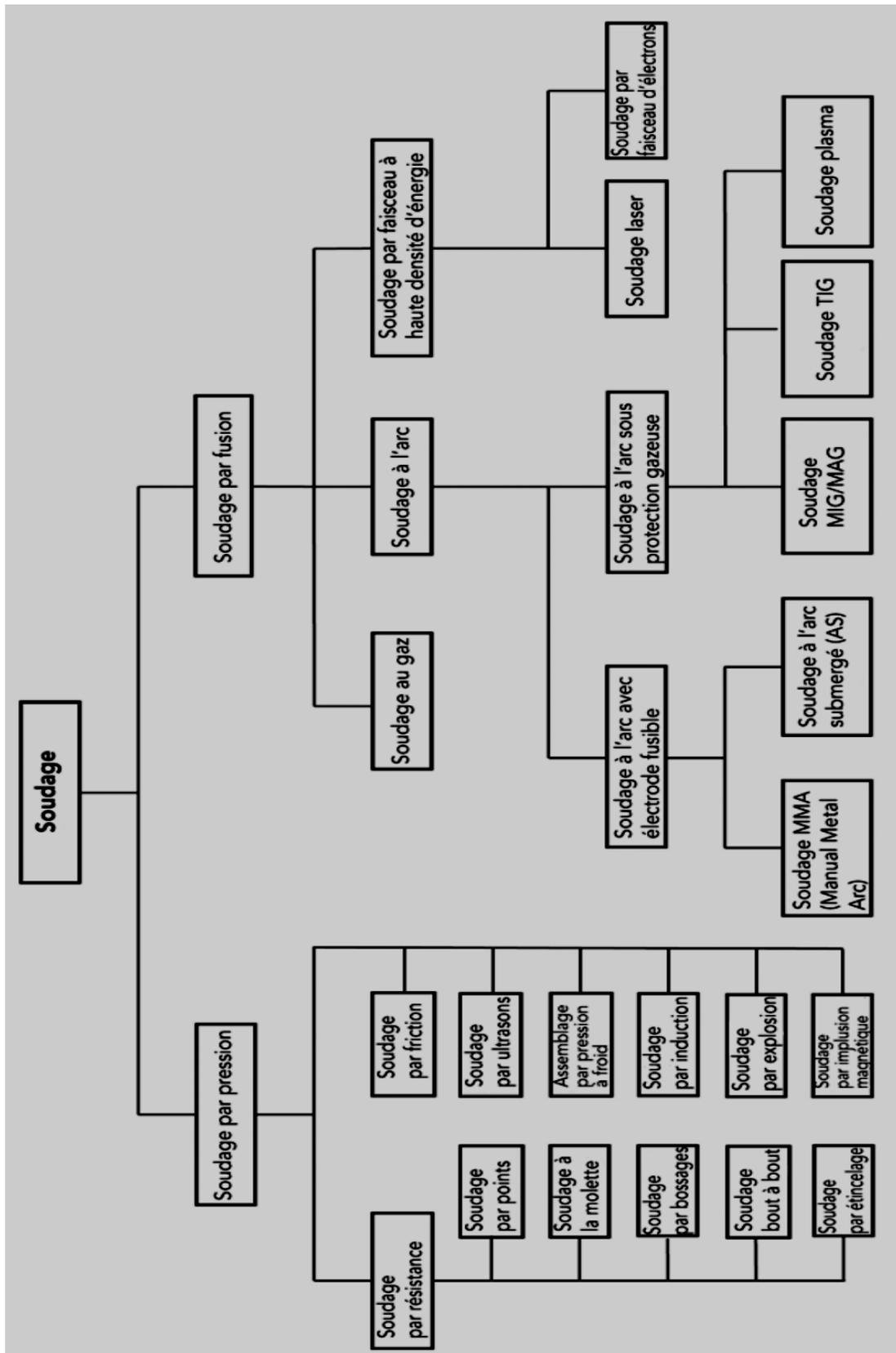


Figure I.9 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus. [7]

Tableau I.1 : Numérotation de quelques procédés de soudage par fusion (norme ISO 4063).

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

4-2- Soudage à l'arc à l'électrode enrobée SMAW (111)

4-2-1- Définitions du soudage à l'électrode enrobée

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (figure I.10) (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur [9].

**Figure I.10** : soudage à l'arc à l'électrode enrobée SMAW [10].

4-2-2-Principe de soudage a l'électrode enrobée

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder [8].

4-2-2-1-Schéma du soudage à l'électrode enrobée (figure I.11)

Lorsque l'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégage un fort effet calorifique provoquant la fusion de l'électrode.

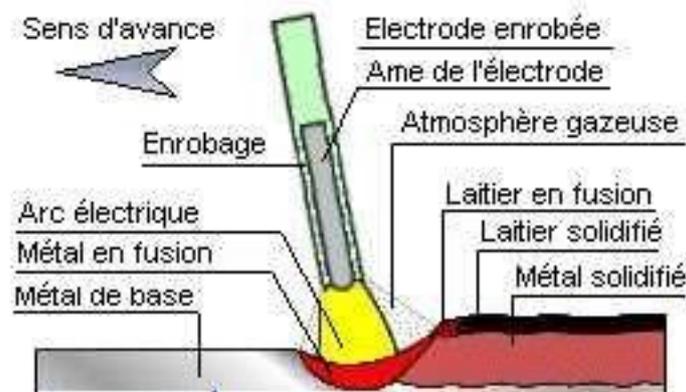


Figure I.11 : schéma du soudage à l'arc (EE) [10].

4-2-2-2-L'arc électrique

Pour qu'il y ait un arc électrique (figure I.12), il faut :

- * La présence d'une tension suffisante entre les électrodes
- * Le maintien d'une intensité minimale
- * Un milieu suffisamment ionisable.



Figure I.12 : l'arc électrique du soudage [10].

4-2-3-Réglage du poste

C'est l'intensité du courant que l'on règle, elle est donnée par la formule :

$$\text{Intensité (A)} = (\text{\textcircled{Ø}} \text{ de l'électrode (mm)} - 1) \times 50$$

4-2-3-1-L'électrode enrobée

Une électrode enrobée est constituée par (figure I.13) :

- *une âme métallique de forme cylindrique
- *un revêtement ou enrobage de composition chimique très variée.

Les diamètres des électrodes enrobées sont mesurés sur l'âme nue. La longueur de l'électrode est la longueur totale comprenant :

- * la longueur de la partie enrobée
- * la longueur de la partie dénudée, destinée à être pincée dans le porte-électrode.

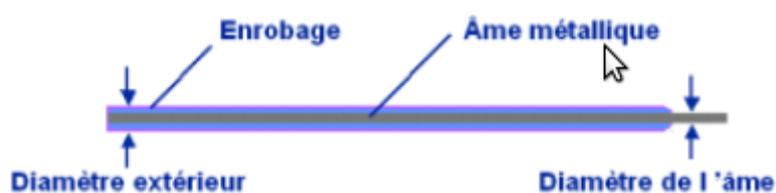


Figure I.13 : constitution d'une électrode enrobée [11].

On distingue notamment l'enrobage [11] :

-Rutile (R ou RR) : L'enrobage est composé en grande partie d'oxyde de titane (le rutile) ou de composés dérivés, avec des alliages ferreux et des silicates pour affiner le métal.

-Basique : (B) : L'enrobage contient en grande quantité des carbonates de calcium, des alliages et du fondant (spath fluor) abaissant la température de fusion.

-Acides (A) : L'enrobage contient des oxydes de fer et de manganèse ainsi que des désoxydants.

Oxydant : (O) : L'enrobage contient des oxydes de fer, de silice et de silicates pour un bel aspect de finition en soudage.

Cellulosique (c) : L'addition de cellulose et de matières organiques produit lors de la chauffe une abondance de gaz dont le souffle améliore la pénétration.

4-2-3-2- Rôle de l'enrobage

L'enrobage remplit un grand nombre de fonctions qui peuvent en définitive se résumer à trois :

-Rôle électrique : l'enrobage facilite la stabilité de l'arc. L'ionisation qui se produit entre l'électrode et la pièce permet l'amorçage et le maintien de l'arc.

-Rôle métallurgique : l'enrobage forme, par sa fusion, un écran qui évite l'action néfaste des gaz de l'air (oxygène et azote). En outre, l'enrobage incorpore au métal fondu des éléments qui viennent remplacer ceux qui ont été volatilisés ou brûlés du fait de la haute température.

-Rôle physique : l'enrobage guide l'arc et lui assure une direction bien déterminée et constante. On note d'ailleurs la formation, à l'extrémité de l'électrode, d'un cratère (l'enrobage fondant moins vite que l'âme métallique) qui guide l'arc.

En outre, les corps contenus dans l'enrobage peuvent modifier la forme du dépôt. Ainsi une électrode déterminée pourra fournir des cordons de soudure ayant la forme désirée : bombés, plats ou concaves. D'autre part, dans le soudage en position, le laitier soutient par action physique, le métal en fusion. Il retarde ainsi le refroidissement du dépôt [11]

4-2-4-Avantages et Inconvénients du procédé SMAW

a-Avantage

- Faible coût de l'installation
- Vaste domaine de produits
- Vaste domaine d'utilisation
- Cordon de qualité

b- Inconvénient :

- Faible facteur de marche
- Faible taux de dépôts (1 à 2,5 kg / Heure)
- Présence de laitier [12].

4-3-Soudage MIG /MAG (GMAW)

4-3-1-Définition du procédé

Le soudage à l'arc sous protection de gaz inerte ou actif avec fil électrode fusible (GMAW) (figure 14) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil d'apport (de \varnothing 0,6 mm à \varnothing 2,4 mm) à dévidage continu et à vitesse constante (de 2 à 20 mètres/minutes environ) et la pièce à souder. La vitesse de dévidage du fil détermine l'intensité de soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil métallique pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible de gaz (de 10 à 30 litres/minute de gaz) de protection inerte ou non actif (Argon pur, Argon + CO₂, Argon + CO₂ + H₂) pour le MIG et une protection actif (CO₂ ou Argon + CO₂ ou Argon + O₂) pour le MAG. Un générateur électrique fournit le courant exclusivement continu avec une intensité variant de 40 à 700 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil électrode, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La polarité du fil électrode est toujours positive [9].



Figure I.14 : soudage avec procédé GMAW (MIG/MAG) [9]

4-3-2-Principe du procédé

La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la torche, dans la gaine guide-fil de la torche de soudage jusqu'au tube contact. La torche de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie positive du générateur de soudage à courant continu. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. L'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder.[9] (voir figure I.15 et I.16)

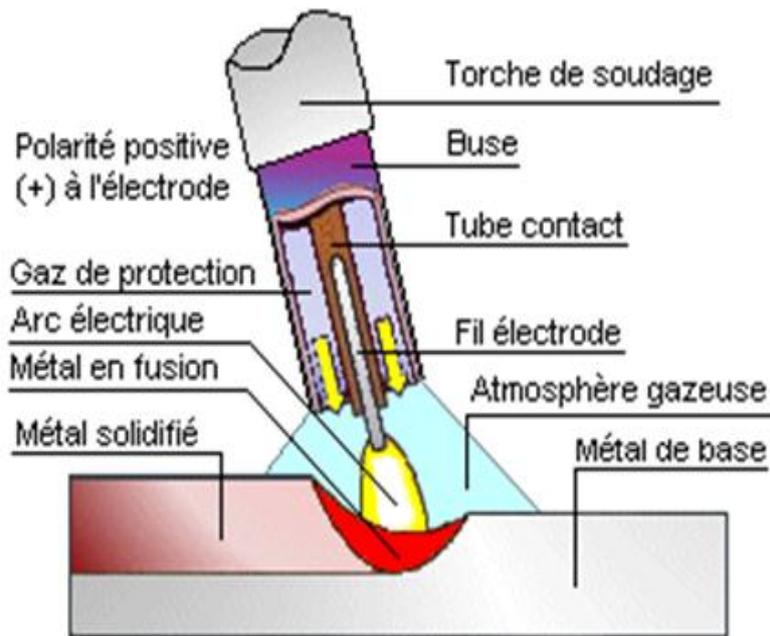


Figure I.15 : Schéma pour torche de soudage GMAW

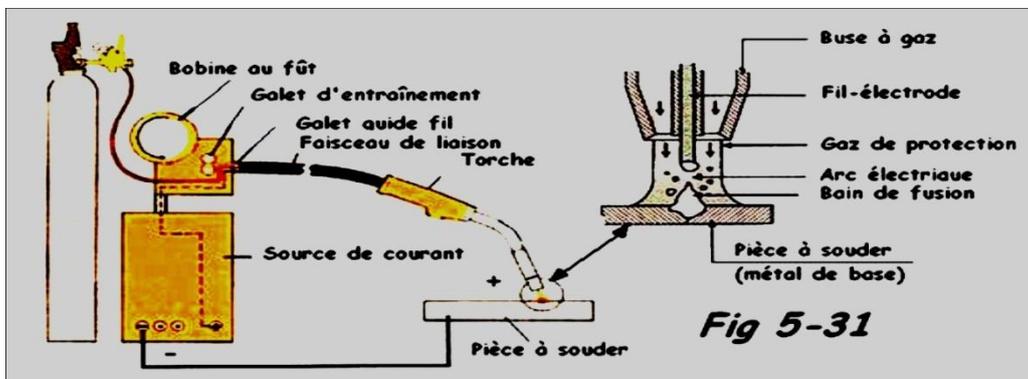
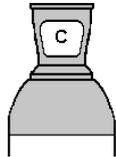
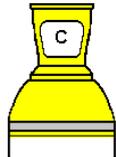
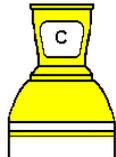
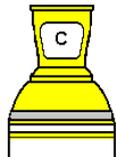


Figure I. 16 : Installation de soudage GMAW

4-3-3-Les gaz de soudage en soudage MAG

Le tableau suivant donne une information sur les gaz utiliser dans le soudage MAG pour les aciers au carbone [9]

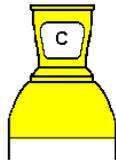
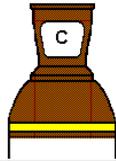
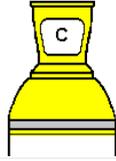
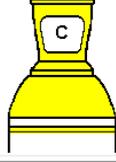
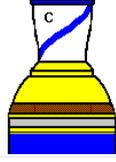
Tableau I.2 : Gaz de protection utiliser dans le procéder MAG.

Composition	Ancienne couleur d'ogive	Avantages	Inconvénients
GAZ PUR			
<u>CO₂</u>		Bon marché. Faible sensibilité à la rouille. Bonne aptitude sur les tôles oxydées. Penetration important.	Aspect de cordon médiocre. Oxydation du cordon en surface. Réglages délicats.
MÉLANGES BINAIRES			
<u>ARGON + CO₂</u>		Réglages relativement faciles. Bon mouillage du cordon. Bain plus chaud. Mélange le plus couramment employé.	Prix de revient plus élevé. Sensibilité à l'humidité et à la rouille.
<u>ARGON + O₂</u>		L'oxygène améliore le mouillage. Peu de projections.	Soudage à plat uniquement.
MÉLANGES TERNAIRES			
<u>ARGON + CO₂ + O₂</u>		Gaz polyvalent.	Prix de revient plus élevé.

