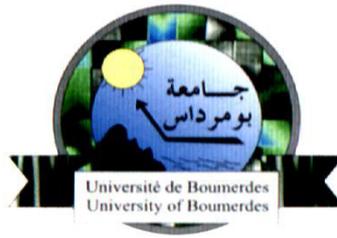


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique
Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Génie des matériaux

THEME

Méthodes de contrôle non destructif pour la détection des
défauts de soudage des pipelines

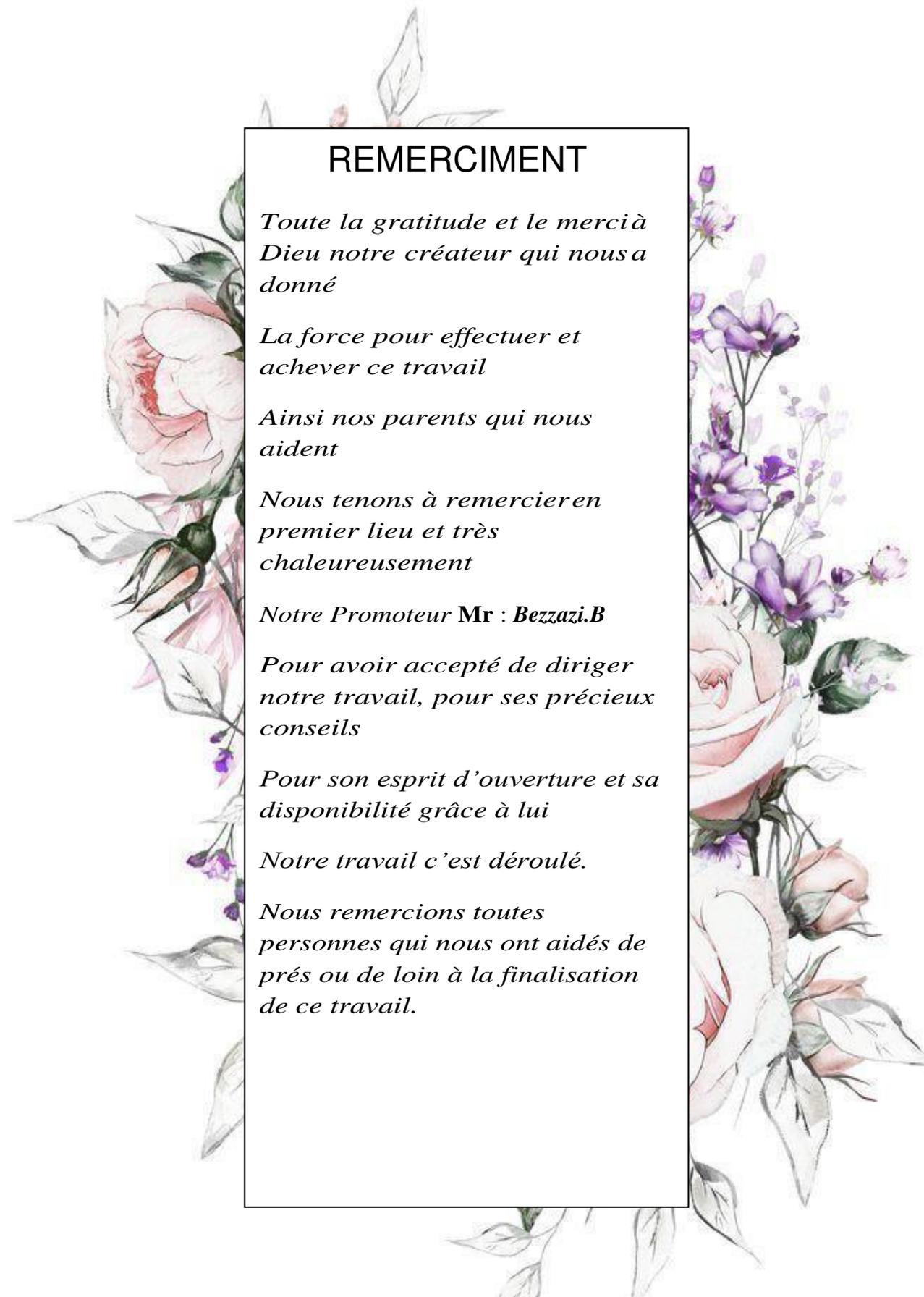
Présenté par :

Hamdani Amel
Hariz Amel

Promoteur : Pr. Bezzazi Boudjema

Co- promoteur : Mr. Benaissa Mansour
Mr. Bounar Ahmed

Promotion 2019- 2020



REMERCIEMENT

*Toute la gratitude et le merci à
Dieu notre créateur qui nous a
donné*

*La force pour effectuer et
achever ce travail*

*Ainsi nos parents qui nous
aident*

*Nous tenons à remercier en
premier lieu et très
chaleureusement*

*Notre Promoteur **Mr : Bezzazi.B***

*Pour avoir accepté de diriger
notre travail, pour ses précieux
conseils*

*Pour son esprit d'ouverture et sa
disponibilité grâce à lui*

Notre travail c'est déroulé.

*Nous remercions toutes
personnes qui nous ont aidés de
prés ou de loin à la finalisation
de ce travail.*



DIDICACE

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

♥ *A mes chers parents*

♥ *A mon très cher **Amine Aksas***

♥ *A mes frères, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

♥ *A toute la famille **Hamdani***

♥ *A tous mes amis.*

♥ *A mon binôme **Amel**.*

Hamdani Amel



DIDICACE

*A ceux qui m'ont donné
la vie, symbole de beauté,
et de fierté, de sagesse et
de patiente.*

*A ceux qui sont la source
de mon inspiration et de
mon courage, à qui je dois
de l'amour et la
reconnaissance.*

♥ *A mes parents, ma belle
mère Aïcha et mon héros
Abdelaziz.*

♥ *A mes frères et mes
sœurs, je vous réserve
toujours une place dans
mon cœur et mes pensées.*

♥ *A toute la famille
Hariz.*

♥ *A ma future famille **H***

♥ *A mon binôme **Amel.***

Hariz Amel

Résumé

À partir de notre stage au département inspection/corrosion a SONATRACH, on a pris des généralités sur la technologie des pipelines, les caractéristiques des tubes utilisés et les principaux procédés de soudage pour leur assemblage...Etc,

À l'aide des superviseurs de (ENACT) qui sont responsables de contrôle par les différentes méthodes, on a acquis les informations que nous avons présenté sur les différents défauts de soudage et leurs causes, ainsi que les méthodes de détection.

Par la suite, nous avons développé l'étude théorique des méthodes ultrasonores radiographiques, magnétoscopiques et ressuage pour l'inspection des matériaux et les conditions de contrôle par ces méthodes

Mots clés ; ressuage, défaut, magnétoscopie, radiographie, fissure, soudage, pipelines

Abstract

From our internship in the inspection / corrosion department at SONATRACH, we learned about pipeline technology, the characteristics of the tubes used and the main welding processes for their assembly ... Etc,

With the help of (ENACT) supervisors who are responsible for checking by the different methods, we acquired the information that we presented on the various welding faults and their causes, as well as the detection methods.

Subsequently, we developed the theoretical study of radiographic, magnetic particle and penetrant ultrasound methods for the inspection of materials and the conditions of control by these methods

Keywords ; penetrant testing, defect, magnetic particle inspection, radiography, c racking, welding, pipelines

ملخص

من خلال فترة تدريبنا في قسم الفحص / التآكل في سوناطراك ، تعرفنا على تقنية خطوط الأنابيب وخصائص الأنابيب المستخدمة وعمليات اللحام الرئيسية لتجميعها ... إلخ

بمساعدة مشرفي الشركة الوطنية للمراقبة التقنية المسؤولين عن التحقق بالطرق المختلفة ، حصلنا على المعلومات التي قدمناها حول أعطال اللحام المختلفة وأسبابها ، وكذلك طرق الكشف

بعد ذلك قمنا بتطوير لدراسة النظرية للطرق الشعاعية والجسيمات المغناطيسية وطرق اختراق الموجات فوق الصوتية لفحص المواد وظروف التحكم بهذه الطرق

الكلمات الدالة ؛ الاختبار المخترق ، العيب ، فحص الجسيمات المغناطيسية ، التصوير الشعاعي ، الكراك ، اللحام ، خطوط الأنابيب.

Sommaire

Sommaire.....	i
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste d'abréviation.....	x
Présentation de l'entreprise SONATRACH.....	xi
Introduction générale	1

CHAPITRE I : GENERALIRE SUR LA TECH NOLOGIE DES PIPELINES

I.1 Introduction.....	2
I.2 La technologie des pipelines.....	2
I.2.1 Caractéristiques des tubes.....	2
I.2.1.1 Diamètre.....	2
I.2.1.2 Matériaux constituant les tubes	3
I.3 Méthodes des fabrications des tubes.....	3
I.3.1 Fabrication des tubes sans soudure.....	3
I.3.2 les tubes soudés bout à bout	4
I.3.3 Les tubes soudés en spirale.....	4
I.4 Assemblages des pipelines.....	5
I.4.1 le chanfreinage des tubes.....	5
I.5 Procédés de soudage.....	6
I.5.1 Procédés de soudage de pièces métalliques	6
I.5.2 Soudage par pression.....	6
I.5.3 Soudage par fusion.....	7
I.5.4 soudage à l'arc électrique.....	7
I.5.4.1 Généralités sur l'arc de soudage.....	7
I.5.4.2 Principe de soudage à l'arc électrique.....	8
I.6 Le soudage avec électrode enrobée.....	9
I.6.1 Principe de procédé.....	9
I.6.2 Les électrodes.....	9
I.7 Protection de métal en fusion.....	10
I.7.1 Apport d'élément.....	10
I.7.2 Types d'électrode	10
I.8 Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG.....	11
I.8.1 Principe des œuvres du procédé.....	11
I.8.2 Les gaz de protection en TIG.....	12
I.9 Le soudage soumis-automatique sous protection gazeuse (MIG ou MAG).....	12
I.9.1 Gaz de protection.....	13
I.9.2 La composition des fils.....	13
I.10 Soudage des aciers à faible teneur en carbone.....	13
I.10.1 Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	13
I.10.1.1 Le métal de base.....	13
I.10.2.La zone fondue.....	13
I.10.3 La zone thermiquement effectuée (Z.A.T).....	13
I.10.4 Zones de liaison.....	14
I.11 Conclusion partielle.....	14