4-3-4-Les gaz de soudage en soudage MIG

Le tableau suivant donne une information sur les gaz utiliser dans le soudage MIG pour les aciers au carbone [9]

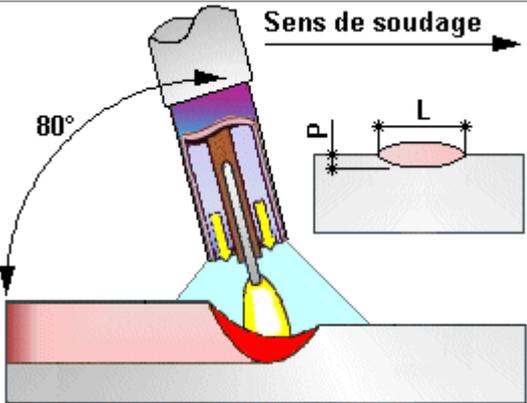
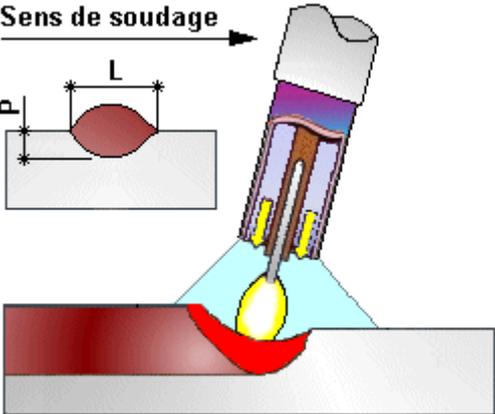
Tableau I.3 : Gaz de protection utiliser dans le procédé MIG

Composition	Ancienne couleur d'ogive	Description
GAZ PUR		
<u>ARGON</u>		Utilisé pour le soudage des aluminiums. Faibles projections.
MÉLANGES BINAIRES		
<u>ARGON + HELIUM</u>		Utilisé pour le soudage des aluminiums. Le pourcentage de He est de 20% à 50%.
<u>HELIUM + ARGON</u>		Utilisé pour le soudage des aluminiums. La pénétration est importante. Les vitesses de soudage sont élevées.
<u>ARGON + CO₂</u>		Utilisé pour le soudage des aciers inoxydables, nickel et alliages de nickel. Le pourcentage de CO ₂ est inférieur à 5%. Utilisable pour toutes les positions de soudage.
<u>ARGON + O₂</u>		Utilisé pour le soudage des aciers inoxydables, nickel et alliages de nickel. Le pourcentage de O ₂ est inférieur à 3%.
MÉLANGES TERNAIRES		
<u>ARGON + HELIUM + CO₂</u>		Utilisé pour le soudage des aciers inoxydables, nickel et alliages de nickel. Arc stable. Transfert par pulvérisation. Bain de fusion fluide.
<u>ARGON + CO₂ + H₂</u>		Utilisé pour le soudage des aciers inoxydables, nickel et alliages de nickel. Arc stable en transfert pulsé. Le pourcentage de CO ₂ est inférieur à 5%. Le pourcentage de H ₂ est inférieur à 2%

4-3-5-Les deux sens de déplacement de la torche de soudage

Ce tableau montre les deux sens de déplacement de la torche de soudage GMAW avec les avantages, les inconvénients et la présentation graphique [9]

Tableau I.4 : Soudage en poussant et en tirant.

SOUDAGE EN POUSSANT / TORCHE POUSSÉE / A GAUCHE	
Avantages / Inconvénients	Représentation graphique
<p>La tôle est bien préchauffée par l'arc. La vision du bain de fusion est totale. La surépaisseur du cordon est moins importante que par la méthode torche tirée. La pénétration est moins prononcée que par la méthode en tirant. Le mouillage est très satisfaisant.</p>	
SOUDAGE EN TIRANT / TORCHE TIRÉE / A DROITE	
Avantages / Inconvénients	Représentation graphique
<p>Le bain de fusion est très chaud, très fluide et difficile à maintenir. Le mouillage est moins bon que par la méthode en poussant. Le cordon de soudure est bombé. La pénétration du bain est importante. La vision du bain de fusion est masqué par la buse de soudage.</p>	

4-3-6-Influence de la hauteur d'arc

La hauteur d'arc détermine la valeur de la tension en Volts et la largeur du cordon de soudure. Plus la hauteur d'arc est grande, plus la tension est élevée et plus le cordon est large (figure 17) [13].

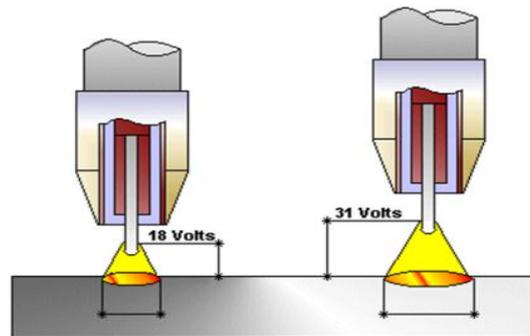


Figure I.17 : Influence de la hauteur d'arc en MIG/MAG

4-3-7-Avantages et Inconvénients du procédé

a - Avantages

- ❖ Forte productivité par rapport à l'ARC E.E. et le TIG
- ❖ Grande vitesse de soudage
- ❖ Taux de dépôt de métal important
- ❖ Limitation des déformations
- ❖ Nombre de reprises de soudure limité
- ❖ Pas de laitier à dégrasser
- ❖ Large gamme d'épaisseur
- ❖ Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- ❖ Soudage dans toutes les positions
- ❖ Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit
- ❖ Aspect de cordon correct
- ❖ Procédé automatisable et utilisable en robotique

b- Inconvénients

- ❖ Entretien fréquent et minutieux
- ❖ le fil peut demeurer, figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail [14].

4-4- Soudage TIG (GTAW)

4-4-1- Définition de soudage TIG

Le procédé de soudage TIG (figure 18) permet d'obtenir des soudures de très haute qualité, et répond parfaitement aux besoins des applications les plus exigeantes, notamment la chaudronnerie, la pose de pipelines, ou la fabrication de réservoirs pour l'industrie agroalimentaire et l'aviation. [15]



Figure I.18 : soudage GTAW [15]

4-4-2- Principe du procédé TIG

Le soudage TIG exploite la chaleur générée par un arc électrique entre les métaux à assembler et utilise une électrode tungstène, située au niveau de la torche de soudage. La zone de l'arc est ensuite entourée d'une enveloppe de gaz inerte afin de protéger le bain de fusion et l'électrode tungstène.

Le soudeur apporte directement à la main le métal d'apport, sous forme de baguette, dans le bain de fusion.

Le soudage TIG est parfaitement adapté aux plaques métal d'une épaisseur comprise entre 8 et 10mm. [15]

4-4-2-1- Buses utilisées en soudure TIG (figure 19)

Les buses utilisées seront soit en céramique (beige) , en oxydes d'aluminium (rose clair) , en nitrite de silicium (gris) , pyrex (transparent) et auront un diamètre qui pourra varier de 6 mm à 20 mm suivant l'intensité de soudage [8].

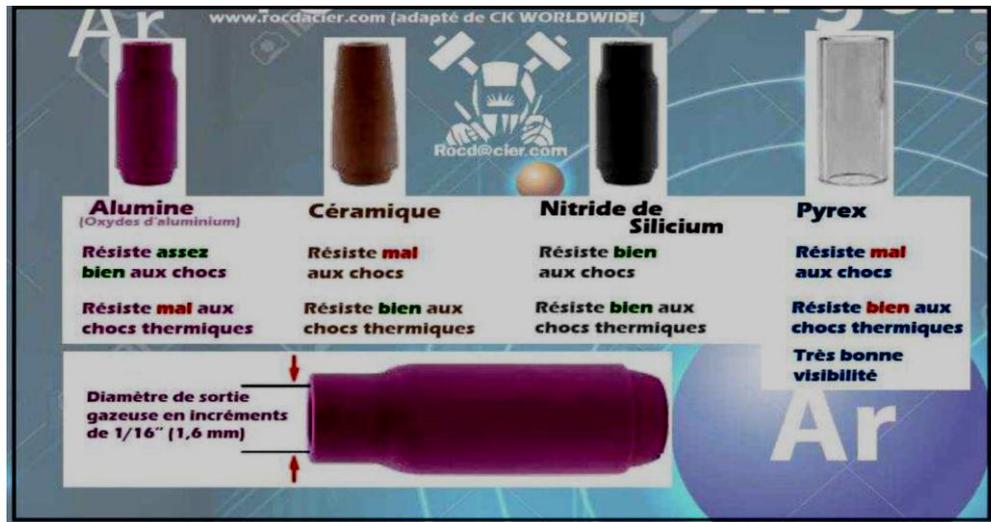


Figure I.19 : Différents BUSES utiliser en soudure TIG.

4-4-3- Gaz utilisés en procédé TIG

- * L'argon pur est le plus couramment utilisé en soudure TIG. (bon amorçage de l'arc)
- * L'hélium utilisé en complément à l'argon, l'arc développe une énergie plus importante et donc des performances accrues du faite de la vitesse plus grande. Le cout du soudage et plus important cependant. (Alliages légers, cuivre ...)
- * L'hydrogène utilisé en addition avec l'argon permet lui aussi d'obtenir un arc plus énergétique, donc une vitesse de soudage améliorée. En outre, une pénétration plus importante est constatée ainsi qu'un aspect plus esthétique du cordon de soudure.
- * l'azote peut aussi être utilisé en complément à l'argon et en très petite quantité pour souder des aciers duplex. Utilisé aussi en protection envers [8].

4-4-4-Transfert du métal

Le transfert de métal dans le soudage TIG (figure 20) . basé sur un arc électrique est établi entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder [8].

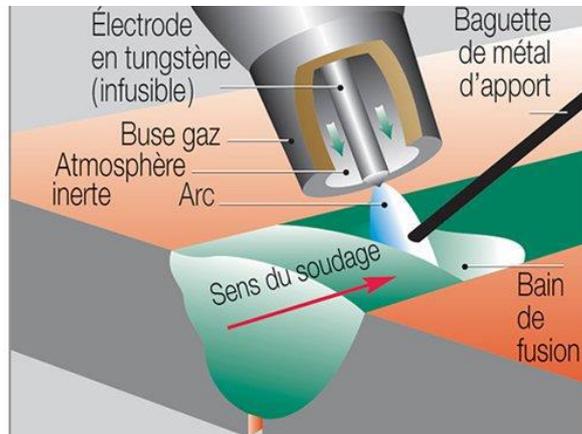


Figure I.20 : transfert de métal dans le soudage TIG.

4-4-5-Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG

- * La vitesse de soudage (avance du soudeur)
- * Le choix et le débit du gaz
- * le choix et le débit du métal d'apport
- * Le choix, l'affûtage et le diamètre de l'électrode réfractaire
- * La position de soudage
- * La préparation
- * La dimension et la nature des matériaux à souder [16]

4-4-6- Les avantages et les inconvénients de procédé TIG

- * Projections minimales
- * Soudures de qualité élevée
- * Toutes les positions de soudage sont réalisables
- * Très grande qualité des soudures
- * Nécessite une grande technicité
- * Faibles vitesses de soudage
- * Lors de la préparation de la soudure, la rouille doit impérativement être éliminée
- * Ne convient pas aux pièces de grande épaisseur [16]

4-5- Soudage à l'arc submergé SAW (12)

4-5-1- Définition de soudage à l'arc submergé

Le soudage à l'arc submergé (figure I. 21) est généralement utilisé dans les applications industrielles impliquant des plaques d'acier épaisses ou des soudures longues. Ce procédé consiste à créer un joint de soudure entre les composants en acier à l'aide d'un arc électrique submergé par une couche de flux en poudre [8].



Figure I.21 : Soudage à l'arc submergé SAW

4-5-2- Principe du procédé

Le soudage à l'arc submergé (AS) repose sur la formation d'un arc entre un fil à distribution permanente et la pièce à souder. Un couvert de flux en poudre permet d'obtenir une protection et constituer un laitier pour la zone à souder. Ce procédé ne nécessite aucun gaz de protection. L'arc est submergé en dessous du couvert du flux, et reste la plupart du temps invisible durant le soudage.

Le soudage AS s'effectue normalement en mode automatique ou semi – automatique. Ce procédé est généralement limité aux soudures d'angle à plat ou soudures d'angle en gouttière [8].

4-5-3- Schéma du soudage sous flux

La figure ci déçu représente le principe de fonctionnement du soudage sous flux [17]

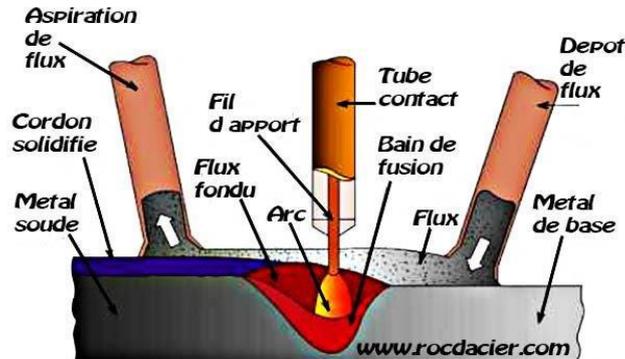


Figure I.22 : Schéma du soudage sous flux

4-5-4- Domaines d'applications

Essentiellement utilisé en automatique, le procédé SAW est employé pour des pièces ayant des épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 200/300 mm et apporte à la fois en usine et sur chantier, une grande vitesse de soudage et des taux de dépôt élevés. On rencontre ce procédé, avec un ou plusieurs fils dans beaucoup d'industries, notamment charpente métallique, chantier naval, chaudronnerie (appareilles sous pression), tuyauteries industrielles, off-shore, industrie chimique / pétrochimique, rechargement cylindres de laminoirs, etc... [17]

4-5-5- Les avantages et les inconvénients

- * Rapidité du procédé, absence de métal d'apport.
- * Précision et propreté.
- * Possibilité de joindre des matériaux différents.
- * Bonne résistance mécanique du joint soudé.
- * Coût d'acquisition et de maintenance très élevés.
- * Précision requises pour la préparation des joints.
- * Niveau important de formation des opérateurs [17]

4-6- Soudage par résistance

4-6-1-Soudage par point

4-6-1-1-Définition du procédé

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. Ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes (figure 23). [9]

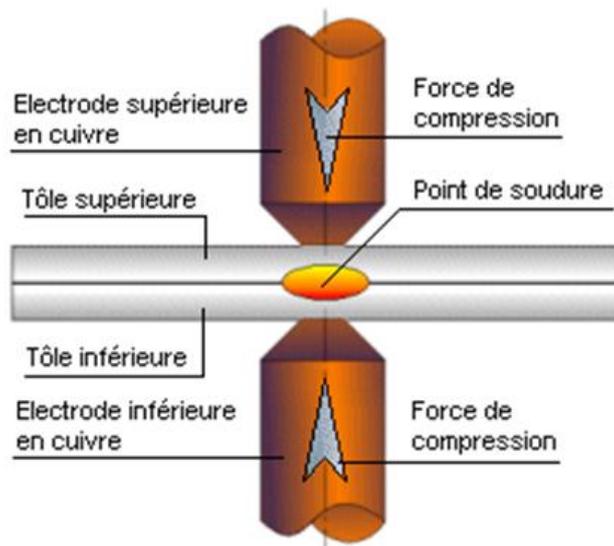


Figure I.23 : soudage par point

4-6-2-Soudage à la molette

4-6-2-1-Définition du procédé

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux molettes (figure 24) en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / molettes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux molettes. Le soudage à la molette permet d'obtenir une soudure continue et étanche lorsque le passage de courant est continu. [9]

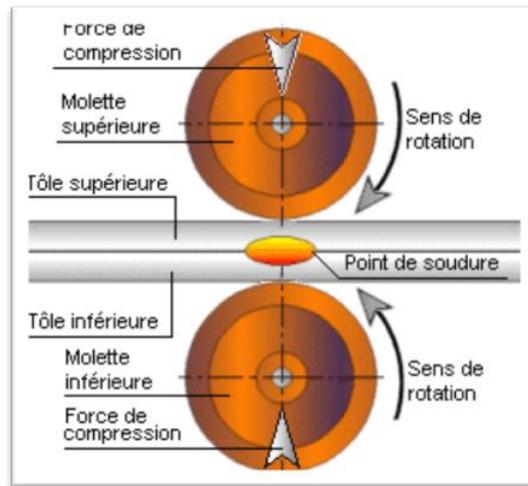


Figure I.24 : Soudage à la molette.

4-6-3-Les avantages et les inconvénients du procédé

a-Avantages :

- *Rapidité d'exécution
- *Absence de préparation des bords à souder
- *Possibilité d'automatisation

b- Inconvénients :

- *Épaisseur limitée aux capacités machines
- *Difficulté de contrôle de qualité des points soudés [18]

5-les défauts de soudage [19]

5-1-Caniveaux

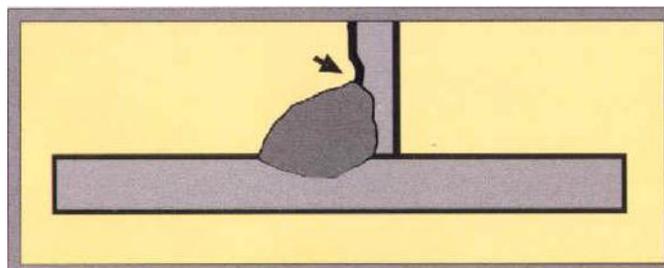


Figure I.25 : Caniveaux

Cause :

- Courant de soudage trop élevé.
- Électrode incorrecte ou mal inclinée.
- Arc trop long.
- Électrode de trop gros diamètre pour la tôle à souder.

Remède :

- Orienter correctement l'électrode.
- Tenir un arc plus court.
- Utiliser une électrode de diamètre approprié.

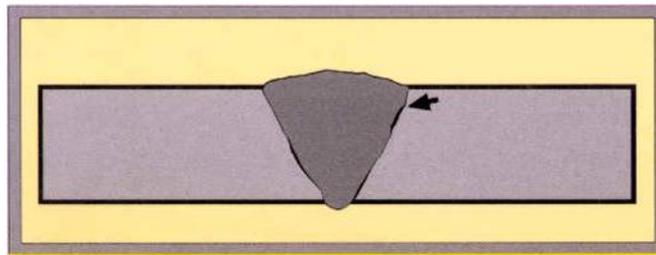
5-2-Manque de fusion : collage

Figure I.26 : Manque de fusion (collage)

Cause :

- Courant de soudage trop faible.
- L'angle d'inclinaison de l'électrode est incorrect.
- Vitesse de soudage trop rapide.

Remède:

- Augmenter le courant de Soudage
- L'angle de l'électrode doit permettre l'établissement de l'arc avec les parois du joint.
- Adapter la vitesse de soudage à la vitesse de fusion de l'électrode.

5-3-Porosites

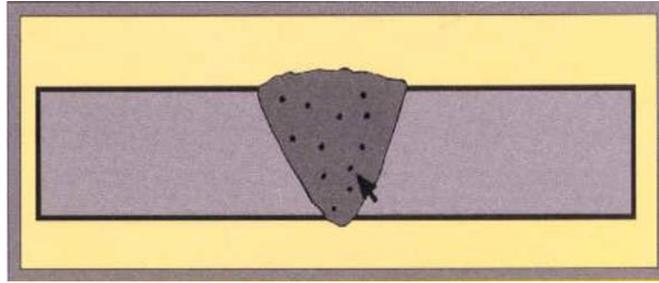


Figure I.27 : Porosites

Cause:

- Électrodes humides par suite d'un stockage dans de mauvaises conditions.
- Saletés sur la surface du joint.
- Vitesse de soudage trop rapide.
- Arc trop long.

Remède:

- Sécher les électrodes suivant les indications du fabricant ou utiliser un nouveau carton d'électrodes sèches.
- Bien nettoyer les bords pour éliminer toute trace de peinture, rouille, calamine, huile, humidité, etc...
- Avancer moins vite
- Tenir un arc plus court.

5-4-Projections excessives

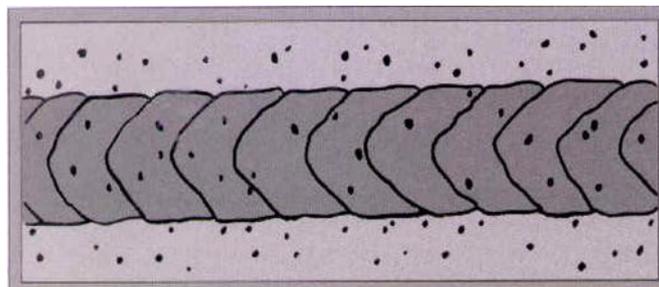


Figure I.28 : Projections excessives

Cause:

- Courant de soudage trop élevé.
- Arc trop long.
- Mauvaise polarité
- Électrode défectueuse.

Remède:

- Réduire le courant de soudage.
- Réduire la longueur d'arc.
- Vérifier si la polarité convient pour l'électrode utiliser.
- Utiliser des électrodes correctes. Si nécessaire, ouvrir un nouveau carton.

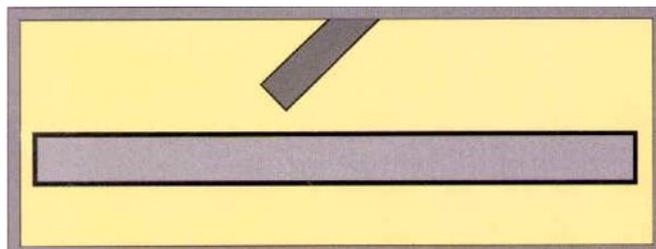
5-5-Difficultés d'amorçage

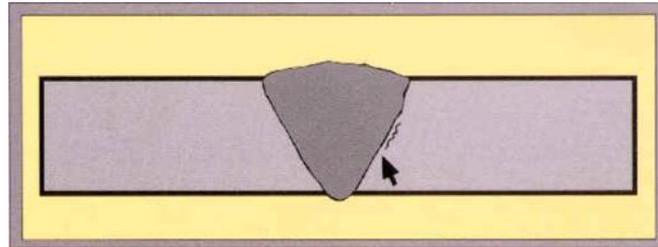
Figure I.29 : Difficultés d'amorçage.

Cause:

- Courant de soudage trop faible.
- Tension d'amorçage trop faible.
- Mauvais contact de la pince pièce.
- L'enrobage de l'électrode recouvre le bout de l'âme.

Remède:

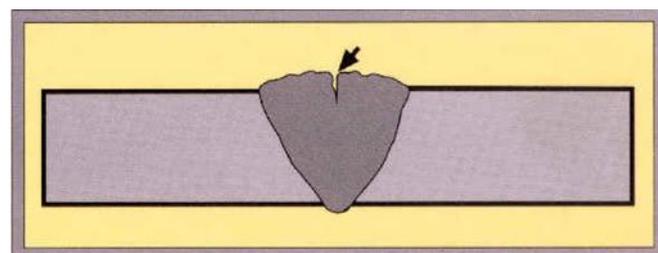
- Augmenter le courant de soudage.
- La tension à vide du générateur de courant de soudage est trop faible pour l'électrode utilisée.
- Placer la pince sur une partie de métal bien nettoyé.
- Mettre à nue le bout de l'âme de l'électrode et amorcer l'arc.

5-6-Fissuration sous cordon**Figure I.30** : Fissuration sous cordon**Cause:**

- Trempabilité de la pièce à souder (forte teneur en carbone, manganèse ou autres alliage).
- Refroidissement trop rapide de la zone affectée thermiquement.
- Électrode humide (dégagement de l'hydrogène qui peut causer la fragilisation)

Remède:

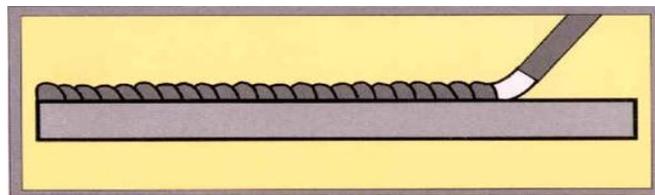
- Si possible utiliser un métal plus soudable.
- Souder avec une température plus élevées (préchauffage) qui contribue à un refroidissement plus lent (trempabilité réduite de la zone de transition).
- Utiliser des électrodes basiques sèches.

5-7-Fissures de solidification**Figure I.31** : Fissures de solidification**Cause:**

- L'électrode utilisée ne convient pas.
- La pièce à souder peut avoir une teneur élevée en carbone ou phosphore
- Mauvaise géométrie du cordon.
- Les soudures (en général les passes de pénétrations et pointages) ne sont pas assez solides pour supporter le retrait

Remède:

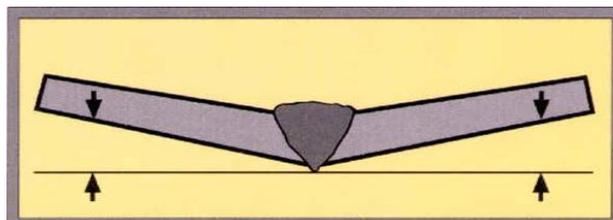
- Utiliser des électrodes basiques (moins sujettes à la fissuration)
- Utiliser pour la pièce un métal de qualité soudable
- Éviter les espacements trop importants des joints bout à bout. Assurer une bonne pénétration de la passe de fond.
- Sur les pièces bridées pour éviter la déformation, des pointages et des passes de fond solides sont indispensables.

5-8-Soufflage magnétique de l'arc**Figure I.32 :** Soufflage magnétique de l'arc**Cause :**

- Déviation de l'arc sous l'effet de forces magnétiques.
- Se produit en général en soudage C.C. (courant continu)
- Se produit surtout sur les bords des pièces et dans les espaces confinés

Remède:

- Monter la pince des pièces au point de départ du joint (souder à partir de la pince de pièce – masse -).
- Souder si possible en C.A. (courant alternatif)
- Incliner l'électrode par rapport au joint ; Utiliser un arc aussi court que possible.

5-9-Déformation**Figure I.33 :** Déformation

Cause:

- Séquence de soudage inadaptée.
- Trop d'apport de chaleur, en utilisant une électrode de diamètre trop petit.
- Soudures asymétriques.
- Bridage incorrecte ou gauchissement.

Remède:

- Soudage des deux côtés. Sur les assemblages fabriqués, souder du milieu vers les bords.
- Utiliser une électrode de diamètre plus grand.
- Souder selon une séquence appropriée (respecter l'ordre correcte).
- Compenser la déformation par un bridage des pièces, avec un angle opposé, permettant le retrait.

5-10-Defaut de la passe de fond : manque de pénétration

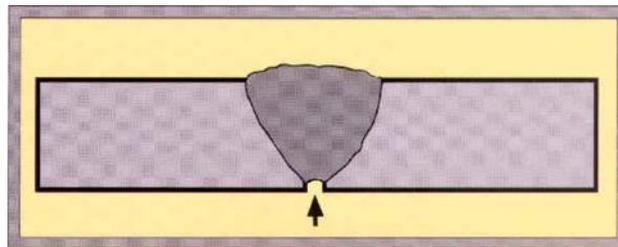


Figure 34 : Manque de pénétration

Cause:

- Vitesse d'avance trop rapide.
- Mauvaise fréquence de l'électrode.
- Joint trop étroit.
- Électrode de diamètre trop grand.

Remède

- Réduire la vitesse d'avance
- Faire osciller l'électrode d'un bord et l'autre du joint.
- Espacer un peu plus les pièces ou agrandir le joint par meulage.
- Choisir le diamètre de l'électrode permettant d'atteindre le fond du joint.

5-11-Fissure de cratère

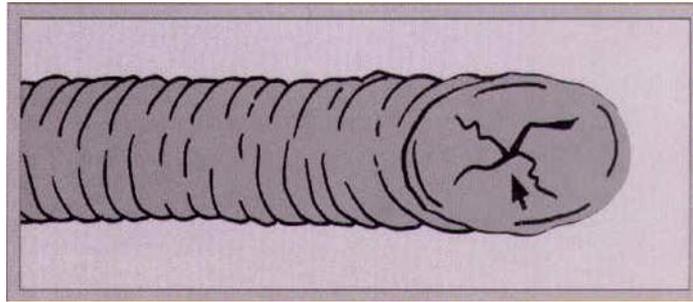


Figure 35 : Fissure de cratère.

Cause :

- Arrêt brutal de soudage. (Des fissures se forment à partir du cratère, en raison du retrait de refroidissement).

Remède:

- A la fin du soudage, revenir avec l'électrode au-dessus du cratère pour le remplir.

5-12-Inclusions de laitier

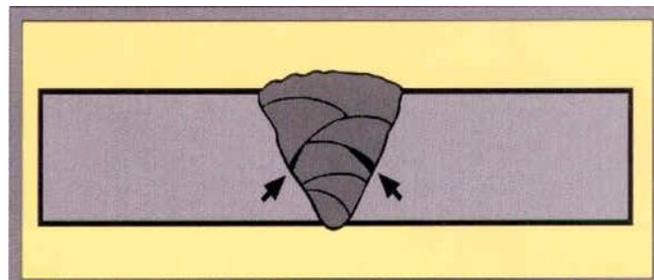


Figure 36 : Inclusions de laitier

Cause :

- Le laitier coule en avant de l'arc.
- Le laitier des cordons précédents n'a pas été totalement éliminé.
- Le cordon trop bombé contient des poches de laitier.

Remède:

- Augmenter la vitesse de soudage ou incliner un peu plus l'électrode.
- Enlever soigneusement le laitier et meuler si nécessaire.
- Le respect d'une technique correcte donne un cordon plat.

Chapitre II :

Présentations des contrôles non destructifs

1-Introduction

L'appellation Contrôle Non Destructif fait naturellement penser au diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient : le même principe appliqué aux pièces mécaniques consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger « sans destruction » l'état de santé des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction pour laquelle elles sont destinées.

Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps et des lois générales de la mécanique de la rupture.

Dans la pratique, les spécialistes en contrôle non destructif chargés de l'inspection sont davantage confrontés à des problèmes d'interprétation des résultats de contrôle par rapport à des critères établis en liaison avec le concepteur de la pièce. Dans cet esprit, la définition suivante des Contrôles Non Destructifs apparaît plus proche de la réalité industrielle : 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 ».

En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce [20].

2-Applications et tendances

2-1- Champ d'application actuel

Le contrôle non destructif est essentiel pour la bonne marche des industries qui fabriquent, mettent en œuvre ou utilisent les matériaux, les produits et les structures de toutes natures.

A l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des CND ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique.

Après le contrôle des biens d'équipements, vient celui des biens de consommation. La nature des défauts que l'on cherche à détecter se diversifie du même coup ; on recherche les défauts technologiques ponctuels graves, comme ceux inhérents à la fabrication et à l'utilisation des

métaux (fissure de fatigue), mais aussi des défauts d'aspect (taches sur une surface propre) et des corps étrangers nuisibles (éclats de verre dans un emballage alimentaire).

On peut, par ailleurs, considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie, conduisant à trois types d'applications.[20]

2-1-1-Le contrôle en cours de fabrication

Le contrôle en cours de fabrication procède de la philosophie de l'instrumentation industrielle en tant qu'outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.[20]

2-1-2- Le contrôle de réception

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison procède d'une philosophie de respect de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

Si l'aspect coût et productivité peut avoir encore une certaine importance à ce stade de contrôle, c'est surtout l'aspect procédure de la démarche qui devient primordial, qu'il s'agisse du choix du procédé, du choix des paramètres de réglage, de l'étalonnage, de la présentation et de l'archivage des résultats obtenus. À ce stade, il s'agit de détecter des défauts mais aussi souvent d'en définir la nature et les dimensions.[20]

2-1-3- Le contrôle en service

Le contrôle en service s'effectue sur pièces ou structures lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement. On en attend une très grande fiabilité car les risques de non-détection d'un défaut sont graves. Pour ce type de contrôle, il convient de pouvoir estimer le mieux possible la nature et les dimensions des défauts pour pouvoir en apprécier la nocivité ; il faut disposer aussi d'une grande reproductibilité de l'examen non destructif, de façon à pouvoir suivre l'évolution du dommage au cours du temps[20].

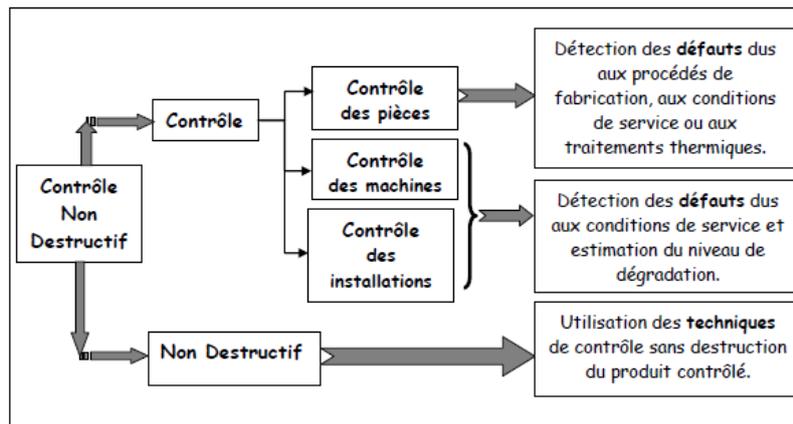


Figure II.1 : Champ d'application du CND [20]

3- Principes de détection des défauts par CND

3-1-Hétérogénéités et défauts

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

3-1-1- Les défauts de surface

Les défauts de surface, accessibles à l'observation directe mais pas toujours visibles à l'œil nu, peuvent se classer en deux catégories distinctes : les défauts ponctuels et les défauts d'aspect.

a- Les défauts ponctuels : qui correspondent 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 (quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection de méthodes non destructives sensibles, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, les ultrasons.

b- Les défauts d'aspect : qui correspondent à des plages dans lesquelles une variation de 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 à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

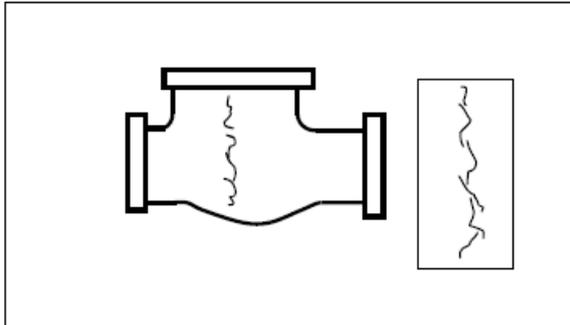


Figure II.2 : Crique

Criques : fissures inter granulaires, souvent d'aspect oxydé dans des zones de contraintes se solidifiant en dernier après moulage.