CHAPITRE II : LES DEFAUTS DE SOUDAGE

II.1 Introduction.....	15
------------------------	----

II.2 Les fissures.....	15
II.2.1 Généralités.....	15
II.2.2 Orientation des fissures.....	15
II.2.3 Les fissures longitudinales.....	15
II.2.4 Les fissures transversales.....	16
II.3 Types des fissures.....	17
II.3.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks).....	17
II.3.2 Fissures de Racine.....	18
II.3.3 Fissures de Cratère.....	18
II.3.4 Fissures au raccordement.....	19
II.3.5 Fissures sou-Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	19
II.4 Fissures à chaud (ou de solidification).....	20
II.4.1 définition.....	20
II.4.2 Causes possibles.....	20
II.4.3 Méthodes de détection.....	21
II.4.4 Méthode de réparation.....	21
II.4.5 Mésures préventives.....	21
II.5 Fissures à froid (fissure d'hydrogène).....	21
II.5.1 Définition.....	21
II.5.2 Causes possibles.....	22
II.5.3 Méthodes de détection.....	22
II.5.4 Méthodes de réparation.....	22
II.5.5 Mésures préventives.....	22
II.6 Fissuration lamellaire(ou l'arrachement lamellaire).....	23
II.6.1 Introduction.....	23
II.6.2 dentification.....	23
II.6.2.1 Aspect visuel.....	23
II.7 Fissures de réchauffages	23
II.7.1 Définition.....	23
II.7.2 Causes possibles.....	24
II.7.3 Méthodes de détection.....	24
II.8 Manque de fusion.....	24
II.8.1 Localisations possibles des manques de fusion.....	24
II.8.2 Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	25
II.8.2.1 Définition.....	25
II.8.2.2 Causes possibles.....	25
II.8.2.3 Méthodes de détection.....	26
II.8.3 Manque de fusion entre passes.....	26
II.8.3.1 Définition.....	26
II.8.3.2 Causes possibles.....	26
II.8.3.3 Méthodes de détection.....	26
II.8.4 Manque de fusion à la racine de la soudure.....	26
II.8.4.1 Définition.....	26
II.8.4.2 Causes possibles.....	27
II.8.4.3 Méthode de détection.....	27
II.9 Manque de pénétration.....	27
II.9.1 Localisation possibles des manques de pénétration.....	27
II.9.1.1 A la racine de la soudure (soudure en «V»).....	28
II.9.1.2 A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers «X»).....	28
II.9.2 Manque de pénétration à la racine.....	28

II.9.2.1 Définition.....	28
II.9.2.2 Causes possibles.....	28
II.9.2.3 Méthodes de détection.....	28
II.9.3 Manque de pénétration dans la soudure.....	29
II.9.3.1 Définition.....	29
II.9.3.2 Causes possibles.....	29
II.9.3.3 Méthodes de détection.....	30
II.9.4 Inclusion gazeuse.....	30
II.9.4.1 Différents formes d'inclusions gazeuses ou porosités.....	30
II.9.4.2 Porosités vermiculaires.....	30
II.9.4.2.1 Définition.....	30
II.9.4.2.2 Causes possibles.....	30
II.9.4.2.3 Méthodes de détection.....	31
II.9.5 Porosités de reprise.....	31
II.9.5.1 Définition.....	31
II.9.5.2 Causes possibles.....	31
II.9.5.3 Méthodes de détection.....	31
II.9.5.4 Porosités uniformes.....	32
II.9.5.4.1 Définition.....	32
II.9.5.4.2 Causes possibles.....	32
II.9.5.4.3 Méthodes de détection.....	32
II.9.6 Inclusion de laitier.....	32
II.9.6.1 Définition.....	32
II.9.6.2 Causes possibles.....	33
II.9.6.3 Méthodes de détection.....	33
II.9.7 Inclusion de tungstène.....	33
II.9.7.1 Définition.....	33
II.9.7.2 Causes possibles.....	33
II.9.7.3 Méthodes de détection.....	34
II.9.8 Inclusion de cuivre.....	34
II.9.8.1 Définition.....	34
II.9.8.2 Causes possibles.....	34
II.9 Excès de matière.....	35
II.9.1 Généralités.....	35
II.9.2 Excès de pénétration.....	35
II.9.2.1 Définition.....	35
II.9.2.2 Causes possibles.....	35
II.9.2.3 Méthodes de détection.....	36
II.9.3 Surépaisseur.....	36
II.9.3.1 Définition.....	36
II.9.3.2 Causes possibles.....	36
II.9.3.3 Méthodes de détection.....	36
II.10 Recouvrement non fusionnée (Débordement).....	36
II.10.1 Définition.....	36
II.10.2 Causes possibles.....	37
II.10.3 Méthodes de détection.....	37
II.11 Dénivellement.....	37
II.11.1 Définition.....	37
II.11.2 Causes possibles.....	38
II.11.3 Méthodes de détection.....	38

II.12 Cratère.....	38
II.12.1 Définition.....	38
II.12.2 Causes possibles.....	38
II.12.3 Méthodes de détection.....	38
II.13 Défauts de surface.....	39
II.13.1 Morsures/Caniveaux.....	39
II.13.1.1 Définition.....	39
II.13.1.2 Causes possibles.....	39
II.13.1.3 Méthodes de détection.....	39
II.14 Effondrement à la racine.....	40
II.14.1 Définition.....	40
II.14.2 Causes possibles.....	40
II.14.3 Méthode de détection.....	40
II.15 Amorges à l'arc.....	41
II.15.1 Définition.....	41
II.15.2 Causes possibles.....	41
II.15.3 Méthodes de détection.....	41
II.16 Projections sur le métal de base	41
II.16.1 Définition.....	41
II.16.2 Causes possibles.....	42
II.16.3 Méthodes de détection.....	42
II.16.4 Défauts d'aspect.....	42
II.17 Métal de base (inspection des défauts).....	43
II.17.1 Inspection des matériaux.....	43
II.17.2 Inspection des tubes.....	43
II.17.3 Inspection de tôles.....	44
II.18 Imperfections de métal de base.....	44
II.18.1 Doublures.....	44
II.18.2 bandes de ségrégation.....	44
II.18.3 Pliure.....	44
II.18.4 Repiliure.....	45
II.19 Dommages Mécaniques.....	45
II.20 Conclusion.....	46

**CHAPITRE III : ELEMENTS SUR LES METHODES DE CONTROLE NON
DESTRUCTIF (CND)**

III.1 Introduction.....	47
III.1.2 Définition.....	47
III.1.3 Généralités sur le contrôle non destructif.....	48
III.1.4 Mise en œuvre des contrôles non destructif.....	48
III.1.5 Principaux contrôles non destructifs	49
III.1.6.Principe de la détection d'un défauts.....	49
III.2 Examen visuel.....	49
III.2.1 Principe du contrôle.....	49
III.2.2 Mise en œuvre du contrôle	49
III.2.2.1 Eclairage.....	49
III.2.2.2 L'œil et ses limitation.....	50
III.2.2.3 Aides optiques à la vision.....	50
III.2.2.4 Appareils optiques classiques.....	50
III.2.2.5 Appareils optiques spécifique.....	50
III.3 Contrôle par ressuage.....	51

III.3.1 Introduction.....	51
III.3.2 Principe de ressuage.....	52
III.3.3 Méthode de contrôle.....	53
III.3.4 Procédure de contrôle.....	53
III.4 Contrôle par magnétoscopie.....	54
III.4.1 Définition.....	54
III.4.2 Principe de contrôle.....	54
III.4.3 Méthode de contrôle (Méthode de magnétisation).....	55
III.4.4 La nature du champ magnétique.....	56
III.4.5 L'intensité du champ magnétique.....	56
III.4.6 La direction du champ magnétique.....	56
III.4.7 Défauts détectables.....	56
III.4.8 Produits révélateurs.....	56
III.4.9 Démagnétisation.....	57
III.4.10 Procédure de contrôle.....	58
III.4.11 Avantages.....	58
III.4.12 Inconvénient.....	58
III.5 Contrôle par Ultrason.....	59
III.5.1 Introduction aux ondes ultrasons.....	59
III.5.2 Émission et réception des ultrasons.....	60
III.5.3 Un élément d'excitation ou de commande.....	60
III.5.3.1 Un générateur d'impulsions.....	60
III.5.3.2 Un palpeur.....	60
III.5.3.3 Un amplificateur.....	60
III.5.3.4 Un tube cathodique (ou écran de visualisation).....	60
III.5.3.5 Technologie des palpeur.....	61
III.5.3.6 Les type des palpeurs.....	62
III.5.3.7 Le choix du palpeur.....	63
III.6 Matériel mis en œuvre.....	64
III.6.1 Caractéristiques.....	64
III.6.1.2 Avantages.....	64
III.6.1.3 Inconvénients.....	64
III.7 Contrôle par radiographie	65
III.7.1 Introduction.....	65
III.7.2 Principe de la méthode.....	65
III.7.3 Utilisation des rayons X ou γ	66
III.7.4 Lois de propagation des rayonnements ionisants.....	67
III.7.4.1 Nature et propriétés principale.....	67
III.7.4.2 Phénomène d'absorption.....	67
III.7.4.3 Mise en œuvre.....	68
III.8 Principe de la Gammagraphie.....	69
III.8.1 Choix de l'isotope.....	69
III.8.2 Temps de pose.....	70
III.8.3 Méthode de contrôle.....	70
III.8.4 Le film radiographique.....	71
III.8.5 Développement manuel d'un film radiographique.....	71
III.8.6 La densité optique d'un film.....	72
III.8.7 La projection elliptique.....	72
III.8.8 Le tir au contact.....	72
III.8.9 Visibilité des défauts.....	73
III.8.10 Qualité du contrôle.....	73
III.8.11 Le repérage des radiogrammes.....	74
III.8.12 Protection.....	75
III.8.13 Applications.....	75
III.9 Caractéristiques.....	75
III.9.1. Avantages.....	75

III.9.2. Inconvénients.....	76
III.9.3. Inconvénients en Hygiène et Sécurité.....	76
III.10 Conclusion partielle.....	76

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE APPLIQUEES SUR LES JOINTS

SOUEDES

IV L'EXECUTION DE CONTROLE.....	77
IV.1 Introduction.....	77
IV.2 Essai de ressuage.....	78
IV.2.1 Produits utilisés.....	78
IV.2.2 Première étape : préparation et nettoyage préalable.....	79
IV.2.3 Application de pénétrant.....	79
IV.2.4 Conclusion.....	82
IV.3 Magnétoscopie.....	83
IV.3.1 Mode expérimentale.....	83
IV.3.2 Conclusion.....	85
IV.4 Ultrasons.....	86
IV.4.1 Matériels utilisés.....	86
IV.4.2 L'étalonnage de l'appareillage.....	88
IV.4.3 Le contrôle de pièce soudée.....	93
IV.5 Conclusion.....	95
Conclusion générale.....	96
Références bibliographie.....	97