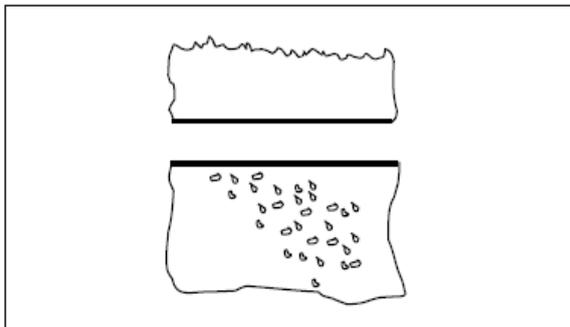


Figure II.3 : Piqure

Piqures : petites cavités ou micro soufflures à parois lisses quelque fois à parois brillantes (hydrogène), bleutées (CO), air (oxydées). Apparition sur l'ensemble de la surface du moulage

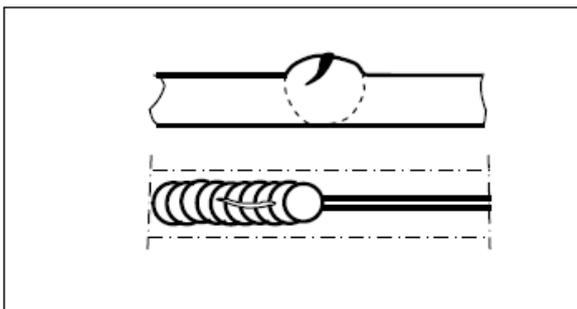


Figure II.4 : Fissure

Fissures : défaut de surface d'un cordon de soudure par exemple.

3-1-2- Les défauts internes

Ils 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 [21].

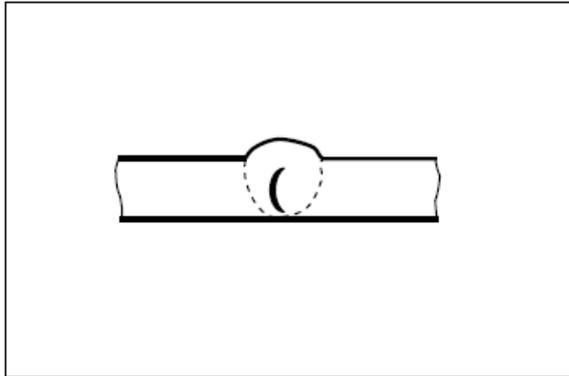


Figure II.5 : Crique interne

Criques internes : des fissures se forment dans le métal déposé, lors du refroidissement, donc sous l'effet des retraits.

Certaines des causes: % C élevé, épaisseur et retraits importants, manque de pénétration ou section de soudure insuffisante...

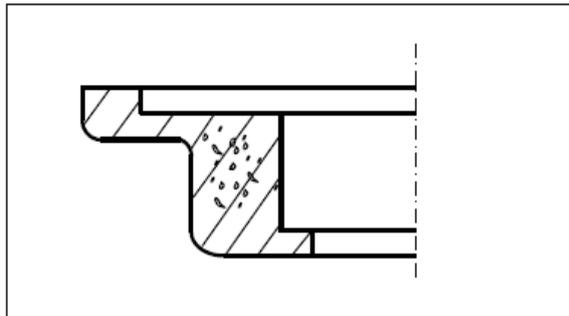


Figure II.6 : Porosité

Porosités : microporosités spongieuses localisées dans les zones de fin de solidification (massives) souvent avec concentrations d'inclusions et des précipitations de gaz.

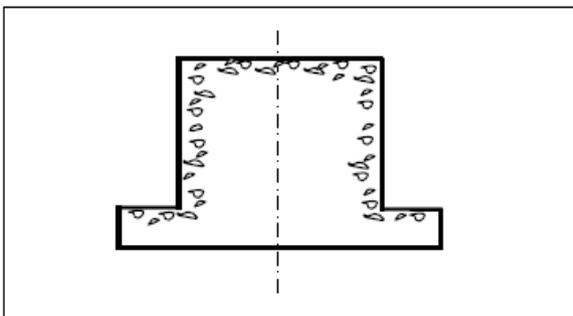


Figure II.7 : Soufflure

Soufflures : petites cavités dispersées situées en points hauts de la pièce à parois lisses, origine gazeuse.

3-2- 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 [21].

3-3- Principe de la détection d'un défaut

Le principe de la détection d'un défaut (figure II.8) consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Schématiquement, on peut généralement distinguer les étapes suivantes, quelle que soit la méthode employée :

- ◆ Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**) ;
- ◆ Modulation ou altération de ce processus par les défauts (**perturbation**) ;
- ◆ Détection de ces modifications par un capteur approprié (**révélation**) ;
- ◆ Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

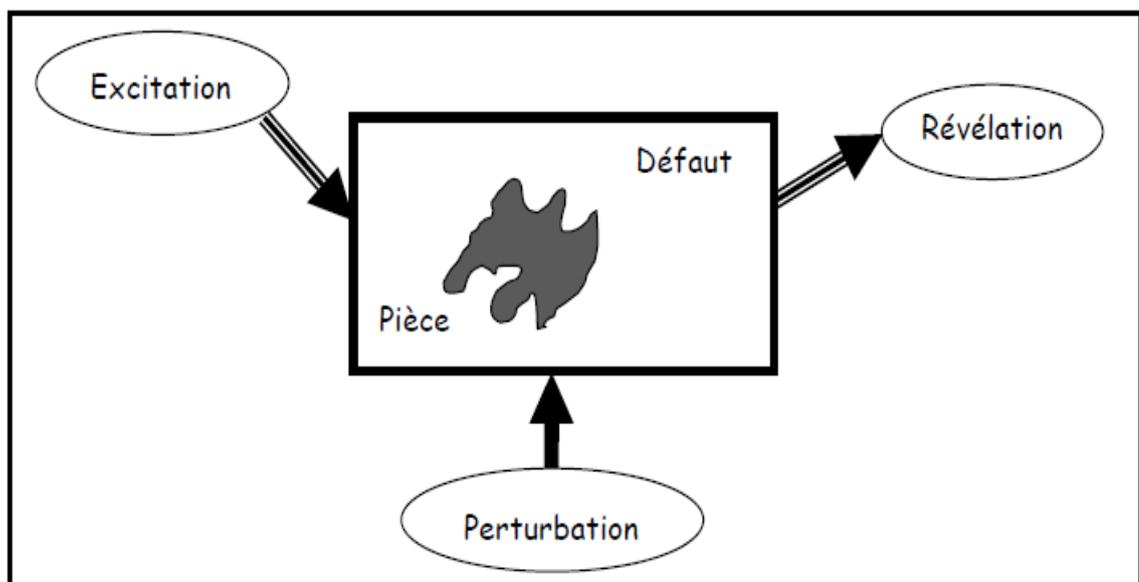


Figure II.8 : Principe de détection d'un défaut.

Différents types d'énergie sont employés en pratique : énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, observation dans le visible, flux magnétique...). On peut schématiquement distinguer deux groupes de méthodes de détection :

- Les méthodes de flux, avec une excitation et une détection de même nature et pour lesquelles le défaut introduit une perturbation de flux qui peut être relevée soit directement dans le flux transmis (radiographie) ou le flux rediffusé (ultrasons), soit par un effet de proximité (bobine de sonde à courants de Foucault, flux de fuite magnétique) : (figure II.9) la grande majorité des procédés du contrôle non destructif se réfère à ce groupe de méthodes.

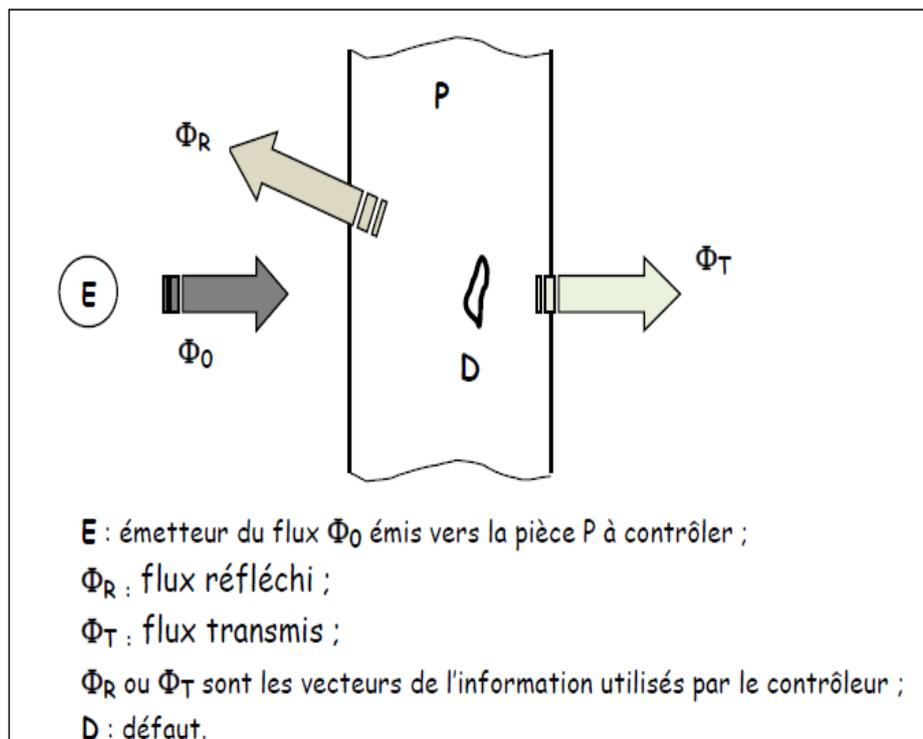


Figure II.9 : méthode de flux

- **b-** Les méthodes pour lesquelles l'excitation et la détection sont de natures différentes, chacune mettant en jeu un processus original et spécifique ; l'excitation la plus employée est la sollicitation mécanique ; elle conduit aux techniques d'analyse de vibrations mécaniques ou de microdéformations (interférométrie holographique) ou encore à une technique d'émission provoquée dont la plus connue est l'émission acoustique [21].

4-Techniques de contrôle

4-1-Examen visuel (VT)

4-1-1- Introduction

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

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

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

4-1-2- Éclairage

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

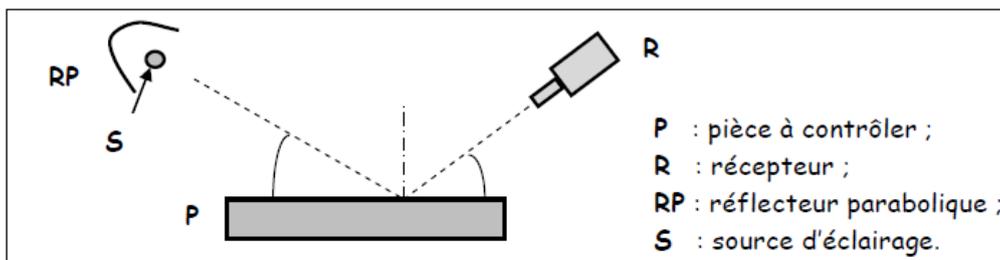


Figure II.10: Contrôle visuelle d'une pièce

4-1-3- L'œil et ses limitations

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

4-1-4- Aides optiques à la vision

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

4-1-4-1- Appareils optiques classiques

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

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

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

4-1-4-2- Appareils optiques spécifiques

Des appareils optiques spécifiques ont été développés pour le CND.

a- L'endoscope est un appareil conçu pour pouvoir observer les surfaces non directement accessibles à l'œil telles que les parois d'un tube ou d'une cavité, d'un alésage ou d'un trou borgne. Mis au point à l'origine pour les examens liés au diagnostic médical, les endoscopes classiques à lentilles ont été remplacés par des transmetteurs d'image à fibres optiques

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

4-2- Contrôle par ressuage (PT)

4-2-1- Introduction

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

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

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

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

4-2-2- Principe de ressuage

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

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

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

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

4-2-3- Domaine d'application

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

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

4-2-4-Produits de ressuage

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

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

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

4-2-5-Fiabilité

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

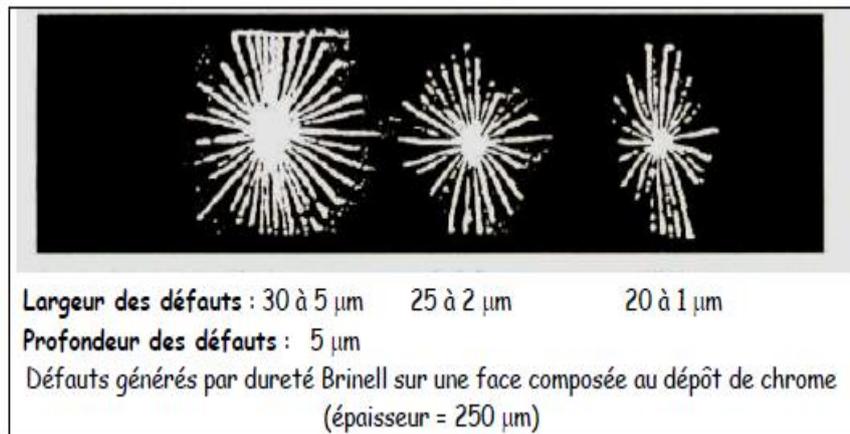


Figure II.11 : Témoignage pour examen de ressuage

4-2-6- Interprétations des résultats

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

4-2-6-1- Interprétation – Evaluation

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

4-2-6-2- Origine des indications

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

4-2-6-3- Type d'indications

Les indications peuvent être classées en trois types :

a) Les vraies indications

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

b) Les indications parasites

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

c) Les fausses indications

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

4-2-7- Significations des indications

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

- a) Ligne continue : indication d'origine les fissures, les replis de forge, les rayures.
- b) Ligne discontinue : indication apparaît lorsque la pièce subit une préparation mécanique ou toute autre opération qui peut enfermer une partie d'un défaut débouchant.
- c) Forme arrondie : indications d'origine les défauts surfaciques de forme sphérique, (soufflure, piqûre, structure poreuse de la pièce...).
- d) Tache ponctuelle : indication apparaissant surtout lors de contrôle des pièces moulées. Elle est d'origine la nature poreuse de la pièce, des piqûres ou de la structure grossière de la pièce.
- e) Tache diffuse : Présence de micropore dans les pièces.



Figure II.12 : Exemple de pièce observée en lumière blanche présentant un défaut

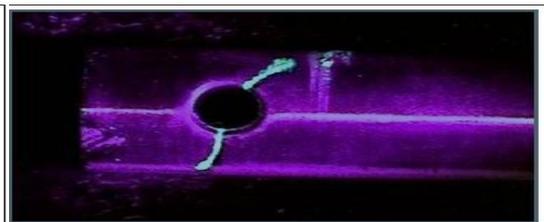


Figure II.13 : Exemple de pièce observée en lumière UV présentant un défaut.

4-2-8- Les Avantages et Inconvénients

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

4-3-Contrôle pas magnétoscopie (MT)

4-3-1-Introduction

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

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

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



Figure II.14 : Appareil manuel de contrôle par magnétoscopie.

4-3-2- Définition

Le principe de la magnétoscopie est exposé dans la norme NF A09-590, comme suit : « L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé ».[23]

4-3-3- Principe de la méthode

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

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

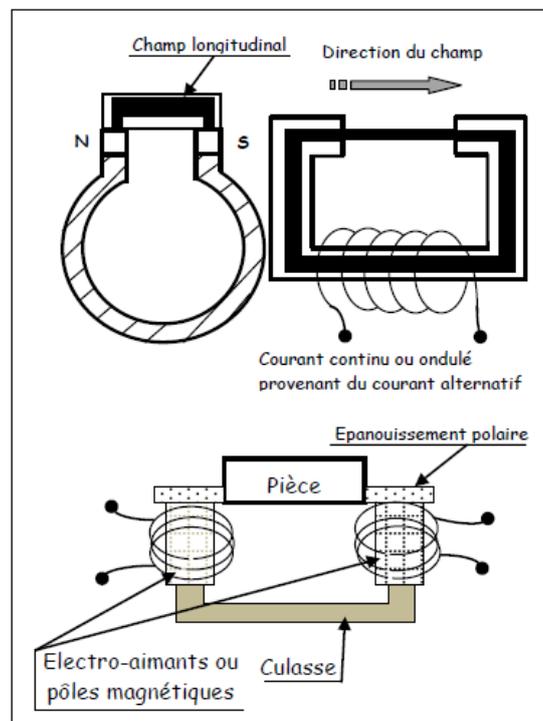


Figure II.15 : Aimantation directe

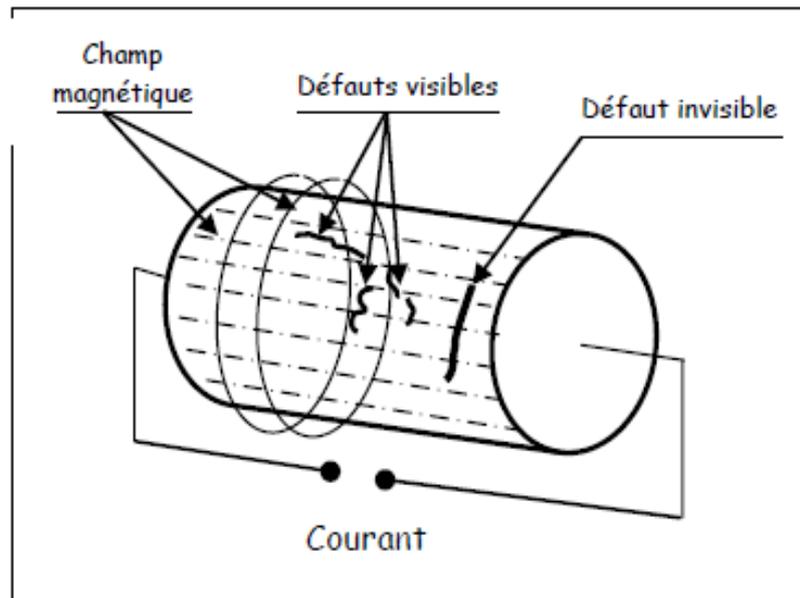


Figure II.16: Aimantation indirect

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

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

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

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

Il existe des particules colorées aidant à la lecture du défaut par rapport à la teinte des pièces.

On utilise également des produits fluorescents avec inspection en lumière ultraviolette (lampe de Wood).[23]

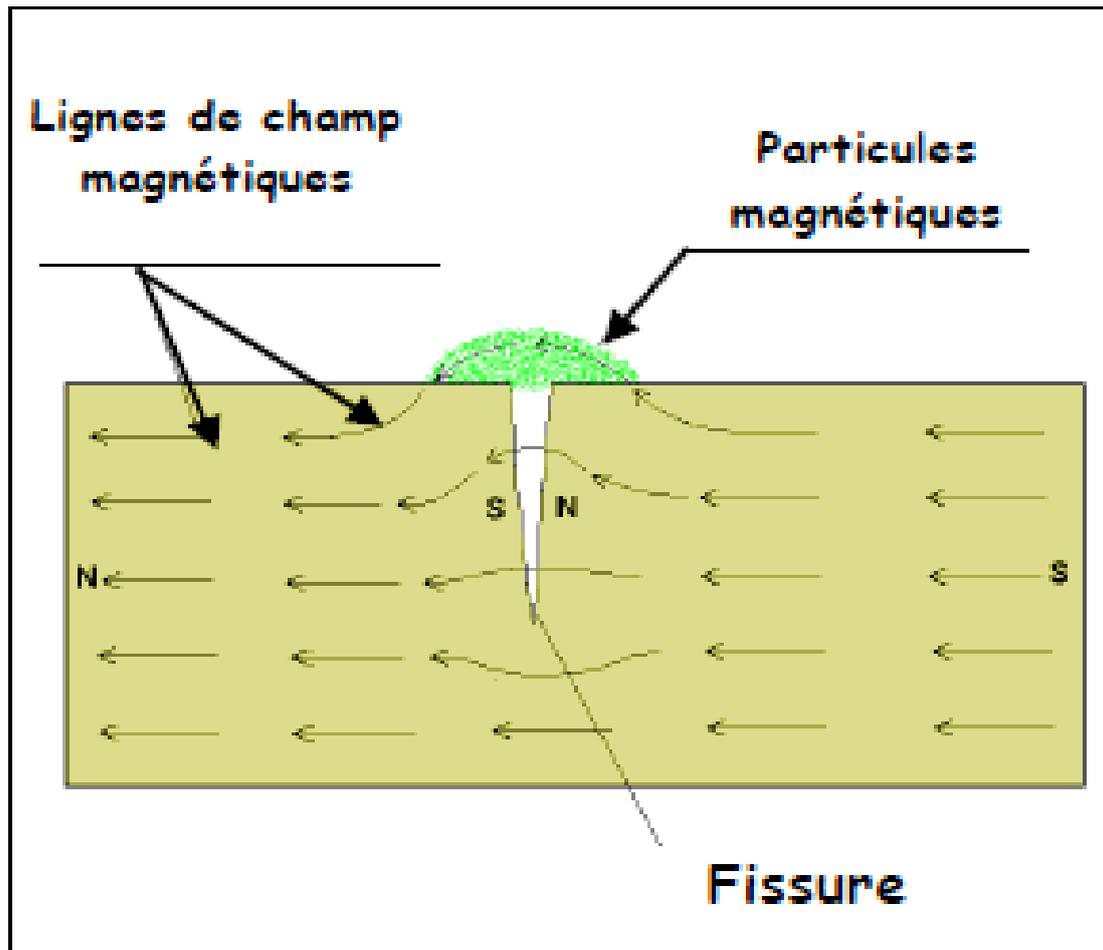


Figure II.17 : Principe du contrôle par magnétoscopie

4-3-4-Produit utilise en magnétoscopie

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

« Les spectres de défaut ».

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

a- Caractéristiques des produits

Il est nécessaire que les particules aient les caractéristiques suivantes :

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

4-3-5- Conservation des spectres magnétiques

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

Les spectres obtenus [23]:

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

4-3-6- Démagnétisation

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

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

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

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

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

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

4-3-7-avantages et inconvénients

a - Avantages

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

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

b- Inconvénients

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

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

4-4-Contrôle par radiographie (RT)

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

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou γ) permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive γ qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement. Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en traversant la paroi du matériau irradié. Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une variation de la densité optique du film au droit de l'image du défaut.[24]

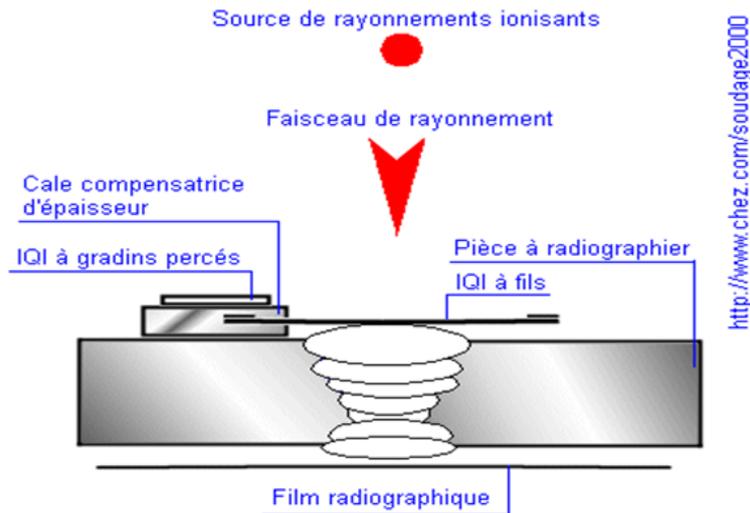


Figure II.18 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique

4-4-2- Les sources de rayonnements

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

a- Le tube à rayons X :

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

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

- La qualité du rayonnement est déterminée par la tension d'accélération en kV.
- La quantité de rayonnement est définie par l'intensité du courant en mA.

Plus le rayonnement est pénétrant (faible longueur d'onde), moins le contraste est élevé.

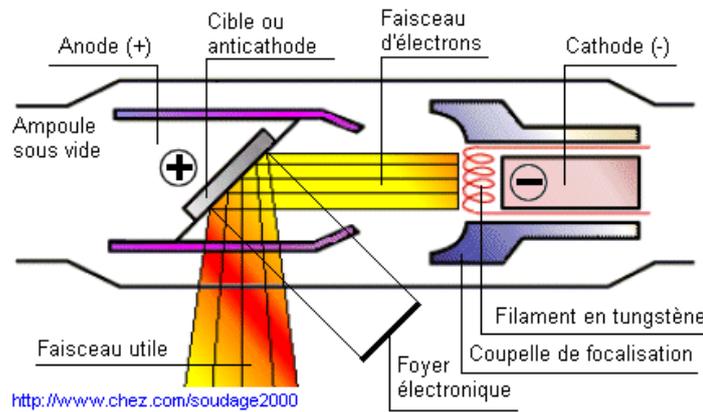


Figure II.19 : Schématisation du tube radiogène

b- La source radioactive à rayonnement gamma δ :

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

- La **qualité** du rayonnement est déterminée par la nature du radio-élément
- La **quantité** de rayonnement est définie par l'activité du radio-élément

L'activité d'une source est exprimée en curie (Ci) ou en becquerel (Bq).

- 1 Tbq (10^{12} Bq) = 27 Ci
- 1 Ci = 37 Gbq (37×10^9 Bq)

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

Tableau II.1 : Les différents types de radio-éléments δ

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

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

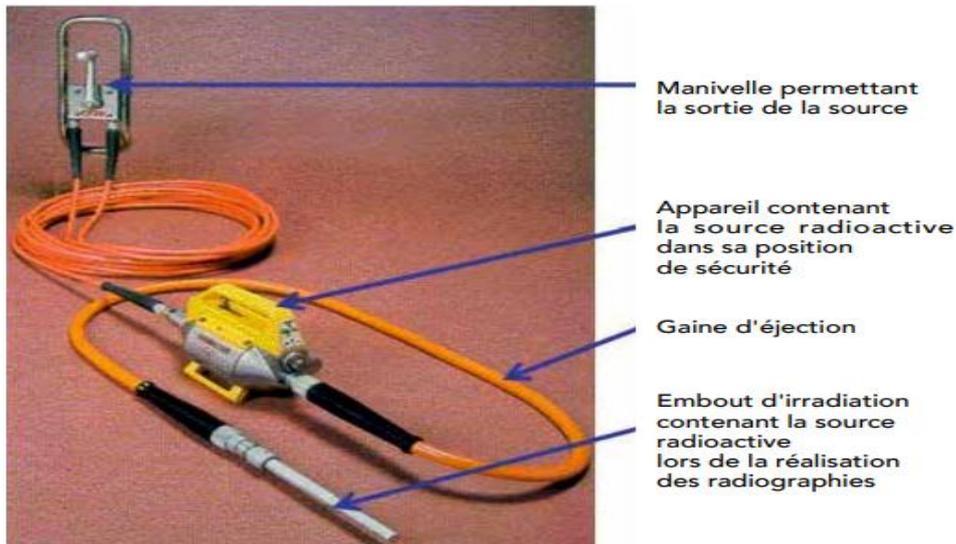


Figure II.20: Source radioactive à rayonnement gamma δ .

4-4-3- Les films radiographiques

a- Structure d'un film

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

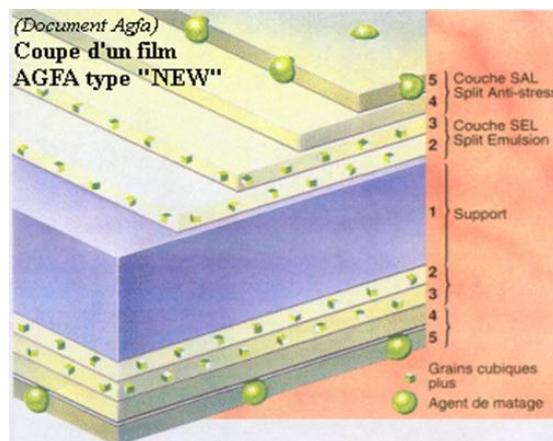


Figure II.21 : Coupe d'un film AGFA type « NEW ».

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

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

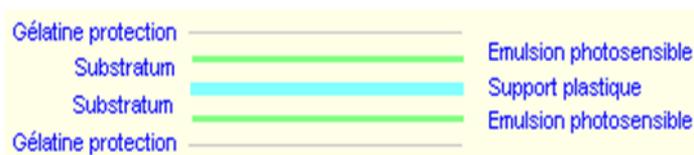


Figure II.22 : Structure d'un Film. Radiographique.

Tableau II.2 : Classification des films et coefficient de sensibilité.

Type	EN 584.1	CODAP 95	ISO 5579	ASTM	DIN 54117	BS 2600	K
CX	C6	4	GIII	3	G4	FG-HC	0.65
D8	C6	4-5	GIII	2	G4	FG-HC	0.65
AA400	C5	4	GIII	2	G4	FG-HC	1.00
D7	C6	4-5	GIII	2	G3	FG-HC	1.00
T200	C4	3	GII	1	G2	UFG-HC	1.90
D5	C4	3	GII	1	G2	UFG-HC	1.90
MX125	C3	3	GI	1	G2	UFG-HC	3.10
D4	C3	3	GI	1	G2	UFG-HC	3.10
M	C2	2	GI	1	G2	UFG-HC	4.40
D3	C2	2	GI	1	G2	UFG-HC	4.40

c- La densité optique d'un film :

La densité optique d'un film radiographique correspond au degré de noircissement du film. La densité optique est égale au rapport logarithmique de la lumière incidente par la lumière transmise. Plus le film est dense et noir et moins la lumière incidente est transmise. Une densité optique de 3 correspond à un film qui transmet 1/1000 de la lumière incidente du négatoscope. La densité optique d'un film est comprise couramment entre 1,7 (relativement blanc et transparent) et 4,0 (relativement noir et opaque).[24]

4-4-4 – Les rayonnements parasites

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

4-4-5- Le flou géométrique

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

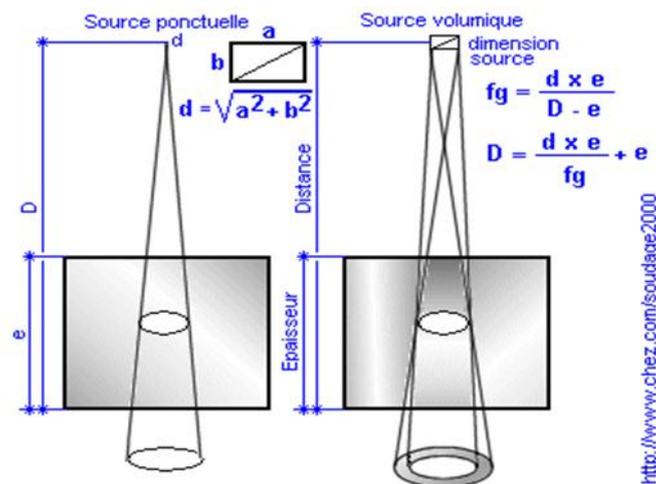


Figure II.23 : Flou géométrique.

4-4-6- La projection elliptique

Le contrôle radiographique de soudures circulaires de tubes de diamètre extérieur compris entre 30 mm et 100 mm est réalisé par un tir en ellipse ou projection elliptique. La source est décalée d'une distance par rapport à l'axe de la soudure. Deux expositions décalées à 90° sont réalisées pour le contrôle complet de la soudure. Le temps de pose est déterminé sur les deux épaisseurs du tube traversées. La qualité d'image est déterminée à partir de la somme des deux épaisseurs de parois du tube. L'interprétation des deux cordons est réalisée simultanément.[25]

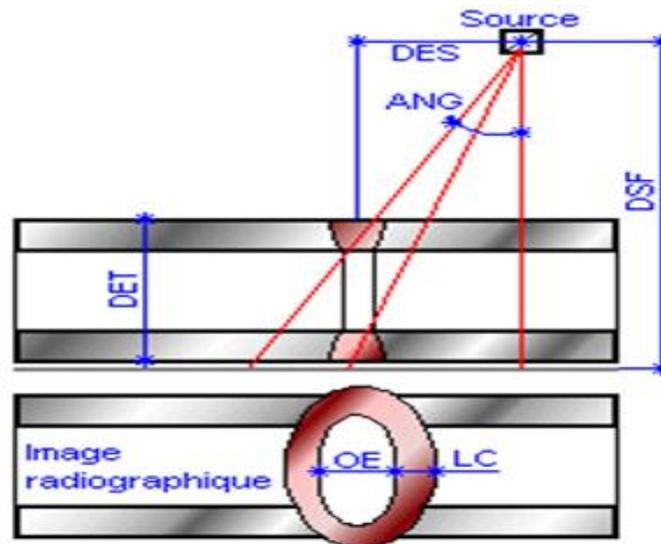


Figure II.24 : Projection elliptique

4-4-7- Le tir au contact

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

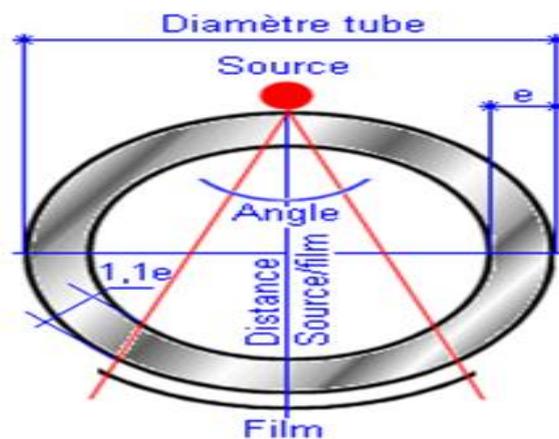


Figure II.25 : Tir au contact.