Liste des figures

- Figure I.1 pipelines
- Figure I.2 diamètre des tubes
- Figure I.3 fabrication des tubes sans soudure
- Figure I.4 formage sous forme U
- Figure I.5 formage sous forme O
- Figure I.6 soudage en spirale d'un tube
- Figure I.7 chanfrein en V
- Figure I.8 chanfrein en X
- Figure I.9 chanfrein en V avec méplat
- Figure I.10 chanfrein en demi V
- Figure I.11 chanfrein en U
- Figure I.12 chanfrein en double
- Figure I.13 chanfrein en tulipe
- Figure I.14 : Principe de soudage par pression
- Figure I.15 : Principe de soudage à l'arc électrique
- Figure I.16 : L'électrode enrobée
- Figure I.17 : Electrodes de soudage
- Figure I.18 : Principe de soudage TIG
- Figure I.19 : Les différentes zones d'un assemblage soudé
- Figure II.1 : La fissure longitudinale
- Figure II.2 : La fissure transversale
- Figure II.3 : Les types de fissure
- Figure II.4: Fissure de Gorge (Throat Cracks)
- Figure II.5 : Fissure de Racine
- Figure II.6: Fissure de Cratère
- Figure II.7 : Fissure au raccordement
- Figure II.8 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)
- Figure II.9: Fissure à chaud (ou de solidification)
- Figure II.10 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène)
- Figure II.11 : Arrachement lamellaire dans un joint en T
- Figure II.12 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking)
- Figure II.13 : Localisations possibles des manques de fusion
- Figure II.14 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure
- Figure II.15 : Manque de fusion entre passes
- Figure II.16 : Manque de fusion à la racine de la soudure
- Figure II.17: Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure
- Figure II.18 : Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur de la soudure
- Figure II.19 : Manque de pénétration dans la soudure
- Figure II.20: Inclusions gazeuses porosités vermiculaires
- Figure II.21 : Inclusions gazeuses porosités de reprise
- Figure II.22 : Inclusions gazeuses porosités uniformes
- Figure II.23 : Inclusions de laitier
- Figure II.24: Inclusions de tungstène
- Figure II.25 : Inclusions de cuivre
- Figure II.26 : Excès de matière
- Figure II.27 : Excès de pénétration
- Figure II.28 : Convexité excessive & Surépaisseur excessive
- Figure II.29 : Recouvrements non fusionnés (Débordements)

Figure II.30 : Dénivellement
 Figure II.31 : Cratère
 Figure II.32: Défauts de surface (Morsures/Caniveaux)
 Figure II.33 : Effondrement à la racine
 Figure II.34 : Effondrement
 Figure II.35 : Amorces d'arc
 Figure II.36 : Projections sur le métal de base
 Figure II.37 : Défaut d'aspect
 Figure II.38 : Métal de base (Inspection a défauts)
 Figure II.39 : Inspection de tôles
 Figure II.40 : Imperfections du métal de base
 Figure II.41 : Repliure
 Figure II.42 : Doublure de laminage
 Figure II.43 : Dommages Mécaniques
 Figure III.1 : Examen par éclairage
 Figure III.2 : Endoscope
 Figure III.3 : Contrôle par ressuage
 Figure III.4 : Contrôle par magnétoscopie
 Figure III.5 : Fissuration induite par un traitement thermique
 Figure III.6 : Fissuration en service d'un crochet
 Figure III.7 : Chaines de mesure de contrôle par ultrason
 Figure III.8 : Élément des palpeurs
 Figure III.9 : Appareil de contrôle par US transducteurs mesureur d'épaisseur
 Figure III.10 : le principe du contrôle radiographie (rayonnement X ou γ)
 Figure III.11: obtentions des rayons X
 Figure III.12 : Absorption des rayons ionisants
 Figure III.13 : Structure d'un film radiographique
 Figure III.14 : Développement manuel d'un film radiographique
 Figure III.15 : La projection elliptique
 Figure III.16: Le tir au contact
 Figure III.17 : Indicateurs de qualité d'image
 Figure III.18 : Le repérage des radiogrammes
 Figure IV.1 : forme de l'échantillon
 Figure IV.2 : nettoyage de la pièce
 Figure IV.3 : application de produit ressuage
 Figure IV.4 : application de révélateur
 Figure. IV.5 : a les défauts détectés dans la pièce après ressuage
 Figure IV.6 : contrôle par magnétoscopie
 Figure IV.7 : le matériel nécessaire pour le contrôle par magnétoscopie
 Figure IV.8 : rayonnement ultra-violet
 Figure IV.9 : application de champ magnétique
 Figure IV.10 : les défauts détectées dans la pièce à contrôlé par magnétoscopie
 Figure IV.11 : appareil détecteur des défauts par ultrasons SIUI CTS-9005.
 Figure IV.12 : câble de connexion coaxial
 Figure IV.13 : palpeur d'angle SIUI AFN4-1010-451 (4MHZ) 45°
 Figure IV.14 : bloc d'étalonnage
 Figure IV.15 : Schéma fonctionnel de bloc d'étalonnage
 Figure IV.16 : Vérification du linéaire horizontal

Figure IV.17 : vérification de point d'émergence
Figure IV.18 : l'angle de réfraction
Figure IV.19 : vérification de la l'angle de bigle
Figure IV.20 : réglage du zéro palpeur
Figure IV.21 : traçage de la CAD
Figure IV.22 : contrôle de la pièce soudée

Liste des tableaux

Tableau III.1 : vitesses de propagation des ondes dans la matière
Tableau III .2 : les périodes de radioactivité de quelques sources
Tableau III.3 : le taux d'utilisation des contrôles non destructifs
Tableau III.4 : le temps de pose
Tableau III .5 : apparences radiographiques de quelques défauts de soudure
Tableau IV.1 : produits utilisés dans l'essai de ressuage

LISTE DES ABREVIATION

Symboles	Signification
CND	Contrôle non destructif
MB	Métal de base
MD	Métal d'apport
NPS	Nominal pipe size
DE	Le diamètre extérieur
DI	Le diamètre intérieur
TIG	Soudage (tungstène inert Gas)
MIG	Soudage (Metal Inert Gas)
MAG.	Soudage (Metal Active Gas)
UV	Ultra violetes
M.I.G	Métal inerte gaz
M.A.G	Métal active gaz
ZAT	La zone thermiquement effectuée
MB	Métal de base
SMAW	Le soudage avec électrodes enrobées
GTAW	Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG
SAW	Soudage à l'arc électrique sous flux automatique
IQI	Indicateurs de qualité d'image
ENACT	Entreprise Nationale d'Agréage et contrôle technique

**Présentation de
l'entreprise
SONATRACH**

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE SONATRACH

Sonatrach est la compagnie algérienne chargée de la recherche, de l'exploitation, du transport par canalisation, de la transformation et de la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Elle intervient également dans d'autres secteurs de la production (génération) électrique, des énergies nouvelles et renouvelables et du dessalement d'eau de mer. Elle exerce ses métiers en Algérie et partout dans le monde où l'opportunité se présente.

A sa nationalisation en 1971, SONATRACH s'est vue confié la mission du développement de l'industrie des hydrocarbures.

Les années (80) SONATRACH subit une réorganisation d'où découlent 17 entreprises spécialisées où SONATRACH enrôle 27000 personnes et avec le départ de traitement de gaz avec une exploitation nationale de 150 gisements de pétrole et de gaz naturel.

Sonatrach est la première entreprise du continent africain. Elle est classée 12ème parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2ème exportateur de GNL et de GPL et 3ème exportateur de gaz naturel. Sa production globale (tout produit confondu) est de 230 millions de TEP en 2006. Ses activités constituent environ 30⁰/0 du PNB de l'Algérie.

Elle emploie actuellement environs 120 000 personnes dans l'ensemble du Groupe.

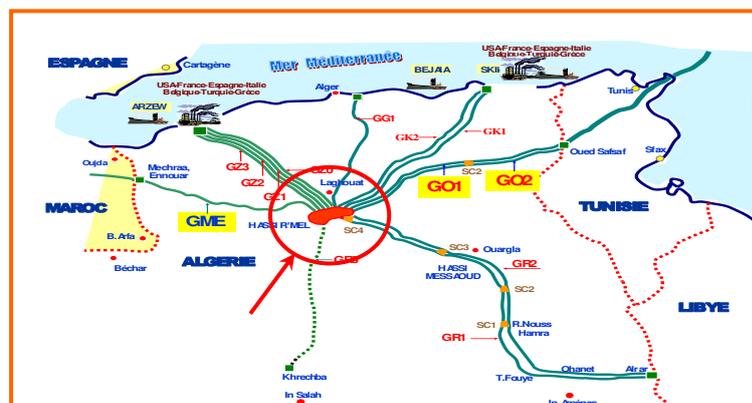
Présentation du champ de Hassi R'mel :

Situation géographique et climatique de Hassi R'mel :

Le gisement de Hassi R'Mel est situé à 525 km au sud d'Alger, entre les Wilayas de Ghardaïa et Laghouat (Fig.1-1). Dans cette région relativement plate du Sahara l'altitude moyenne est d'environ de 750m au dessus du niveau de la mer, Le climat est caractérisé par une pluviométrie faible (140 mm/an) et une

Humidité moyenne de 19⁰/0 en été et 34⁰/0 en hiver, les amplitudes thermique sont importantes et varient de 0⁰C en hiver à 45 ⁰C en été, les vents dominants sont de direction nord ouest.

Le champ de Hassi R'mel est une vaste étendue de 3500 Km² (70Km de long et 30Km de large environ), où sont concentrées d'importantes installations (module de traitement de Gaz, Centre de traitement d'Huile, stations de compression, stations de d'éshuillage.. .etc).



Les activités du champ De Hassi R'mel

Cinq « Modules » ou « MPP » sont implantés sur le champ de Hassi R'mel. Le terme "MPP" est le diminutif du terme anglo-saxon de Module Processing Plant ; Il désigne une usine de traitement de gaz naturel à l'échelle industrielle.

Quatre de ces Modules, ont une capacité unitaire de 60 millions de m³, leur construction date des années 1979/80.

Le cinquième, Module 0, a une capacité de 30 millions. Il est le plus ancien.

Deux autre petit Modules, situés au sud, desservent deux petit gisement secondaires successivement Djebel Bissa et Hassi R 'mel Sud. En rapport avec leur petite capacité de production, ils sont désignés par l'appellation de centre de traitement de gaz CTG-DJB et CTG-HRSud.

Les Modules 1 et 0 disposent d'une unité complémentaire commune connue sous l'appellation de (phase B). Cette installation a pour fonction d'approvisionner ces deux Module en Gaz Propane en guise de gaz réfrigérant.

La fonction XP consiste à traiter le gaz, à en séparer les fractions liquides (condensat & GPL) du Gaz de vente proprement dit.

Une partie du gaz de vente est destinée à la distribution dans le réseau nationale et a la commercialisation extérieure, alors que l'autre partie (partie excédentaire) sera réinjectée dans le gisement au moyen des stations de compression Nord et Sud.

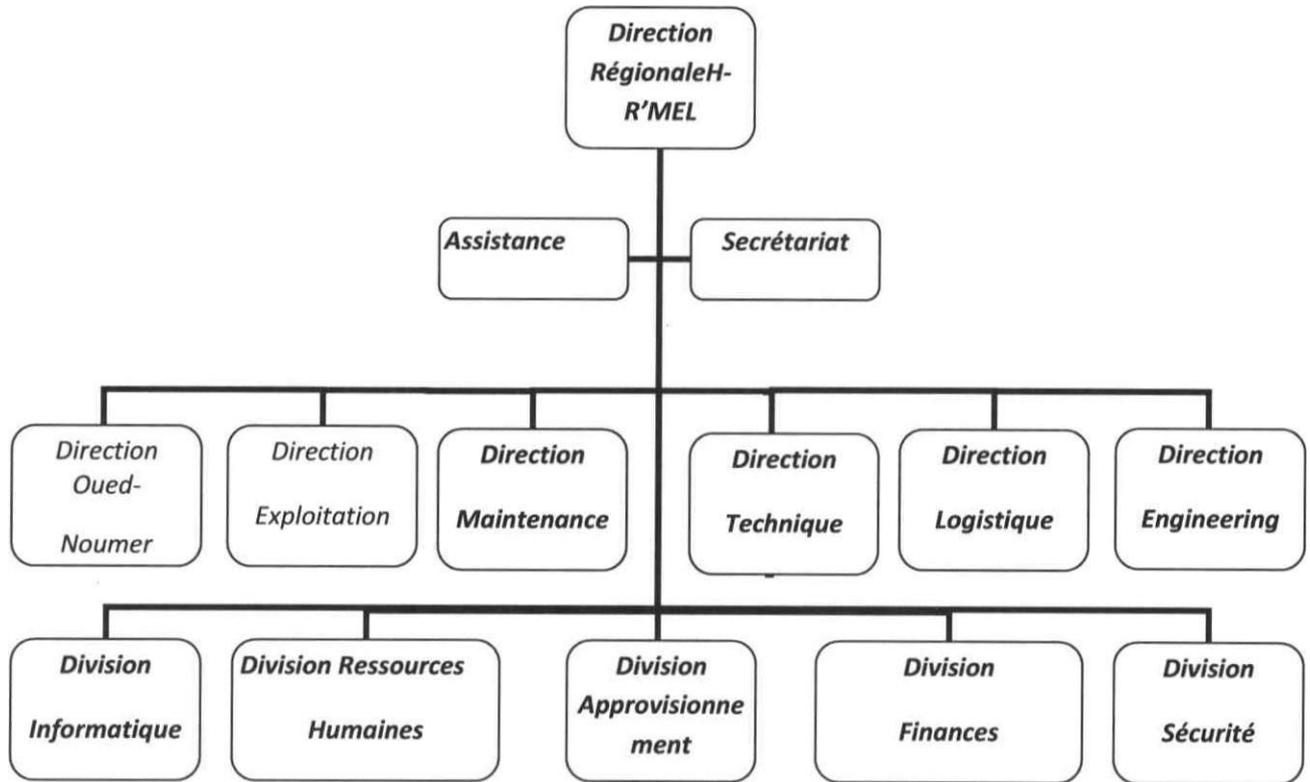
Un centre de stockage et de transfert des produits hydrocarbure, composé de douze sphères à GPL et sept grands bacs à condensat, est implanté dans la zone centrale à proximité du MPP4.

Les modules de traitement de gaz sont reliés pour le stockage des hydrocarbures liquides (GPL, condensat) au CSTF et à deux stations de réinjection de 90 millions de m³ chacune pour la réinjection.

Trois stations de déshuilage ont été érigées pour le traitement des eaux huileuses industrielles provenant des modules ainsi qu'une station d'épuration pour les eaux domestiques.

Organisation de la direction régionale de Hassi R'mel

Organigramme de la direction régionale de Hassi R 'mel



Direction régionale

La Direction Régionale, structure mise en place en 1990, répond aux objectifs suivants :

- Développement du gisement gazier et l'anneau d'huile de Hassi R'mel.
- Mise en place des nouvelles technologies dans l'engineering des installations. Les missions des structures composant la direction régionale sont les suivantes.

Division approvisionnement et transport

- L'approvisionnement de matériel et pièces de rechange au moyen des divers budgets, appels d'offres et commandes locales.
- La réception des équipements et pièces de rechange, la vérification de leur conformité et leur mise en stock.

Direction technique

- La gestion et la prise en charge des nouveaux projets industriels.
- La réalisation des modifications suggérées par les sites utilisateurs.

Direction engineering et production

- Développement du gisement.
- Entretien des puits et installations de surface (wire-line et work-over).

Direction exploitation

- Exploitation optimale des unités.
- Planification et réalisation des programmes de production.

Direction maintenance

- Maintien des équipements en état de bon fonctionnement.
- Planification des entretiens préventifs.
- Mise en place des politiques de maintenance.
- Mise en place et développement de l'outil informatique (GMAO).

Direction logistique

- Suivi et réalisation des infrastructures de base de la région.
- Entretien des installations domestiques de la région (électricité, froid, plomberie, menuiserie).

Présentation du département inspection/corrosion

Tous complexe industriel pétrochimique est composé d'équipements coûteux qui traitent ou acheminent des produits inflammables pour la plus part, ou certaines peuvent être explosifs ou dangereux lors de leurs manipulation.

Toute défaillance d'un équipement de ce genre par une rupture peut être la cause de graves accidents tels les incendies ou les explosions et dont les conséquences peuvent être selon le cas :

- une détérioration des installations.
- un arrêt des unités de production.
- perturbation des programmes de production
- des pertes de vies humaines, des brûlures et blessures

Le département inspection/corrosion déploie ses ingénieurs et techniciens pour les consacrer à l'étude et la mise en œuvre des moyens de préventions et de lutte contre la corrosion au sein des installations d'hydrocarbures de Hassi R'mel.

Son action touche toute la chaîne de production et de réinjection des hydrocarbures c'est-à-dire :

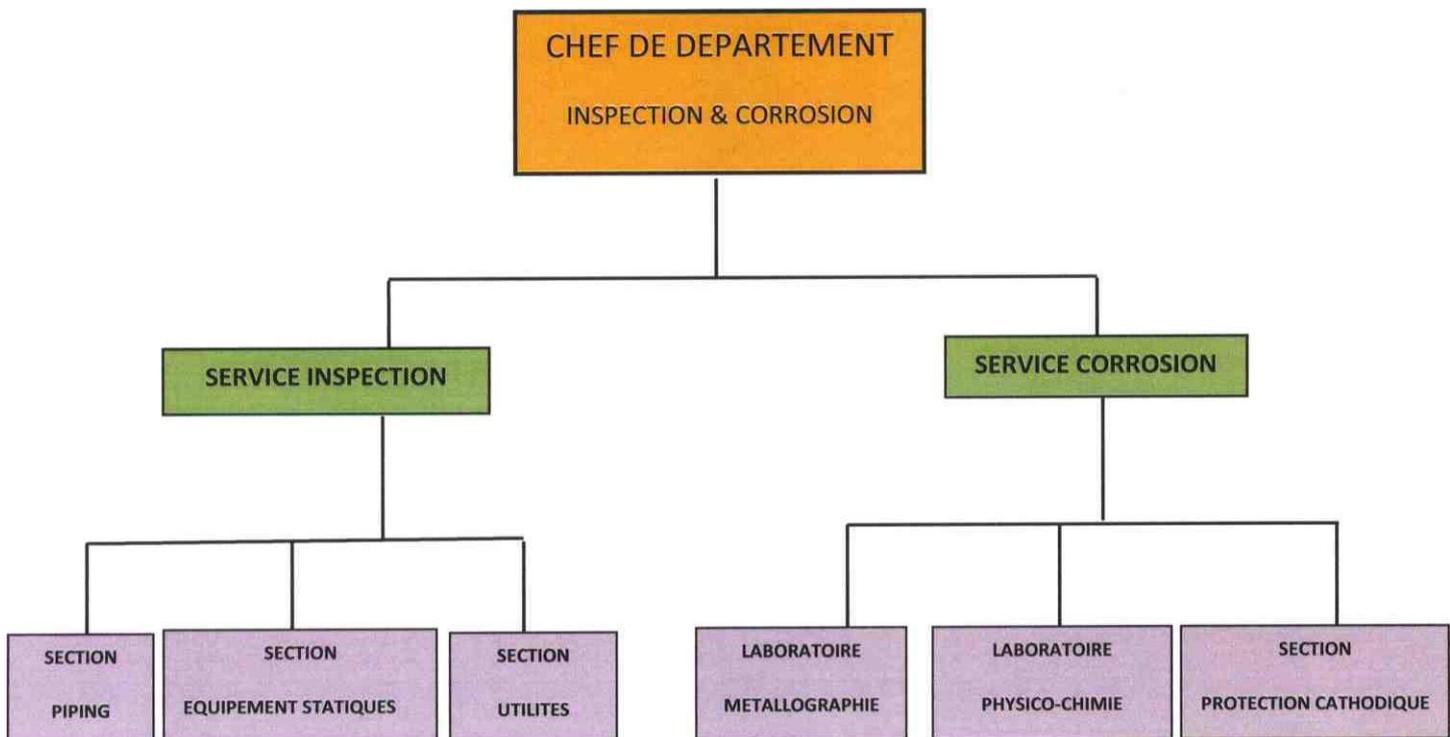
- les installations de surface regroupant :
 - -les équipements des puits de gaz et de pétrole,
- les jonctions et les Manifolds,

- la tuyauterie et les équipements statiques des modules, des stations de compression, le CSTF et les CTHs.
- • et les installations de fond ou équipements fond de puits.

La fabrication est l'exploitation des équipements sont soumis a des réglementations officielle, le Département Inspection et Corrosion doit : veiller a l'application de la réglementation en vigueur régissant l'exploitation des APG et des APL (suivi et programmation des révisions réglementaires).

- Doit s'assurer du bon respect des normes et standard gouvernant la construction et le suivi et la maintenance des installations. Evaluer la durée de vie restante des équipements.
 - o Analyse des anomalies et défauts rencontrés. Recommandations techniques lors des réparations ou des modifications.
- Assurer la relation extérieur avec les organisme de contrôle technique et administrative (ENACT , ARH, DPEM)

L'Organigramme du département



Service inspection

Il revient au service inspection d'assurer les tâches suivantes:

- l'inspection, en marche ou à l'arrêt, des différents équipements et signalement de tout dommage ou détérioration subi par ces équipements (établissement des rapports d'inspection),

- l'émission des recommandations d'entretien et fixation des procédures de réparation et ce conformément aux règles de l'art approuvées par les différents codes et normes applicables, • l'homologation des procédés de soudage et de revêtements (métalliques et organiques) ou tout autre procédé de réparation ou de restauration.
- et finalement, le contrôle de la qualité des travaux neufs et de réalisation (bacs de stockage, réseaux de collecte et installations de surface)

Service corrosion

Il revient à ce service, au moyen de sa section « laboratoire », d'assurer le soutien scientifique et technique dans la recherche des solutions aux problèmes courants de corrosion posés.