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

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

a- Les IQI à fils suivant NF EN 462-1

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



Figure II.26 : Indicateur qualité image a fils

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

1 FE EN		6 FE EN		10 FE EN		13 FE EN	
N° du fil	Ø fil mm						
1	3,20	6	1,00	10	0,400	13	0,200
2	2,50	7	0,80	11	0,320	14	0,160
3	2,00	8	0,63	12	0,250	15	0,125
4	1,60	9	0,50	13	0,200	16	0,100
5	1,25	10	0,40	14	0,160	17	0,080
6	1,00	11	0,32	15	0,125	18	0,063
7	0,80	12	0,25	16	0,100	19	0,050

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

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

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



Figure II.27 : Indicateur qualité image a gradins

4-4-9- Le repérage des radiogrammes

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

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

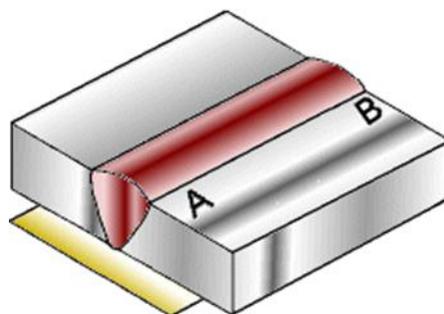


Figure II.28: Repérage des radiogrammes

4-4-10- Les temps de pose

a- Les temps de pose aux rayons X :

Le temps de pose est déterminé par un abaque d'exposition spécifique à chaque poste à rayons X. Cette abaque est définie pour un type de film donné, un type de chargement de cassette de films avec ou sans écrans renforçateurs, une densité optique donnée, une distance focale tube / film fixe, des conditions de développement et de traitement de films précises et un nombre de milliampères.[25]

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

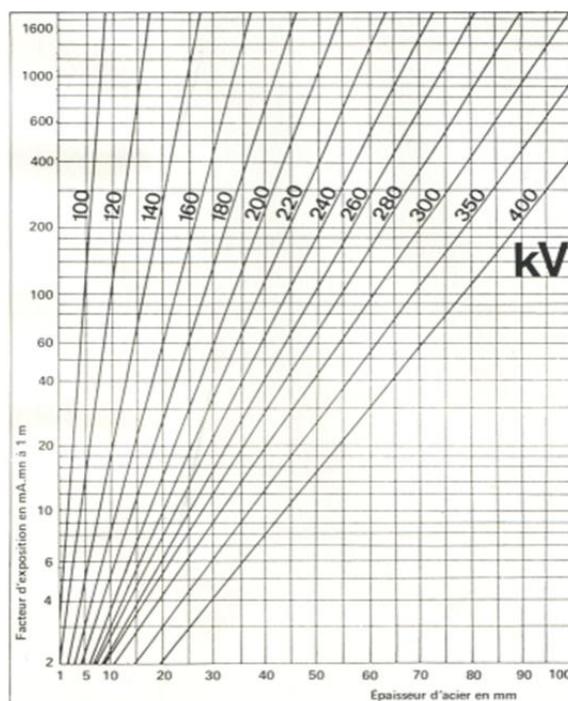


Figure II.29 :L'abaque de temps de pose aux rayons X

b- Les temps de pose aux rayons δ :

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

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

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

4-4-11- Avantages du contrôle par radiographie

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

4-4-12- Inconvénients du contrôle par radiographie

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

4-5- Contrôle par Ultrasons (UT)

4-5-1- Introduction

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

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

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

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

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

4-5-2-Fonctionnement d'un appareil à ultrasons

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

4-5-2-1- Caractéristiques des blocs d'étalonnage de type B et V2

C'est un acier non allié dont la teneur en carbone est inférieure à 0.15%. L'indice de grosseur du grain ferritique G doit être supérieur ou égal à 8 et les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales et transversales sont respectivement de 5920 et 3255 m.s⁻¹. L'écrouissage après usinage doit être minimale et la rugosité Ra inférieure à 3.2 µm. Le bloc d'étalonnage V1 est le plus complet. Il existe un modèle réduit et léger appelé V2 pour les applications sur chantier.[26]

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

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

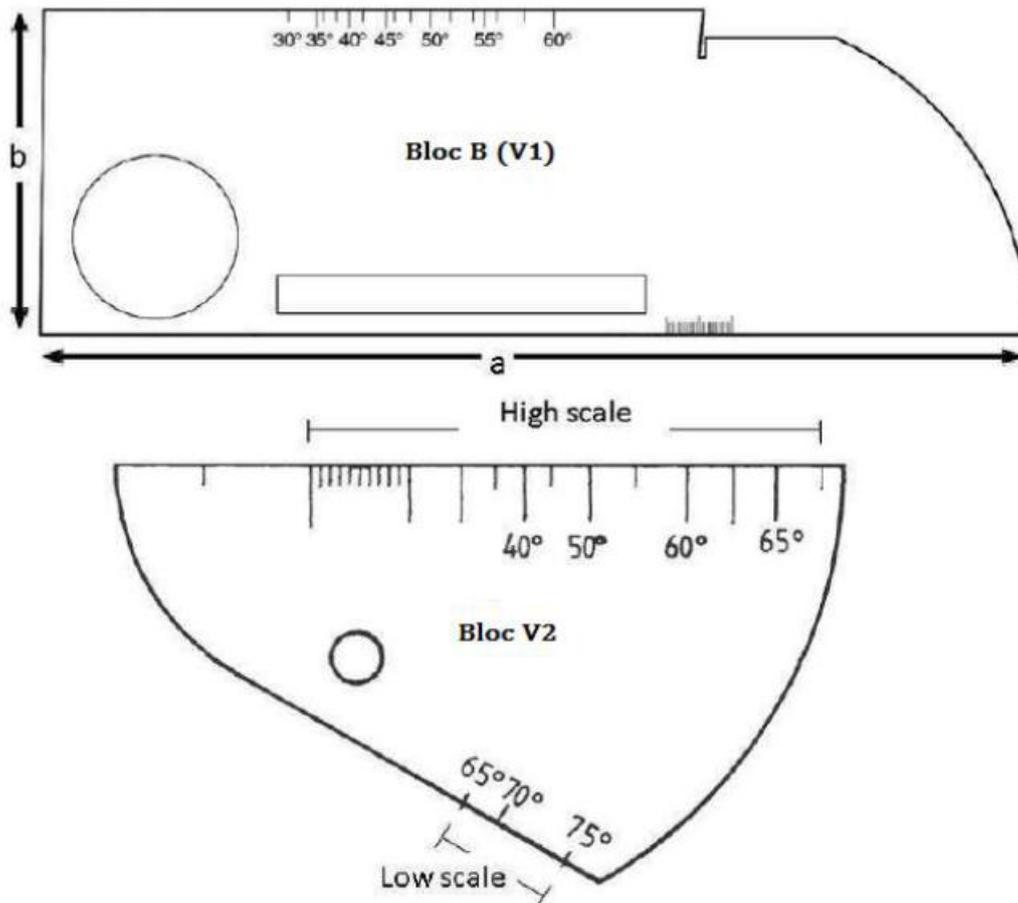


Figure II.30 : Blocs d'étalonnage de type B et V2

Avant tout contrôle d'une pièce, il est nécessaire d'étalonner la base de temps du générateur à ultrasons et les caractéristiques du palpeur. Les blocs d'étalonnage sont utilisés pour déterminer le point d'émergence du transducteur, l'angle de réfraction. Le réglage est plus précis lorsque le matériau à contrôler ne diffère pas de celui du bloc (acier ferritique faiblement allié).[26]

4-5-2-2- Ondes acoustiques

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

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

Problématique :

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

4-5-2-3- Principe de la méthode

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

- Méthode par transmission
- Méthode par réflexion

a- Examen par transmission

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

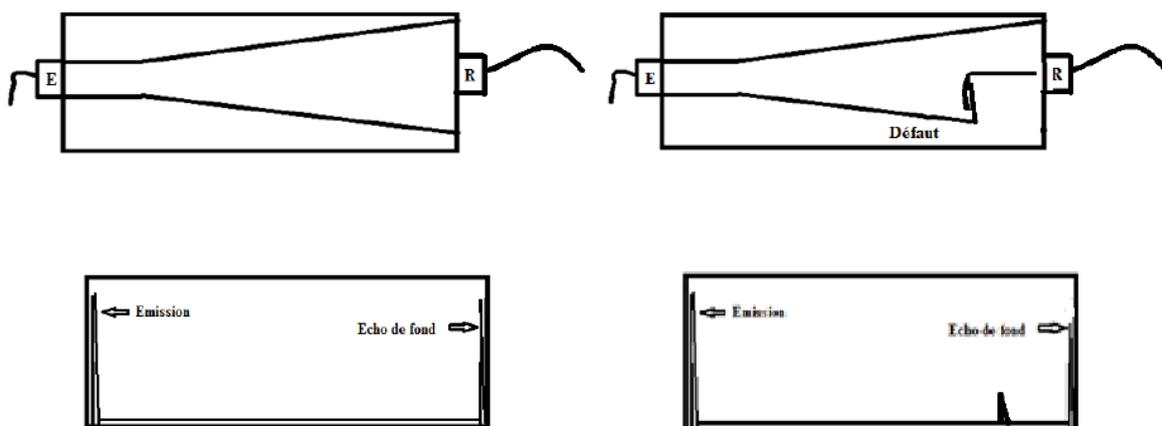


Figure II.31: Examen par transmission

b- Examen par réflexion

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

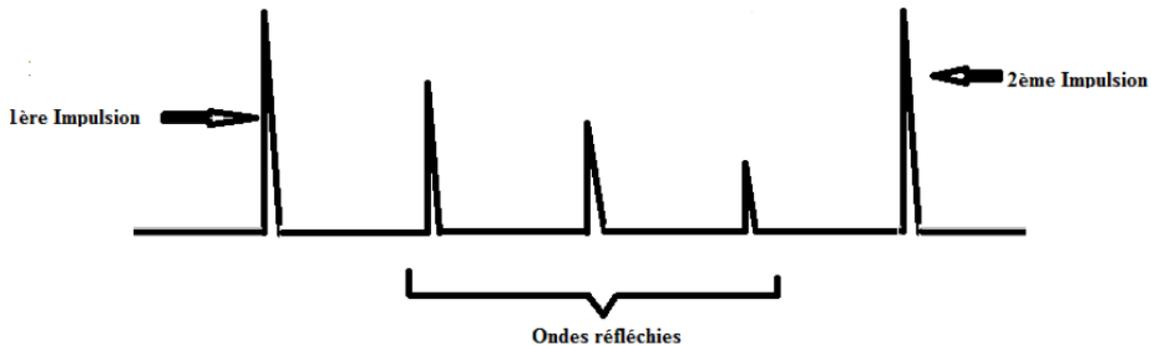


Figure II.32 : Examen par réflexion

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

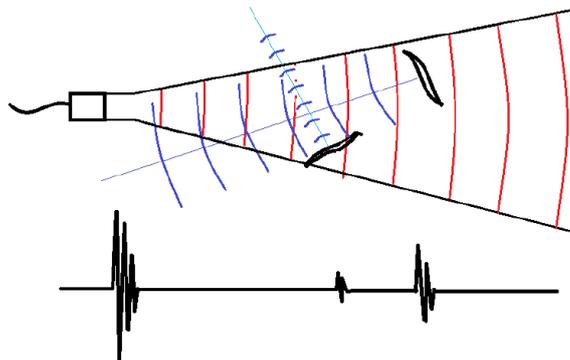


Figure II.33 : Signaux réfléchis par différents obstacles.

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

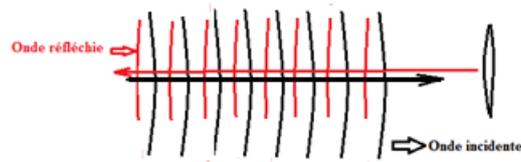


Figure II.34 : Réflexion spéculaire

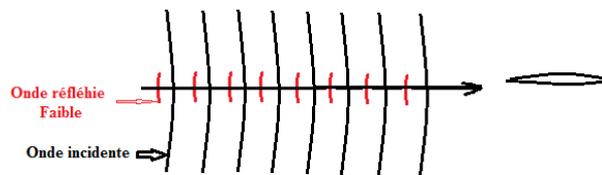


Figure II.35 : Défaut parallèle à l'onde incidente.

4-6- Le contrôle par courants Foucault (ET)

4-6-1- Définition de de contrôle par courants Foucault

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

4-6-2- Principe de contrôle par courants Foucault

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

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

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

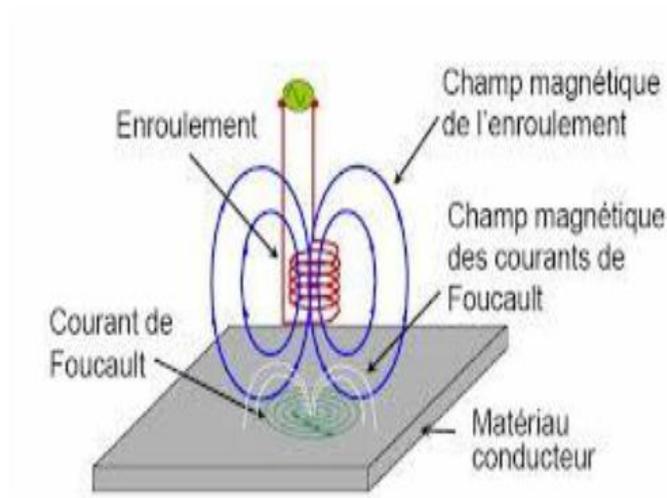


Figure II.36 : Principe de contrôle par courants Foucault

4-6-3- Domaine d'application

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

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

4-6-4- Les avantages et inconvénients

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

4-7- Contrôle par la thermographie infrarouge (TT)

4-7-1- Définition de la thermographie infrarouge

Le contrôle par thermographie infrarouge est une méthode d'essai non destructif basée sur la mesure des températures de surface qui met essentiellement en œuvre les transferts de chaleur par conduction et rayonnement thermique.[27]



Figure II.37 : Appareille Contrôle par la thermographie infrarouge.

4-7-2- Principe de contrôle par thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge peut détecter grâce à des excitations thermiques et les observations des différentes températures de surfaces qui en découlent, des défauts en profondeur sur la cible visée la thermographie infrarouge devient alors un outil performant pour détecter les délaminages, les bulles d'air et la présence d'eau dans les matériaux composites.[27]

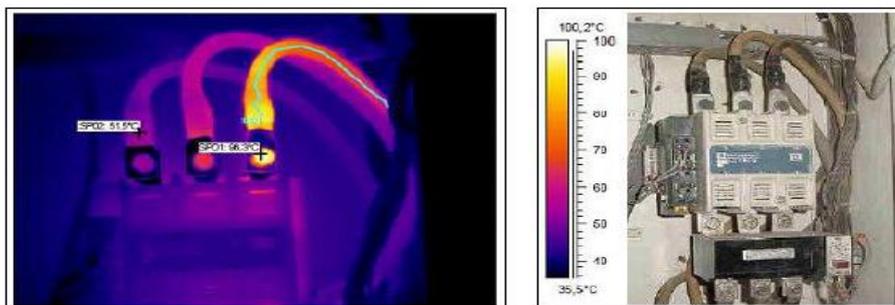


Figure II.38 : Résultats d'un essai par thermographie infrarouge.

4-7-3- Les avantages et inconvénients

- * Facilite de mise en œuvre
- * Conservation des clichés (fichiers informatiques)
- * Rapidité de mise en évidence des défauts (pendant le contrôle)
- * Températures peu fiables des surfaces pour les matériaux de faible émissivité
- * Contrôle possible uniquement sur des équipements déjà en chaleur [27]

4-8- Contrôle par émission acoustique (AT)

4-8-1- Définition de contrôle par émission acoustique

L'émission acoustique est une méthode prometteuse pour garantir la qualité des soudures. Cette technique non destructive peut être mise en œuvre pendant un processus de production pour tester la qualité des soudures. Le contrôle de qualité par émission acoustique en tant que méthode d'essai non destructif et comparative a été développé sur base du fait que chaque matériau présente des vibrations naturelles et que toutes les machines et les processus émettent des sons.[28]

4-8-2- Principe de l'émission acoustique

Les signaux d'émission acoustique sont des ondes élastiques transitoires générées par la libération rapide de l'énergie à partir de sources localisées dans un matériau de référence : ASTM E 1316 [28]

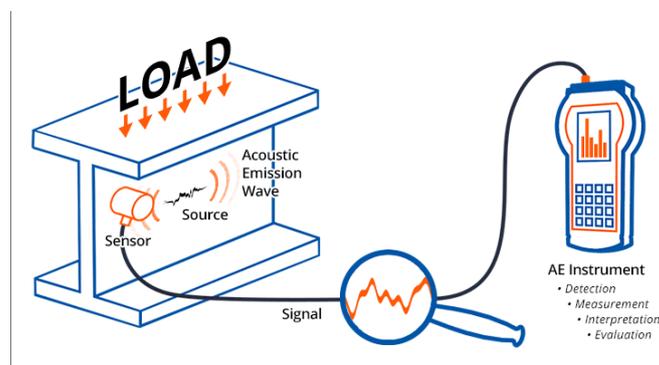


Figure II.39 : Principe de contrôle par émission acoustique.