Compte à elle, la section « Protection Cathodique » est chargée de l'étude, de la réalisation et de l'entretien des systèmes de protection cathodique des installations hydrocarbures (ouvrages enterrés et bacs de stockage).

Pour cela il assure les différentes tâches suivantes:

- la recherche des causes de dégradation des équipements du point de vue corrosion
 - (caractérisation et identification du type de corrosion),
- l'analyse des problèmes de corrosion et la recherche des solutions adéquates (choix d'inhibiteurs, de revêtements ou de matériaux plus résistants),
- le contrôle de la qualité des matériaux et produits utilisés dans la lutte contre la corrosion, • l'analyse nécessaire au contrôle de l'efficacité des traitements anticorrosion (au moyen du suivi coupons de corrosion),
- la réalisation et l'entretien des systèmes de protection cathodique des installations (collectes enterrées et capacités de stockage),

Introduction générale

Introduction générale

L'acheminement d'énergie telles que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. En effet, ces dernières sont devenues le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus assuré pour de grandes quantités d'énergies, et sur de longues distances (plusieurs centaines voire plusieurs milliers de kilomètres).

Il faut noter qu'il s'agit de centaines de kilomètres de soudures réalisées sur les chantiers de construction de conduites.

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les Connue par le contrôle non destructif (CND) ou (des essais non destructifs (END).

Mais il existe 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 réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler.

À entrain de l'opération de soudage, il existe plusieurs défauts qui influent sur le cordon de soudure, et à cause desquels on a distingué des méthodes pour prévenir et corriger ces défauts, cette méthode plusieurs types de défauts présents dans les cordons. Il faut alors savoir quelle méthode de contrôle sera utilisée.

La présente étude sur « le contrôle des joints de soudure des pipelines par les quatre méthodes de contrôle non destructif (CND) ». Le sujet est scindé en cinq chapitres :

Chapitre I : généralités sur la technologie des pipelines.

Ce chapitre est consacré sur la technologie des pipelines, et les procédés de soudage les plus utilisés pour leur assemblage.

Chapitre II : les défauts de soudage.

Dans ce chapitre on a montré les types de défaut de soudage et leurs causes ainsi que leurs modes de détection.

Chapitre III : éléments sur les méthodes de contrôle non destructif (CND).

Dans ce chapitre on a présenté les principes de contrôle de quatre méthodes de contrôle non destructif.

Chapitre IV : Etude expérimentale appliquée sur les joints soudés.

Dans ce chapitre on va présenter les défauts détecté par les quatre méthodes de CND , et les interprétés et connaitre aussi quelques critères d'acceptation des défauts de soudage, ainsi que les remèdes de ces derniers.

Chapitre I

**Généralités sur la
technologie des pipelines**

I.1 Introduction

Les pipelines tiennent une place importante dans les industries gazières et pétrolière, celles-ci sont le plus souvent en acier. Bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel.

Parmi les procédés d'assemblage des pipes, le soudage est l'opération qui assure la continuité entre les bords des tubes.

Les soudures sont susceptibles de présenter des défauts, dont on peut classer selon des ordres divers.

I.2 La technologie des pipelines

Une canalisation ou pipeline, est une conduite destinée à l'acheminement de matière gazeuse ou liquide, la plupart des pipelines sont faits d'acier, en soudant des courtes sections de tuyaux les uns aux autres [1].



Figure I.1 : Pipelines.

I.2.1 Caractéristiques des tubes

Un tube est essentiellement défini par son diamètre, son épaisseur et la nature du matériau qui le compose [2] :

I.2.1.1. Diamètre

Est défini de manière différente suivant les normes de fabrications américaines et françaises:

Normes américaines : ANSI

Le diamètre était encore repéré par un nombre appelé NPS ou le diamètre nominale exprimé en pouce.

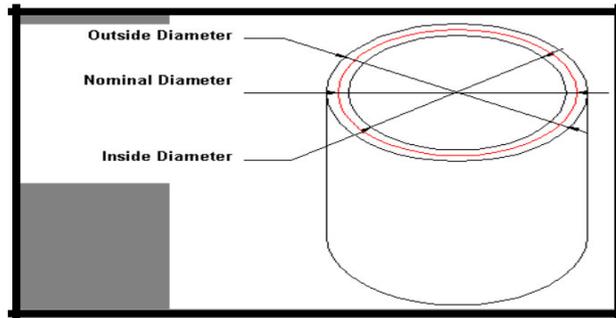


Figure I.2 : Diamètre des tubes.

Diamètre nominal (nominal pipe size NPS).

Le diamètre extérieur (DE).

Le diamètre intérieur (DI).

I.2.1.2. Matériaux constituant les tubes

L'acier est le matériau le plus utilisé pour élaboration des tubes.

Les qualités d'acier couramment utilisées dans la construction des tubes sont définies dans deux spécifications de l'API dénommées **5L** pour les qualités normales et **5LX** pour les qualités à haute résistance. [1], [3].

Les conditions maximales d'utilisations (pression et température) et le degré de corrosivité des fluides véhiculés influent sur le choix de l'acier.

- la pression intervient pour déterminer l'épaisseur des tubes.
- la température influe sur la résistance mécanique des aciers.
- la corrosivité contraint à choisir un matériau de résistance chimique adapté. Selon leur utilisation on distingue :

Acier au carbone non alliée.

Les aciers faiblement alliés.

Les aciers fortement alliés ou inoxydable et les super alliages.

A côté des aciers on rencontre de plus en plus, notamment dans l'industrie chimique, des tubes en matériau plastiques ou matériaux composites [2], [3]

I.3 Méthodes de fabrications des tubes

Les tubes en acier au carbone peuvent être fabriqués en utilisant plusieurs techniques différentes [1] :

I.3.1 Fabrication des tubes sans soudure

Le tube sans soudure est formé en perçant une tige d'acier solide, presque-fondue, appelée billette, avec un mandrin pour produire un tube n'ayant pas de joints ou soudure.

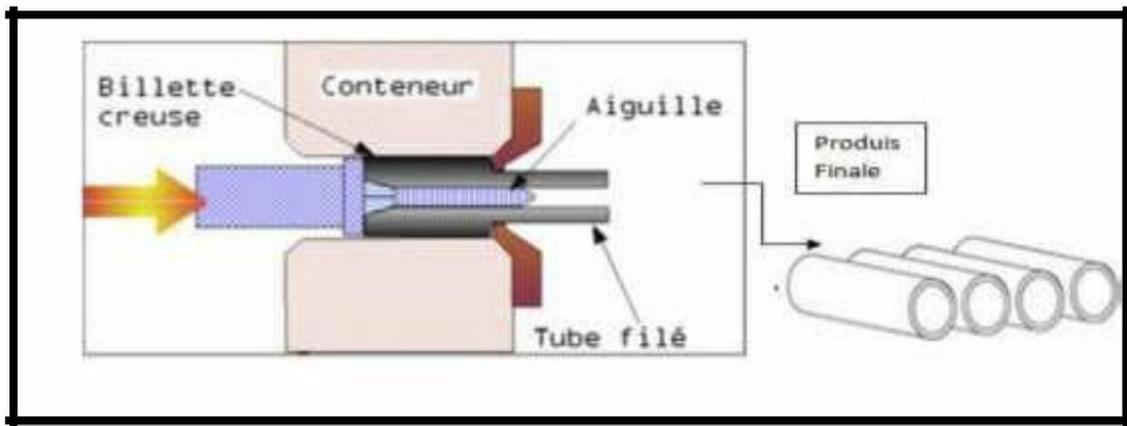


Figure I.3 : Fabrication des tubes sans soudure.

I.3.2 Les tubes soudés bout à bout :

Le tube soudé bout à bout est formé par l'alimentation d'une tôle en acier chaude à travers des laminiers à forme, qui le rouleront dans une forme circulaire creuse. Le serrage forcé des deux extrémités de la tôle de se joindre, puis une machine assure une soudure en continue Figure. I.4 formage sous forme U.

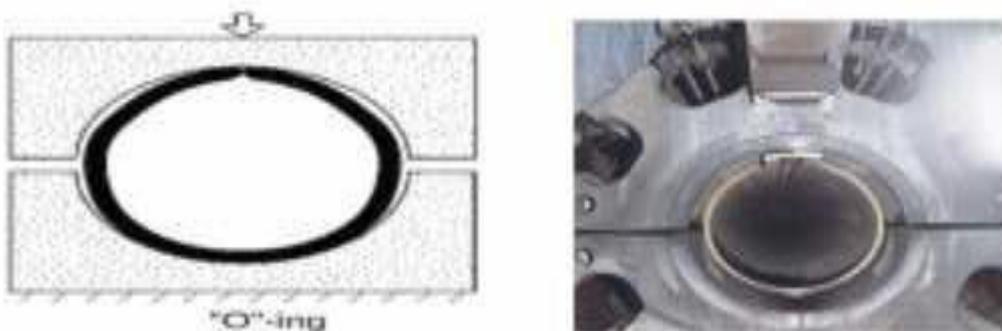


Figure I.4 : formage sous forme O.

I.3.3 Les tubes soudés en spirale

Les tubes soudés en spirale sont fait avec inclinaison de l'angle d'introduction d'une bande de métal en forme de spirale, puis les bords sont joints puis soudés, ce qui forme un cordon de soudure spirale.

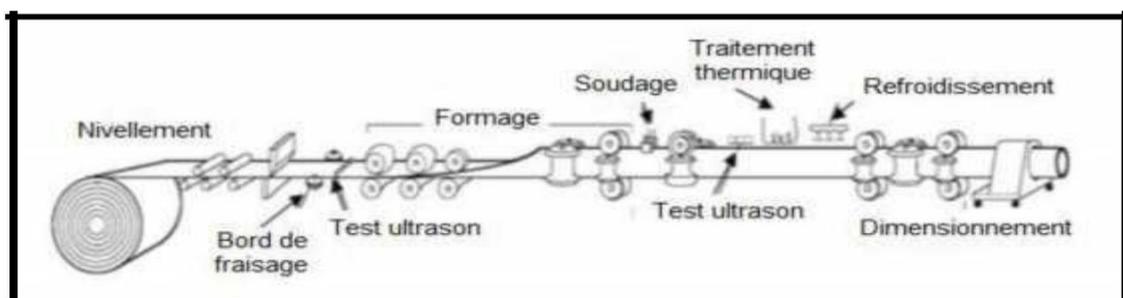


Figure I.5 : soudage en spirale d'un tube.

I.4 Assemblage des pipelines

Les assemblages des pipelines sont réalisés par l'opération de soudage pour assurer une continuité du métal entre les tubes à assembler.

Dans l'industrie de **sonatrach** les assemblages de canalisation de gaz sont préférentiellement effectués par le procédé à l'**arc électrique**, il s'agit de type de soudage le plus répandu.

I.4.1 Le chanfreinage des tubes

Est l'opération de création d'une surface abattue à l'extrémité de tube. L'ouverture créée par l'opération de chanfreinage permet au soudeur d'accéder à la totalité de l'épaisseur du tube, ceci afin de pouvoir réaliser une soudure uniforme qui assure la continuité mécanique de l'assemblage [4].

Les différents types des chanfreins utilisés :

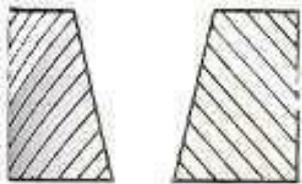


Figure : I.6 chanfrein en V.

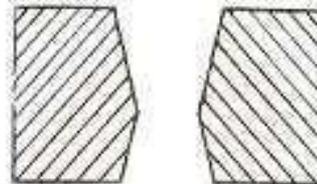


Figure I.7 : chanfrein en X.

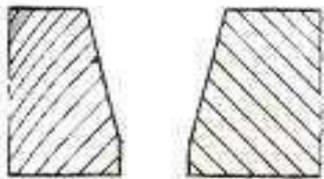


Figure I.8 : chanfrein en V avec méplat.

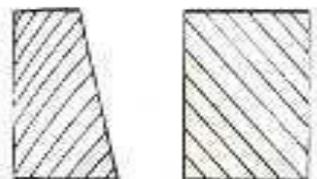


Figure I.9: chanfrein en demi-V.

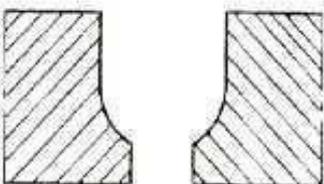


Figure I.10 : chanfrein en U.

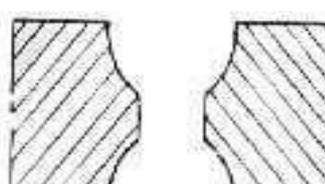


Figure I.11 : chanfrein en double U.

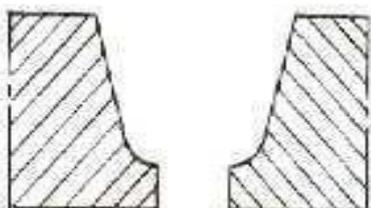


Figure I.12 : chanfrein en tulipe.

I.5 Procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

Le type d'énergie mise en œuvre ;

Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;

Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).

La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser [5].

I.5.1 Procédés de soudage de pièces métalliques

- Soudage à la flamme.
- Soudage aluminothermique.
- Soudage électrique par résistance.
- Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées.
- Soudage à l'arc avec électrodes non fusibles.
- Soudage à l'arc avec fil électrodes fusibles ou soudage semi-automatique.
- Soudage orbital.
- Soudage laser.
- Soudage plasma.
- Soudage par faisceau d'électrons.
- Soudage par friction.
- Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique.
- Soudage à l'arc sous flux.
- Soudage hybride.
- Soudage électro gaz.
- Soudage par diffusion.
- Soudage par explosion.
- Soudage par impulsion magnétique.

D'une manière très globale on classe les procédés de soudage des aciers sous deux importantes catégories :

I.5.2 Soudage par pression

Le soudage par pression (Fig.I.13), regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage [6].

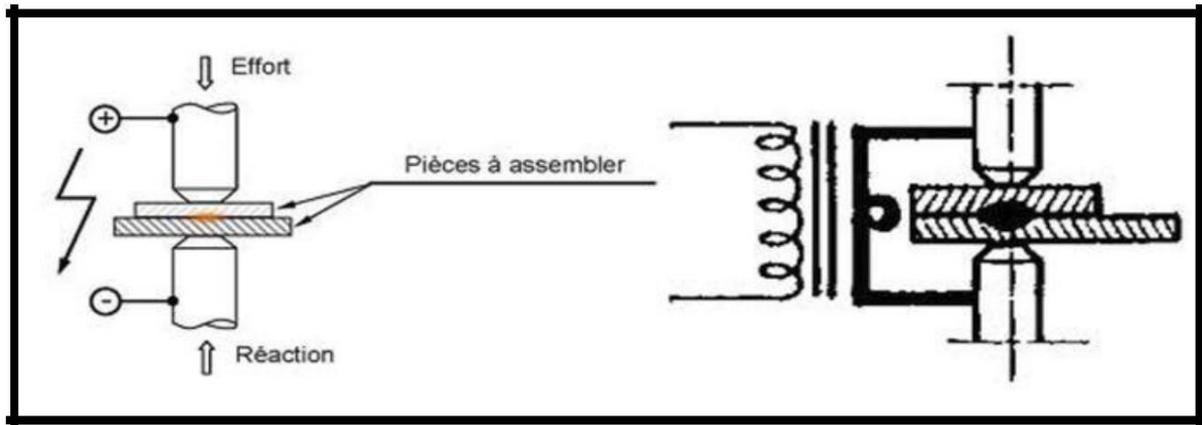


Figure I.13 : Principe de soudage par pression.

I.5.3 Soudage par fusion

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie électriques ou chimiques. Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Soudage à l'arc électrique.
- Soudage à l'arc sous gaz de protection.
- Soudage par jet de plasma.
- Soudage sous flux.

I.5.4 Soudage à l'arc électrique

I.5.4.1 Généralités sur l'arc de soudage

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisée par une densité de courant élevée et par une faible différence de potentiel. Par une décharge électrique on entend le passage du courant électrique à travers un milieu gazeux. Il ya plusieurs formes ou types de décharges électrique : en arc, à leur, par étincelles, décharge orageuse (éclair) et autre elles par leurs durée, tension, intensité de courant et autres paramètres [7].

I.5.4.2 Principe de soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder (Fig.I.14).

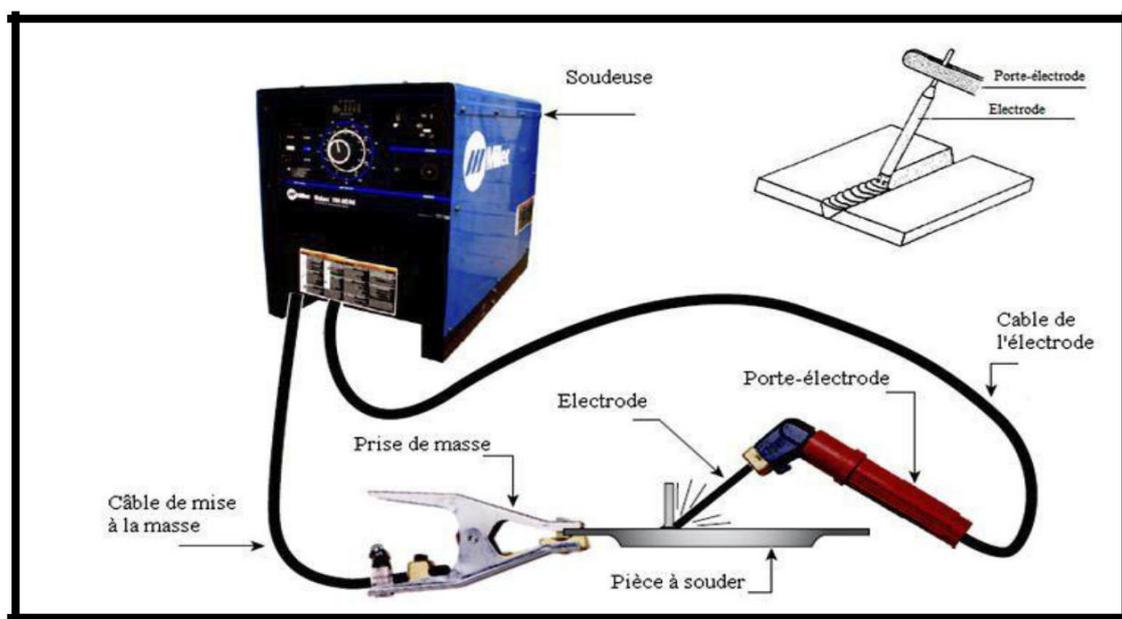


Figure I.14 : Principe de soudage à l'arc électrique.

L'effet thermique provoque la fusion aussi bien de l'électrode que du métal de base, pour amorcer un arc il faut que le courant parcourt un circuit fermé d'une part la pièce et de l'autre l'électrode.

L'arc électrique est la source de chaleur à base de nombreux procédés de soudage, les raisons primordiales de se choisir sont :

- Les effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est à l'arc court entre une électrode formant ainsi l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion ;
- Les phénomènes de transport de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, formant un dépôt se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Il est à noter que pour le cas des électrodes réfractaires il n'y a pas de transfert entre l'électrode et la pièce.

Les procédés de soudage qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion sont :

- Le soudage avec électrode enrobées ;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG.
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.
- Le soudage automatique sous flux.

I.6 Le soudage avec électrodes enrobées

I.6.1 Principe du procédé

Un arc électrique établi entre une électrode et les bords des pièces à assembler, provoque leur fusion et crée un bain de métal liquide reçoit les gouttes de métal de l'électrode (Fig.I.16.). L'arc résulte du passage d'un courant électrique intense à travers une atmosphère de gaz ou de vapeur, normalement non-conductrice. Les électrons circulent de la cathode (pôle négatif) vers l'anode (pôle positif) que constituent l'extrémité de l'électrode et l'impact de l'arc sur la pièce : la polarité est choisie ionisée ne représente qu'une faible part d'énergie calorifique mais irradie surtout des rayonnements électromagnétique (lumière visible, ultra violettes,).

La tâche anodique et surtout la tâche cathodique, où se présentent les ions positifs, fournissent ensemble l'essentiel de la chaleur. La tâche anodique, bombardée par les électrons est par contre

à une température plus haute (3500°C) que celle de la tâche cathodique (2400°C). Cette situation est permanente en courant continu ; elle s'inverse à chaque alternance en courant alternatif. Le réamorçage s'obtient dans la mesure où l'anode, devenue cathode, reste suffisamment chaude pour devenir émettrice.