4-8-3- Domaines d'application

Les champs d'applications de l'émission acoustique sont multiples :

- * Contrôle de l'intégrité des équipements sous pression. L'émission acoustique est une alternative à l'épreuve hydraulique pour la requalification des équipements sous pression
- * Contrôle des structures industrielles telles que les réacteurs nucléaires
- * Contrôle en ligne des procédés de fabrication des matériaux
- * Surveillance des installations en fonctionnement
- * Détection des fuites [28]

4-8-4- les intérêts de la méthode

L'émission acoustique présente de nombreux avantages parmi lesquels :

- * Le contrôle global de la structure (volumique)
- * La détection et localisation des défauts évolutifs
- * Le contrôle dynamique en temps réel dans les conditions de service ou de sollicitation.
- * Le suivi dans le temps
- * La prévention des risques industriels
- * Le contrôle des structures en service
- * la minimisation du temps d'intervention et d'immobilisation des installations [28]

Chapitre III :

Études expérimentales

1-Introduction

Dans ce chapitre nous avons choisies des tubes avec la même nuance (API 5L Gr.B) et à l'aide d'un soudeur qualifier en a préparé les bornes des tubes et nous avons soudés par différents procédés et plusieurs métaux d'apports en respectant les normes internationales du soudage et à la fin ces assemblages soudés ont été expertiser et contrôler par plusieurs méthodes de contrôle non destructif et destructif .

2- Présentation des assemblages à contrôler

2-1-Métal de base

API 5L est une spécification plus détaillée principalement développée pour conduites utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière [29]

2-1-1-Composition chimique du métal

Tableau III.1 : Composition chimique pour API 5L Gr.B

Norme	C max%	Mn max%	S max%	Si min%	Cr max%	Cu max%
API 5L Gr.B	0.28	1.20	0.030	/	0.50	0.50

2-1-2-Caractéristiques mécaniques

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques

Norme	Résistance à la traction (MPa)	Allongement %
API 5L Gr.B	415	23

2-1-3- Préparation des tubes avant soudage

La préparation des pièces est une des conditions essentielles à la réussite du soudage. On doit d'abord enlever toute tache de graisse, de rouille, d'oxyde. Ensuite, on chanfreine le joint, car La préparation d'un chanfrein est très important : son angle, la dimension du talon (figure III.2 et III.3) dans notre cas en a réalisé le chanfrein manuellement à l'aide d'une meule portative.

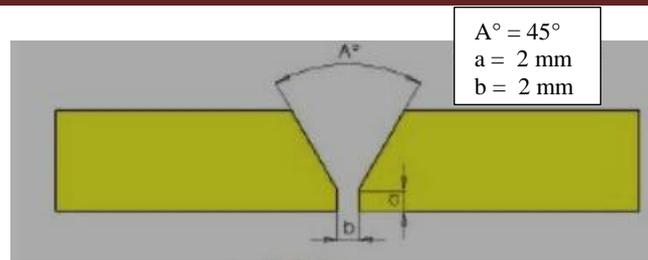


Figure III.1 : schéma de préparation des chanfreins



Figure III.2 : Préparations des chanfreins $\alpha = 60^\circ$



Figure III.3 : Position des tubes à assembler

2-2-Procédés et métaux d'apports utilisés dans les assemblages soudés



Figure III.4 : Tubes soudés

Nous avons soudé les tubes par différents procédés de soudage le tableau suivant montre le procédé de soudage utilisé

Tableau III.3 : procédés de soudage utilisé pour les assemblages soudés.

Disposition des passes	
Numéro d'assemblage soudé	Procédé utilisé
1 : (E6010)	SMAW
2 : (E8010)	SMAW
3 : (7018)	SMAW
4 : (7016)	SMAW
5 : (ER316L)	GTAW
6 : (ER308L)	GTAW

Le tableau ci-dessous montre les métaux d'apports avec leur désignation et leurs caractéristiques mécaniques (Tableau III.4).

Tableau III.4 : Métaux d'apports et leurs caractéristiques mécanique

Métaux d'apports		Résistance à la traction (Mpa)	Limite Élastique (Mpa)	Allongement %
Désignations AWS	Types			
E6010	Electrode à enrobage cellulosique	520	445	32
E8010	Electrode à enrobage cellulosique	620	530	23
E7018	Electrode à enrobage basique	575	490	28
E7016	Electrode basique à double enrobage	550	460	32
ER 316L	Fil inox bas carbone	600	460	35
ER 308L	Fil inox bas carbone	605	465	33

3-contrôle non destructifs des assemblages soudés

Le contrôle a été réalisé a eurl TESTIAL (centre de formation et expertise du CND), par des Inspecteur qualifier dans ce domaine en respectons les normes internationales.

3-1-Contrôle visuelle

A l'aide d'un inspecteur en méthodes (VT) , nous avons réalisé le contrôle visuelles en respectons les règles de la norme (ISO 5817)



Figure III.5 : Contrôle visuel des tubes soudés

3-2-Contrôle par ressuage (PT)

3-2-1-Matériels utiliser

Pour cette méthode nous avons utilisé le matériel suivant

Tableau III.5 : Matériels utilisé pour l'examen de ressuage (PT).

<p>Témoin pour examen de ressuage</p>		
<p>Dégraissant (babbco N 120 CO2)</p>		
<p>Pénétrant (SHERWIN DP55)</p>		
<p>Révéléateur (SHERWIN D-100)</p>		

3-2-2-Procédure d'examen par ressuage

Cette méthode consiste à appliquer sur une surface à contrôler préalablement nettoyée, un pénétrant coloré qui va pénétrer par capillarité dans les défauts débouchant, et pour faire cette opération de ressuage nous allons suivre les étapes ci-dessus.

Une inspection par pénétrant liquide se fait en six temps schématisés ci-après.

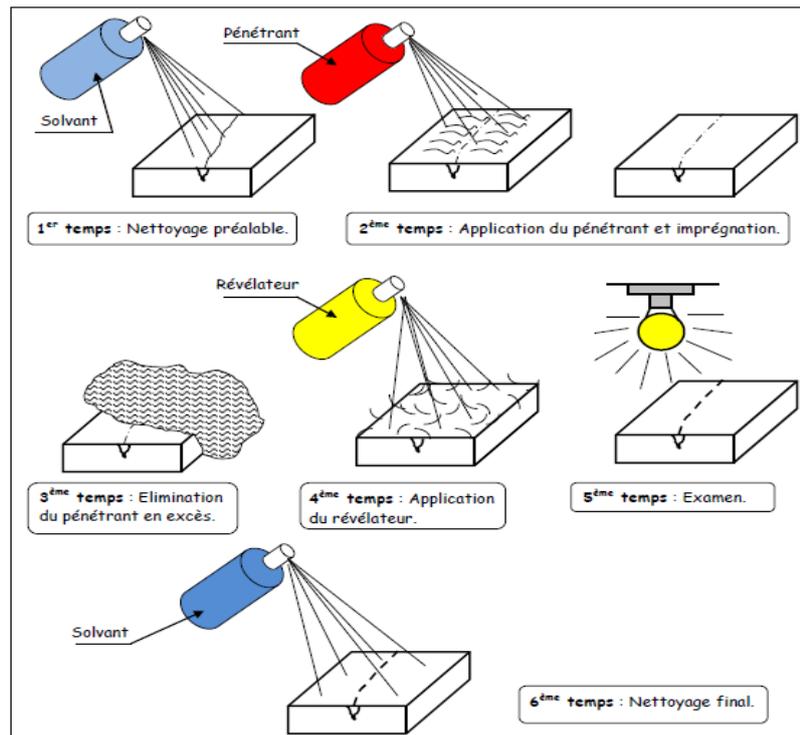


Figure III.6 : Schématisation de l'essai de ressuage

1er temps : Nettoyage de la surface à contrôler de toutes traces de matériaux étrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités.

2ème temps : Application du pénétrant sur toute la surface à examiner et maintien d'une couche continue de pénétrant pendant tout le temps d'imprégnation.

3ème temps : Elimination du pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate: il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts).

4ème temps : Application régulière du révélateur sur toute la surface à examiner.

5ème temps : Pendant et après développement des indications, inspection soignée en lumière blanche et repérer la présence, localiser, donner la « nature » et la « grandeur » des discontinuités débouchant à la surface.

6ème temps : Nettoyage de la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage.

3-3-Contrôle par radiographie

Nous avons fait l'examen par radiographie en respectons la norme ASME B31-3.

3-3-1-Position de tir par contact



Figure III.7 : Tir radiographique méthode par contact

3-3-2-Materiel utiliser

Le tableaux suivant montre les différents outils utiliser dans l'examen par radiographie

Tableau III.6 : Matériels utilisé pour l'examen de radiographie

Radiamètre	
Source gamma	
IQI : indicateur qualité image	
Bande chiffré	
Film	

3-3-3- Rapport radiographie pour chaque assemblage

Pour l'examen par radiographie nous avons fait des calculs avant de commencer l'essai et voilà un exemple des calculs :

Exemple pièce 1 :

On a :

$$\phi_{\text{ext}} = 115 \text{ mm}$$

$$e = 5.5 \text{ mm}$$

$$A(t) = 13.1 \text{ CI}$$

$$C_s = 0.5$$

$$d = 3.6 \text{ mm}$$

$$\text{film D5 : } X_r = 1.95$$

Quand $\phi \geq 89 \text{ mm}$

Tir au contact (3 Tir à 120°)

$$f_g = (d \times e) / (D_{\text{ext}} - e)$$

$$\text{AN/ } f_g = (3.6 \times 5.5) / (115 - 5.5) = 0.18 < 0.3$$

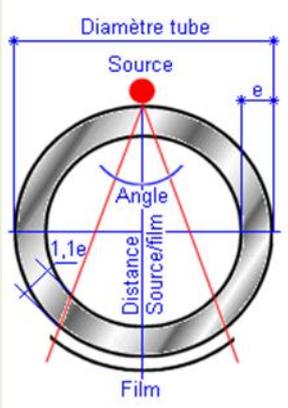
$$\text{DSF} = \phi_{\text{ext.}} = 115 \text{ mm}$$

$$\text{IQI} = (2/100) \times e$$

$$\text{AN/ IQI} = 0.11 \text{ (dernier fil (10FEEN))}$$

$$\text{TP} = (X_r \times \text{DSF}^2 \times 2^{(x/(x^{1/2}) \times N)} / (A(t) \times C_s) \quad \text{AN : TP} = 40 \text{ sec}$$

Tableau III.7 : Paramètres pour chaque assemblage soudé

Nom de l'inspecteur	Yahia berrouiguet mounir					
schéma du tir						
PIECE N°	1:(E6010)	2:(E8010)	3 :(E7018)	4:(E7016)	5:(ER316L)	6:(ER308L)
NUANCE	ACIER (API 5L Gr. B)					
EPAISSEUR (mm)	5.5	5	5	5.4	6.1	6.4
NATURE SOURCE	IR 192					
ACTIVITE	13.1 CI					
DIMENSION	3.6					
TECHNIQUE	PAR CONTACT					
DSF (mm)	115	114	115	114.77	113.5	114
FLOU GEOMETRIQUE	0.18	0.1	0.16	0.17	0.2	0.2
TYPE D'IQI	10 FEEN	10 FEEN	10 FEEN	10 FEEN	10 FEEN	10 FEEN
FIL VISE (2%)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
FIL VISIBLE	0.13	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
TYPE DE FILM	D5	D5	D5	D5	D5	D5
DENSITE VISEE	3	3	3	3	3	3
DENSITE OBTENUE	3.2	3.3	3.2	3.4	2.8	3.7
TEMPS DE POSE CALCULE (s)	40	37	37.88	40	41.2	44
METHODE DE CALCUL	FORMULE					

3-3-4- Développement des films radiographiques

Après l'examen par radiographie on doit développer les films pour interpréter les résultats et on doit respecter les étapes suivantes (tableau III.8) :

Tableau III.8 : Conditions de traitement manuel d'un film

CONDITIONS DE TRAITEMENT MANUEL D'UN FILM			
OPERATION	TEMPS	TEMPERATURE	OBSERVATIONS
Révéléateur	5 minutes	20° Celsius	Si > 20° C : + 30 s par degré
Bain d'arrêt	30 secondes	20° Celsius	bain d'eau à 3% d'acide acétique
Fixateur	10 minutes	20° Celsius	
Lavage	20/30 minutes	15° Celsius	Eau courante filtrée
Agent mouillant	1 minute	20° Celsius	Agepon, teepol à 10%
Séchage	45 minutes	40° Celsius	Films égouttés avant séchage

1-Révéléateur : Agiter toutes les 30 secondes. La régénération des bains est faite à raison de 0,2 m2 de film par 10 litres de produit.

2-Bain d'arrêt : Agiter les cadres pour stopper la révélation.

3-Fixateur : Agiter les cadres dans le fixateur. Égoutter les cadres à la sortie.

4-Lavage : Eau courante filtrée à moins de 20° Celsius

5-Agent mouillant : Rinçage dans une solution aqueuse avec 10% d'agent mouillant

6-Séchage : A l'air libre ou dans une armoire séchant

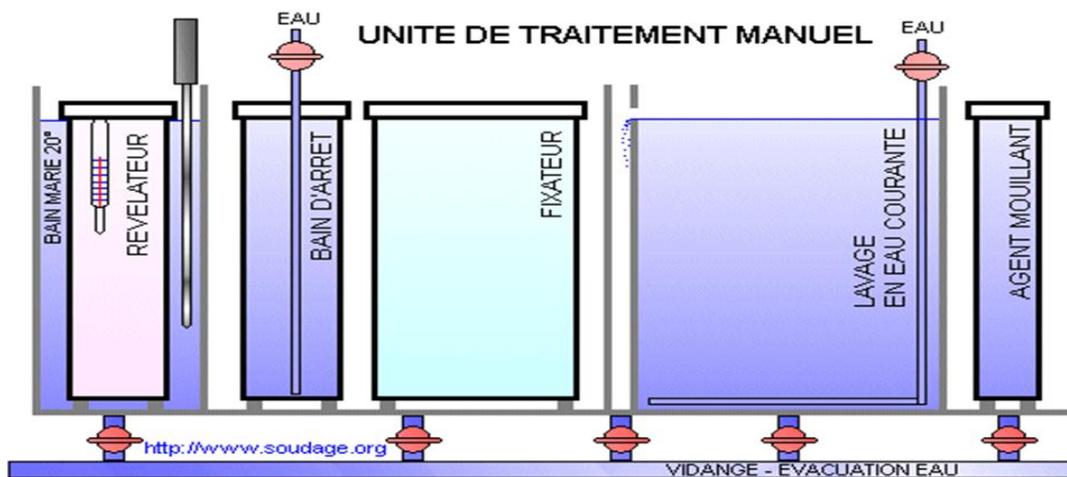


Figure III.8 : Unité de traitement manuel

4-Contrôle destructif des pièces soudées

4-1-Prélèvement des éprouvettes

Avec une fraiseuse horizontale nous avons prélevé des éprouvettes (figure III .9)

-Le découpage se fait à froid pour éviter l'échauffement de métal qui peut influencer sur la microstructure et les propriétés mécaniques des matériaux et du jointe de soudure.



Figure III.9 : Prélèvements des éprouvettes sure une fraiseuse horizontale.

4-2- Essais de traction

Les essais de traction sont effectués au niveau de labo SDM de la Faculté de technologie, université Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen.

Afin de pouvoir utiliser les courbes de traction brutes, on doit les modifier de façon que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette.

On définit ainsi :

La Contrainte : $\sigma = F / S_0$ unité : Pascal

La Déformation : $\varepsilon = \Delta l / l_0$

S_0 et l_0 sont les caractéristiques initiales de l'éprouvette, Δl est son allongement.



Figure III.10 : Machine traction 600 KN



Figure III.11 : Epreuve avant rupture



Figure III.12 : Epreuve après rupture.