I.6.2 Les électrodes

Les électrodes de soudages sont constituées par (Fig I.15):

- Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant et dont fusion forme le métal déposé ;
- Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :
 - a. Stabilité électrique de l'arc ;
 - b. Protection du métal en fusion ;
 - c. Apport d'éléments dans le métal déposé

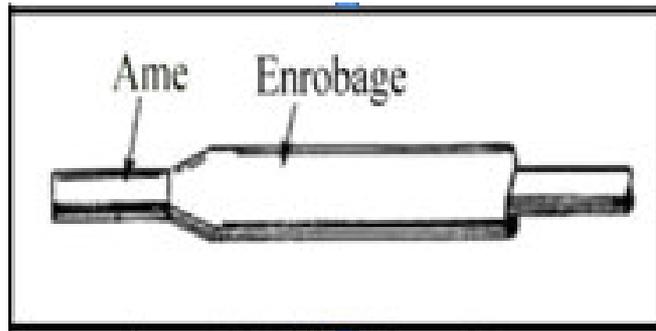


Figure. I.15 : L'électrode enrobée.

I.7 Protection de métal en fusion

L'atmosphère créée lors de la fusion de l'enrobage isole le métal liquide de l'oxygène et de l'azote de l'air. Chaque goutte de métal est entourée d'une protection de laitier qui viendra ensuite surnager sur le bain de fusion en format aussi le départ des gaz occlus.

I.7.1 Apport d'élément

Au cours de la fusion, certains constituants plus volatils ont tendance à disparaître, comme le manganèse, l'enrobage compense alors ces pertes. De surcroît, l'enrobage fournit des constituants nouveaux (molybdène, nickel). Le laitier modifie également la tension superficielle du métal liquide, donnant au cordon une forme plus ou moins concave.

I.7.2 Types d'électrodes

Les électrodes se définissent par le diamètre de l'âme et la nature chimique de l'enrobage. Les diamètres normalisés sont : (1,25-1,6-3,15-4-5-6)mm

Les enrobages les plus utilisés sont :

- L'enrobage cellulosique.
- L'enrobage basique.
- L'enrobage rutile.

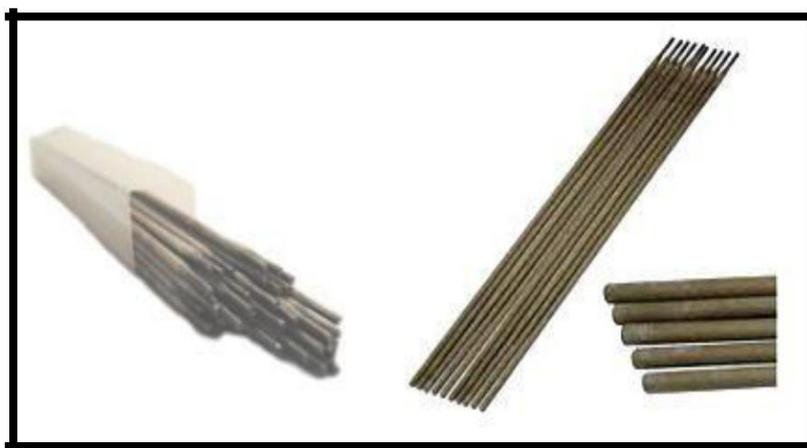


Figure I.16 : Electrodes de soudage.

I.8 Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG

Le TIG produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui dans bien des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. De plus, autre aspect non négligeable, ce procédé s'applique à des matériaux aussi divers que les aciers ou d'aluminium et de cuivre [8].

I.8.1 Principe et œuvre du procédé

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène Inert Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) (gas tungstène arc welding) (Fig.I.18).

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débit mètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires [9].

A l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle du métal de base, on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce ainsi que le métal d'apport (éventuel) formant ainsi le joint soudé après refroidissement.

Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène [10].

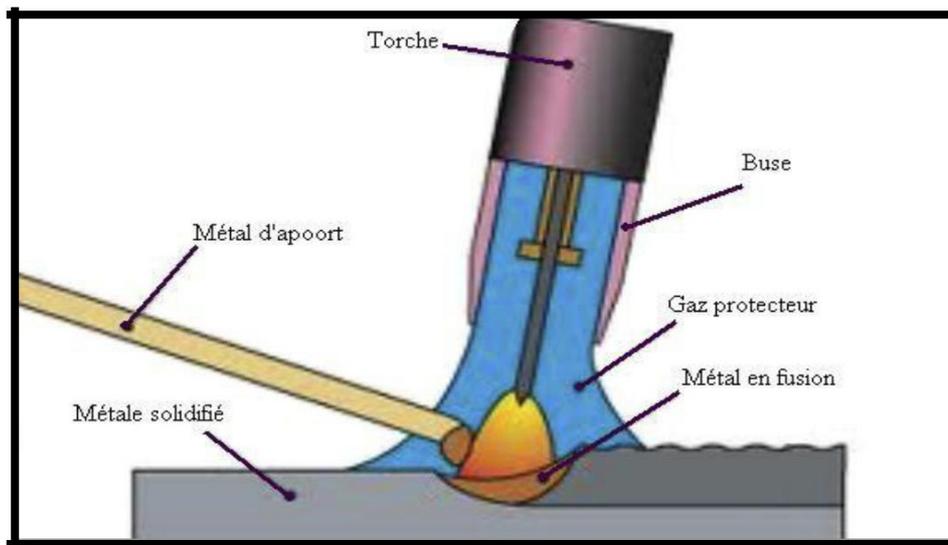


Figure I.17 : Principe de soudage TIG.

I.8.2 Les gaz de protection en TIG

Les gaz inertes utilisés sont soit de l'argon, soit de l'hélium soit des mélanges argon-hélium. L'argon, de qualité commerciale « soudage », est le gaz le plus utilisé car il convient à presque tout les cas d'application. L'hélium, plus couteux que l'argon, est utilisé lorsque l'on peut tirer profit du fait qu'il permet de plus grandes vitesses de soudage et une pénétration plus profonde. Quand aux mélanges (généralement à 25%, 50% ou 70% hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix [11].

I.9 Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse (MIG ou MAG) :

L'arc est protégé entre un fil consommable et les bords de la pièce à souder. Le fil en fusion et le bain de soudure est protégé de l'oxydation de l'air par un flux de gaz inerte (le procédé se dénomme alors M.I.G= métal inerte gaz) ou actif (procédé M.A.G= métal active gaz). Le déroulement du fil à vitesse constant permet d'alimenter en métal d'apport le bain de fusion.

Ces différentes fonctions de protection et d'amenée de métal sont remplies par une installation qui comprend :

- Le générateur de courant continu.
- Une source de gaz protecteur.
- Un système de refroidissement de troche.
- La torche ou pistolet.

I.9.1 Gaz de protection

On distingue les gaz inertes et les gaz actifs.

1. Les gaz inerte à base d'argon, ou mélange à l'oxygène, ou d'hélium sont surtout utilisés pour les métaux léger et les aciers inoxydables ;
2. Les gaz actifs servent au soudage des aciers au carbone faiblement alliés (aciers à tube). Le gaz carbonique, parfois mélangé à l'oxygène, est le gaz actif le plus fréquemment utilisé. Il permet d'obtenir une pénétration plus importante et augmente la concavité du cordon.

I.9.2 La composition des fils

La composition des fils dépend :

La nature des matériaux à souder ;

Des pertes d'éléments pendant le soudage.

I.10 Soudage des aciers à faible teneur en carbone

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Les techniques de soudage sont en pleine évolution. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés [10].

I.10.1 Les différentes zones d'un assemblage soudé

I.10.1.1 Le métal de base

Il constitue le métal des pièces à assembler. Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques. L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensible aux changements de phases par précipitations [12].

I.10.2 La zone fondue

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé (Fig.6.) [12].

I.10.3 La zone thermiquement effectuée (Z.A.T)

Partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur du soudage. Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température à été suffisante

pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique.

Dans l'autre partie de la zone thermiquement affectée, il n'y a pas eu transformation allotropique, mais seulement modification, par exemple, de la grosseur de la forme des grains du métal. La zone thermiquement affectée comporte différentes parties, on distingue:

- 1- zone de surchauffe.
- 2- zone austénitique.
- 3- zone partiellement austénitisée [12].

I.10.4 Zone de liaison

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la effectuée thermiquement (Z.A.T). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage (Fig.I.18) [12].

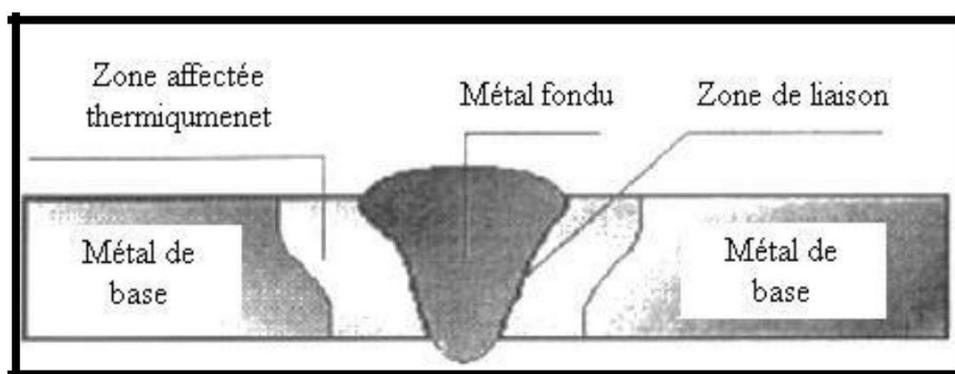


Figure I.18 : Les différentes zones d'un assemblage soudé.

I.11 Conclusion partielle

Dans la première partie de ce chapitre on a présenté une vue générale sur la technologie des pipelines.

Dans une deuxième vue, pour l'assemblage des pipelines, le soudage s'apparait comme l'opération qui occupe une place importante dans l'industrie gazière et pétrolière.

Dans le prochain chapitre on va illustrer les défauts de soudage et les nombreux facteurs qui influent sur ses derniers.

Chapitre II :

Les défauts de soudage

II.1 Introduction :

L'inspection des soudures peut être effectuée pour un bon nombre de raisons. Le motif le plus important est sans doute pour déterminer si la qualité de la soudure convient à l'application prévue. Afin d'évaluer la qualité d'une soudure, il faut d'abord identifier et différencier les défauts de soudage.

L'identification et caractérisation des défauts est une opération délicate dans le processus du contrôle de la qualité des soudures.

Elle se caractérise par l'identification des indications et l'application des critères d'acceptabilité définis par les documents de référence et qui aboutissent soit au rebut soit à l'acceptation du produit.

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Commençons d'abord par les fissurations.

II.2 Les fissures

II.2.1 Généralités

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. La fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique. Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure.

II.2.2 Orientation des fissures

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur [13].

II.2.3 Les fissures longitudinales

Dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure [13].

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous (FigII.1).