Chapitre IV :

Résultats et Interprétations

1-Introduction

Dans ce chapitre nous avons interprétés les résultats obtenus par les méthodes de contrôle non destructifs (visuel, ressuage, radiographie) et les méthodes destructives (traction)

2- Interprétations des contrôles non destructifs

2-1- Contrôle visuels

a-Résultats : après l'examen visuel nous Avon élaborer un procès-verbal ci-dessous

N° de lot		Appareil	Appareil de mesure	Matériau	Norme	Norme de mesure	Observations	Position	Remarque
1	1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	1	100	100	100	100	100	100	100	100
3	1	100	100	100	100	100	100	100	100
4	1	100	100	100	100	100	100	100	100
5	1	100	100	100	100	100	100	100	100
6	1	100	100	100	100	100	100	100	100
7	1	100	100	100	100	100	100	100	100
8	1	100	100	100	100	100	100	100	100
9	1	100	100	100	100	100	100	100	100
10	1	100	100	100	100	100	100	100	100
11	1	100	100	100	100	100	100	100	100
12	1	100	100	100	100	100	100	100	100
13	1	100	100	100	100	100	100	100	100
14	1	100	100	100	100	100	100	100	100
15	1	100	100	100	100	100	100	100	100
16	1	100	100	100	100	100	100	100	100
17	1	100	100	100	100	100	100	100	100
18	1	100	100	100	100	100	100	100	100
19	1	100	100	100	100	100	100	100	100
20	1	100	100	100	100	100	100	100	100

Signature: Opérateur	Signature: Responsable	Signature: Client

Figure IV.1 : Procès-verbal d'examen visuel.

b -Interprétations : des résultats obtenues nous remarquons visuellement que pour les pièces (2,3 et 4) il Ya un excès de pénétration à réparer et pour les autres pièces rien à signaler (un bon aspect visuel)

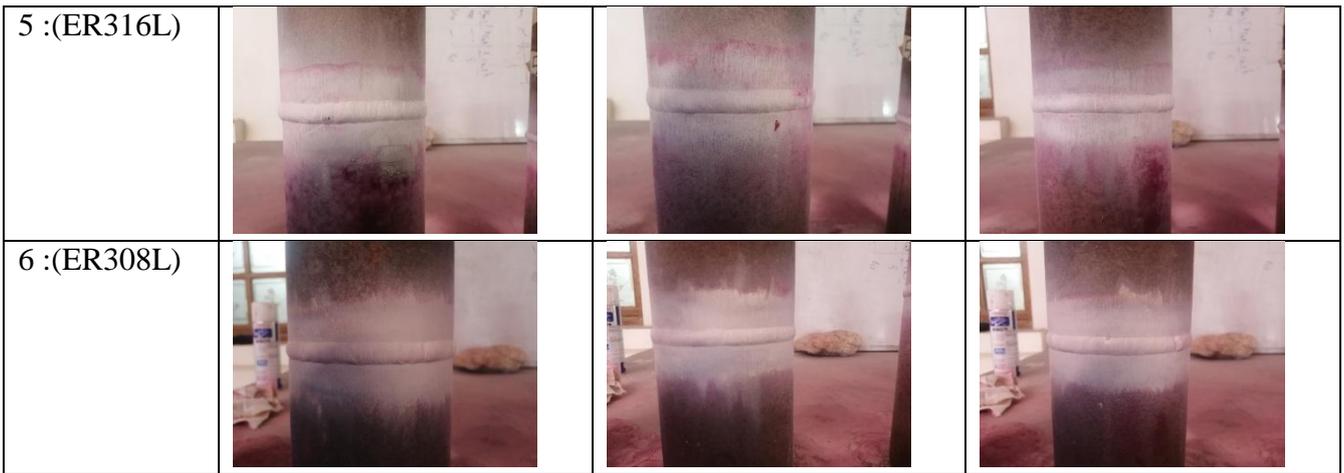
2-2- Contrôles par ressuage

2-2-1-Résultats d'examen pour chaque pièce

Après l'examen par ressuage nous avons conservé les résultats par Techniques photographiques.

Tableau IV.1 : Procès-verbal d'examen visuel

Numéro de la pièce	Angle de prise des photos		
	0°	120°	240°
1 :(E6010)			
2 :(E8010)			
3 :(E7018)			
4 :(E7016)			



TESTAL **PROCES VERBAL D'EXAMEN PAR RESSUAGE** Page 1 sur 2
Penetrant Test Report (PTR)

VARIA BERROUGUET MOUNIR MEMOIRE DE FIN D'ETUDE N° N°: 0001
 Rapport No:
 Date de création:
 Your Date: 05/12/2023

Dessiné: COUPON DE TUBES SOUDÉS Code / Norme: ASME B31.3
 Work: Client: Standard

PROCES VERBAL D'EXAMEN / *Examination Report*

Pratiquant / Operator	Type - Matière / Mat. / Specimen	Méthode / Method	Date de pénétrométrie / Penetrant Date
Pratiquant / Operator	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000
Dessiné / Drawn	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000
Revisé / Revised	0000000000000000	0000000000000000	0000000000000000

CONDITIONS D'EXAMEN / *Examination Conditions*

Etat de surface / Surface condition	Nettoyé / Cleaned	Non	Nettoyé / Cleaned	Non	Nettoyé / Cleaned	Non	
Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>
Température ambiante / Ambient temperature	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	
Humidité relative / Relative humidity	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	
Application du pénétrométrie / Penetrant application	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	
Application du révélateur / Developer application	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	
Nettoyage après examen / Cleaning after exam	Nettoyé / Cleaned	<input checked="" type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	Nettoyé / Cleaned	<input type="checkbox"/>	

No.	N° Référence	Dia. Ø	Épaisseur / Thick. (mm / Inch)	Longueur / Length (mm / Inch)	Type	MÉTALLOGRAPHIE			Résultats / Results	Observations / Remarks
						mm	Inch	mm		
01	COUPON - Soudé	6	5.0	5	SM				6	/
02	COUPON - Soudé	6	5.0	5	SM				6	/
03	COUPON - Soudé	6	5.0	5	SM	00	0	0	6	/
04	COUPON - Soudé	6	5.0	5	SM				6	/
05	COUPON - Soudé	6	5.0	5	SM				6	/
06	COUPON - Soudé	6	5.0	5	SM				6	/

Signature - Operator: / Signature - Responsibility: / Signature - Client: /

ALI AINI
 N° 0000000000000000

Figure IV.2 : Procès-verbal d'examen Par Ressuage

b- Interprétations : après avoir eu les résultats par méthodes photographiques nous remarquons que tous les pièces sont accepté par ressuage sauf la pièce 3 une indication mais acceptable.

2-3-Controles par radiographie

a-Résultats

Les résultats sont obtenus sous forme des films

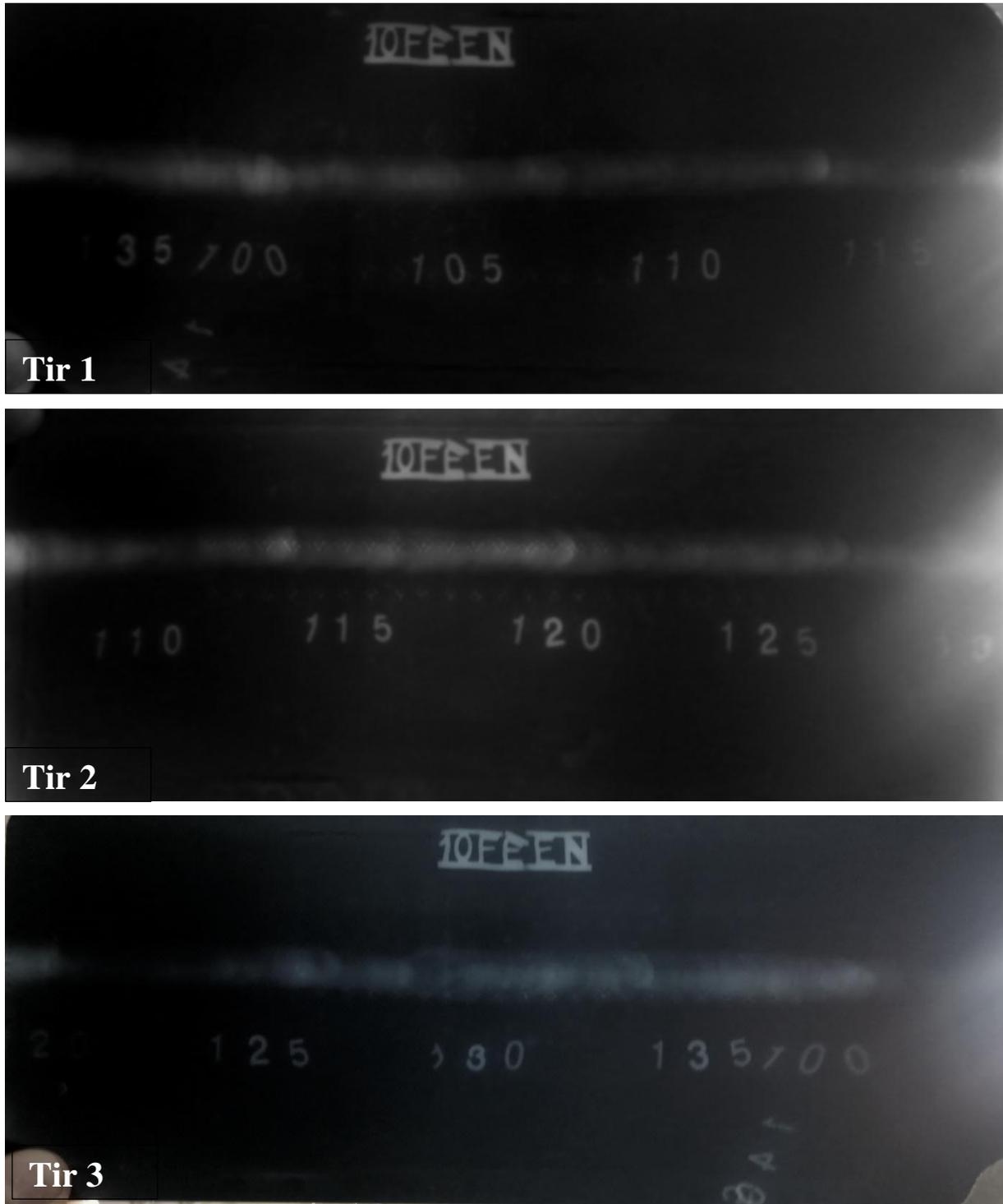


Figure IV.3 : Exemple de film a interprété (pièce 1).

b- Interprétations :

Après interprétations des résultats des films de radiographie nous avons remarqué que pour les pièces (2, 3 et 4) il ya un excès de pénétration, des soufflures de dimension acceptables peut être réparé et pour les autre pièces rien à signaler

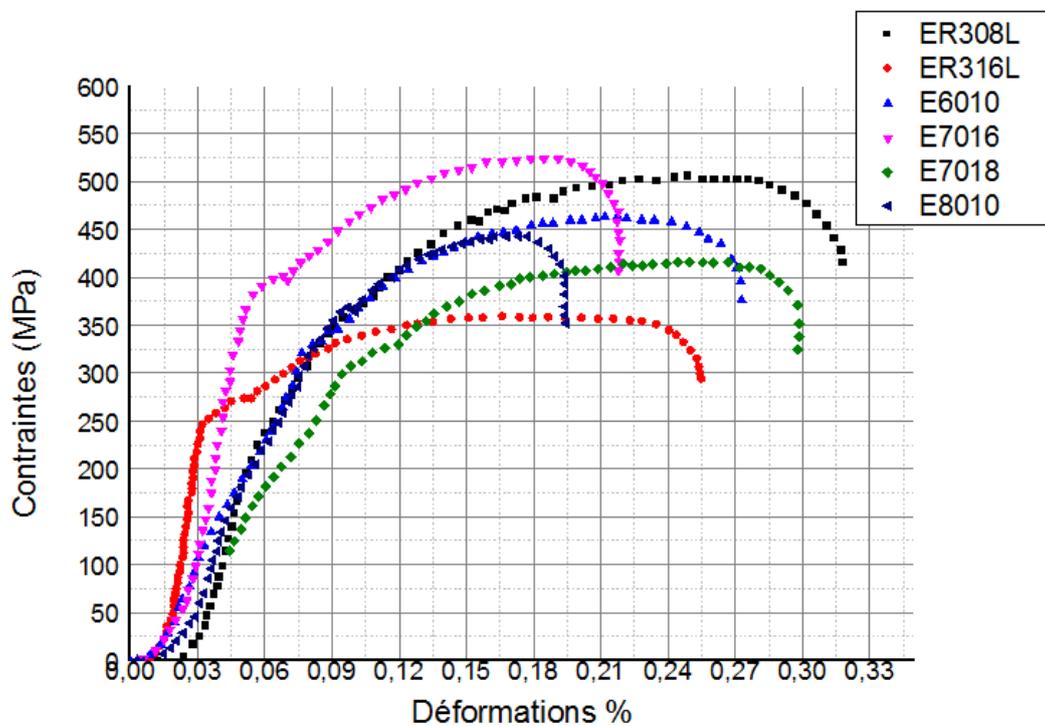
3-contrôle destructif**3-1- Essai de Traction****3-1-1- Interprétations des graphes**

Figure IV.5: Graphe de traction pour assemblage soudé par différents métaux d'apports

Interprétations :

Pour les graphes de l'essai de traction réalisés sur des éprouvettes soudées par différents procédés et métaux d'apports, nous remarquons que les résultats ne sont pas interprétables car en a eu des épaisseurs et des longueurs différentes pour chaque éprouvette.

Conclusions générales

Dans ce travail nous avons présenté les principaux procédés de soudage et les différents méthodes de contrôle non destructif et D'après les résultats obtenus par les différents contrôles exécutés (Visuel, Ressuage et Radiographie) nous avons constaté que L'examen visuel est le premier des méthodes de contrôle pour détecter les défauts en surface, pour le ressuage c'est une extension de l'inspection visuelle utilisé pour détecter d'éventuels défauts débouchant et le troisième examen c'est la radiographie qui permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins donc c'est la méthodes la plus précis

Après le contrôle CND nous avons appliqué un essai de traction aux pièces soudées et nous avons eu des résultats non interprétables car les géométries des éprouvettes sont pas les même.

En perspective, ce travail peut être réalisé avec d'autres méthodes de contrôle non destructif et aussi avec des contrôles destructifs.

Références bibliographiques

- [1] : J. G.HICKS « Conception des assemblages soudées » édition Eyrolles année 1981.
- [2] : <https://fr.wikibooks.org/wiki/Soudage/G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s> .
- [3] : supporte de cour enseignant Said bensaada « le soudage » Université Mohamed Khider, Biskra , 2004.
- [4] : Polycopiés M SEBAA Fethi et M RAHOU Mohamed «Assemblages Soudés, Préparation aux examens IWT, Procédés et matériels de soudage » Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen- Faculté de TECHNOLOGIE Département de Génie Mécanique,2019.
- [5] : support de cours du professeur au Marc BENTI « Conception Réalisation Chaudronnerie Industrielle »professeur au LEGT Paul Constans - 03100 MONTLUCON BTS, 2012.
- [6] : Chems-Eddine DERFOUF «effet de la soudure sur la structure de l'acier » Thèse Présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat en sciences Spécialité Génie Mécanique, Université Mohamed Khieder – Biskra, 2011.
- [7] :Claes Olsson «PROCÉDÉS DE SOUDAGE », Dunod, Paris 2012.
- [8] :Boukra Mohamed «inspection et contrôle des assemblages soudées par CND » mémoire Master en assemblages soudés et matériaux, Université Aboubekr Belkaïd Tlemcen.2020.
- [9] : MOUICI Derradji « cours procédés de soudage » ingénieur de soudage chez alpha pipe, Tub de ghardaia , 2014.
- [10] : <https://qualifab.ca/fr/types-de-procedes-de-soudure/>.
- [11] : <https://poste-a-souder.ooreka.fr/comprendre/soudage-a-electrode-enrobee>
- [13] : <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-mag-fil-massif-gmaw-135-271/>
- [12] : <https://www.soudage-equipement.com/blog/content/uploads/2017/02/Cours-MMA-.pdf>
- [14] : https://www.memoireonline.com/12/13/8307/m_Analyse-numerique-des-contraintes-residuelles-dans-les-structures-assemblees-par-soudage-cas-des8.html .

Références bibliographiques

- [15] : <https://www.saf-fro.com> , « procédé de soudage TIG / SAF – FRO ».
- [16] : <https://www.rocdacier.com> ,« cours sur la soudure TIG (soudage tungsten inert gas) rocdacier » .
- [17] : <https://www.rocdacier.com> « le soudage laser ».
- [18] : <https://www.rocdacier.com/soudage-resistance-soudure-point>.
- [19] : www.esab.com (Problèmes et défauts de soudage– causes et remèdes)
- [20] : Mr RABHI Mouldi, Support de cours « Contrôle non destructif CND » , Institut Supérieur des Etudes Technologiques de GAFSA,Département Génie Mécanique,2017.
- [21] : APAVE Lyon France ,Présentation des principaux moyens d’investigation par contrôle non destructif, Document de formation.
- [22] : Recueil de normes AFNOR Soudage et techniques connexes - Tome 3 Contrôles et Essais.
- [23] : Mme B. MANGEOT, Maître de conférences à l’Université Paris VI, Magnétoscopie Niveau 2,2ème Edition 1990.
- [24] : www.chez.com/soudage2000.
- [25] : <http://ndt.agfa.com>
- [26] : ALI RAID 2017-2018 « CONTRÔLE NON DESTRUCTIF » L'université des sciences Et de la technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf.
- [27] :G.GAUSSORGUES La thermographie infrarouge Edition Techniques Et Documentation.2004.

Références bibliographiques

[28] : https://www.cofrend.com/jcms/uat_128237/fr/emission-acoustique-at

[29] : <http://fr.worldironsteel.com/news/what-s-the-difference-between-api-5l-gr-b-and -18620003.html> .