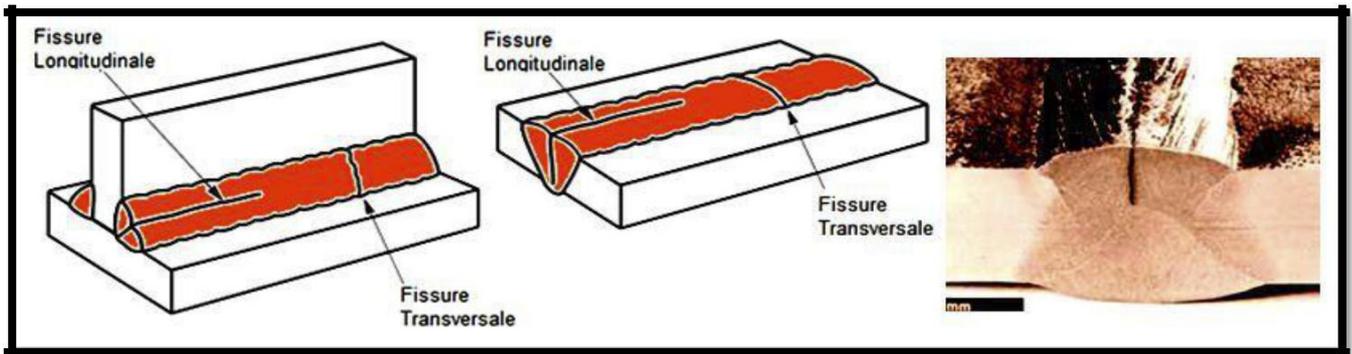


Figure II.1 : La fissure longitudinale.

II.2.4 Les fissures transversales

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

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (Fig.II.2).



Figure II.2 : La fissure transversale.

II.3 Types des fissures

La figure II.3 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

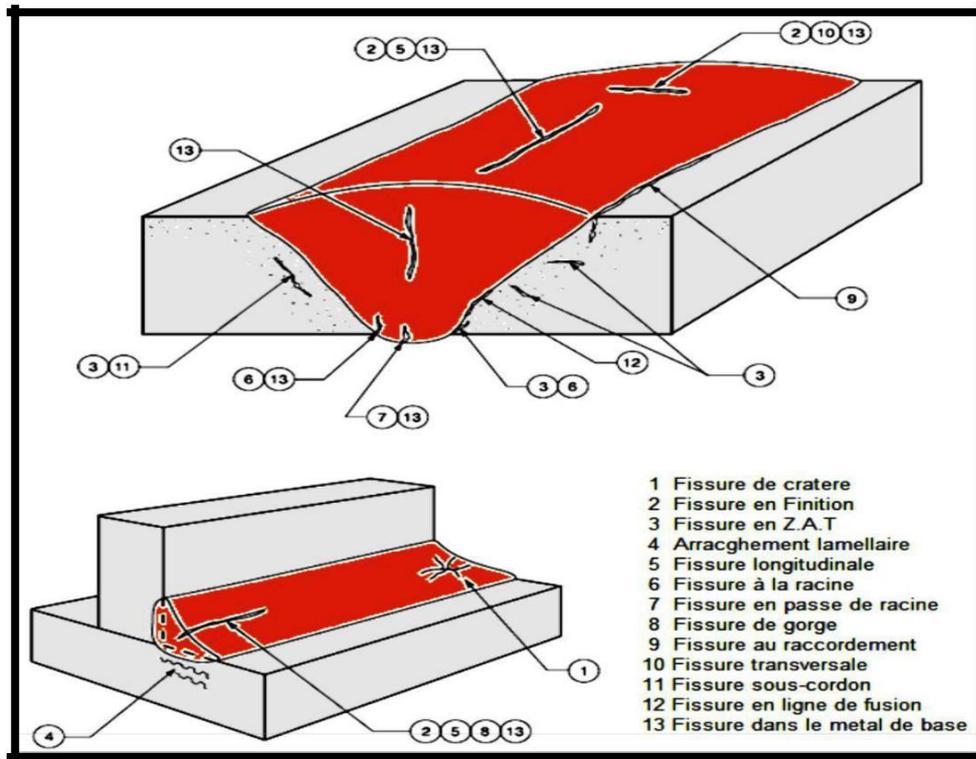


Figure II.3 : Les types de fissure.

II.3.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks)

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (FigII.4). Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud [13].

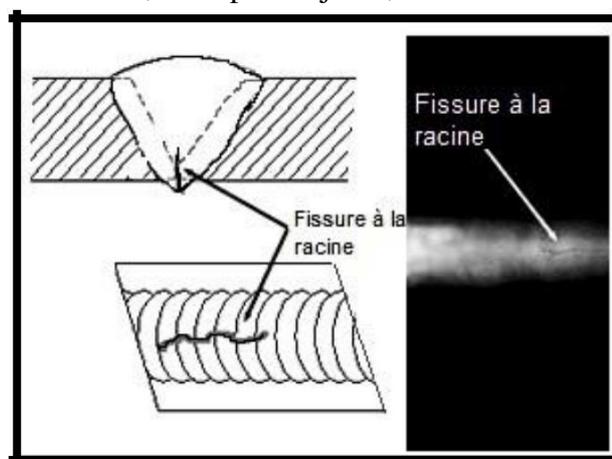


Figure II.4: Fissure de Gorge (Throat Cracks).

II.3.2 Fissures de Racine

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Fig.II.5). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

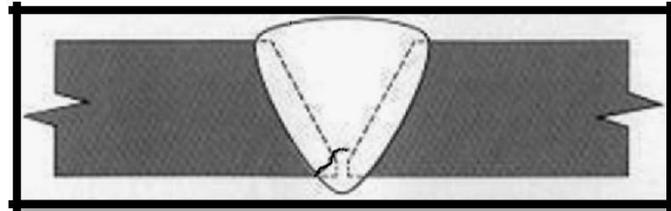


Figure II.5: Fissure de Racine.

II.3.3 Fissures de Cratère

Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (Fig.II.6). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère [13].

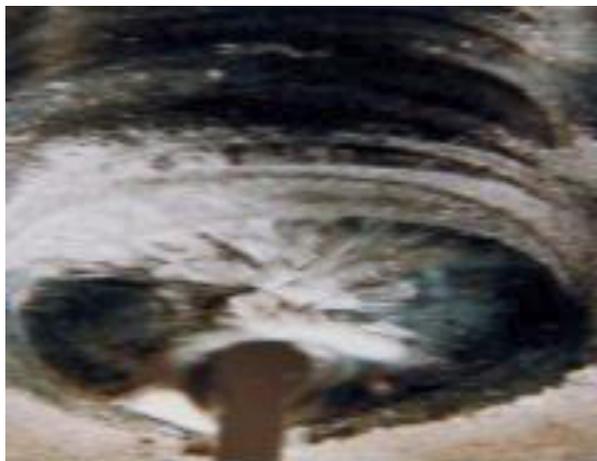


Figure II.6: Fissure de Cratère.

II.3.4 Fissures au raccordement

Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement (Fig.II.7). Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage [13].

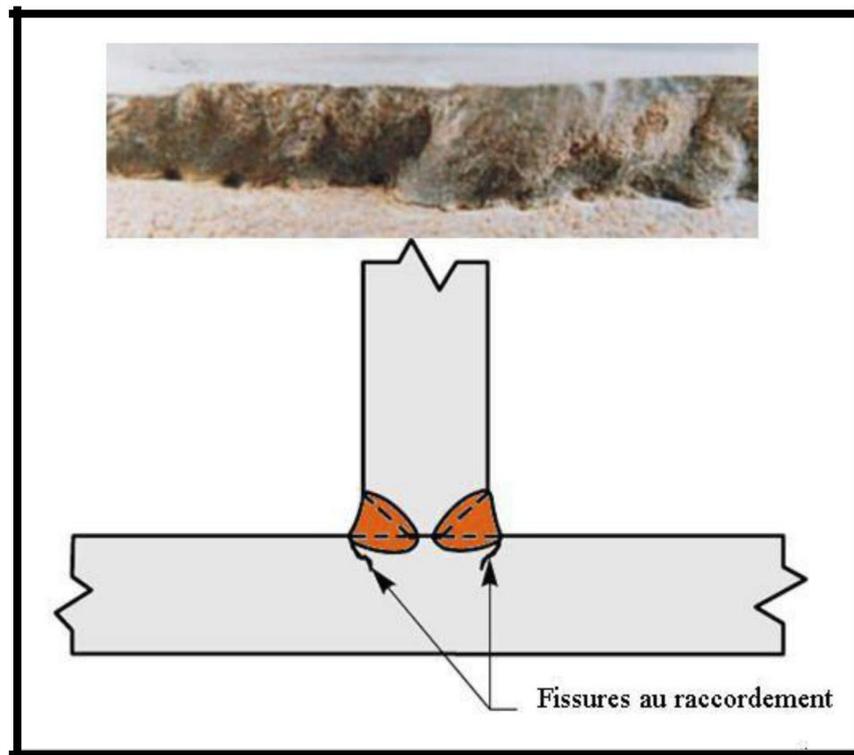


Figure II.7 : Fissure au raccordement.

II.3.5 Fissures Sous-Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)

Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément:

- Hydrogène.
- Une microstructure de ductilité relativement faible.
- De fortes contraintes résiduelles [14].

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Fig.II.8).

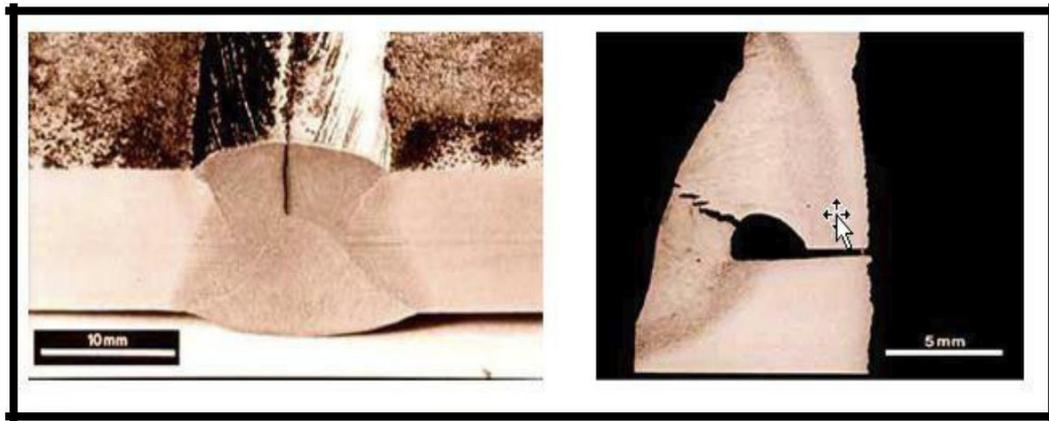


Figure II.8 : Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

II.4 Fissures à chaud (ou de solidification)

II.4.1 Définition

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Fig.II.9).

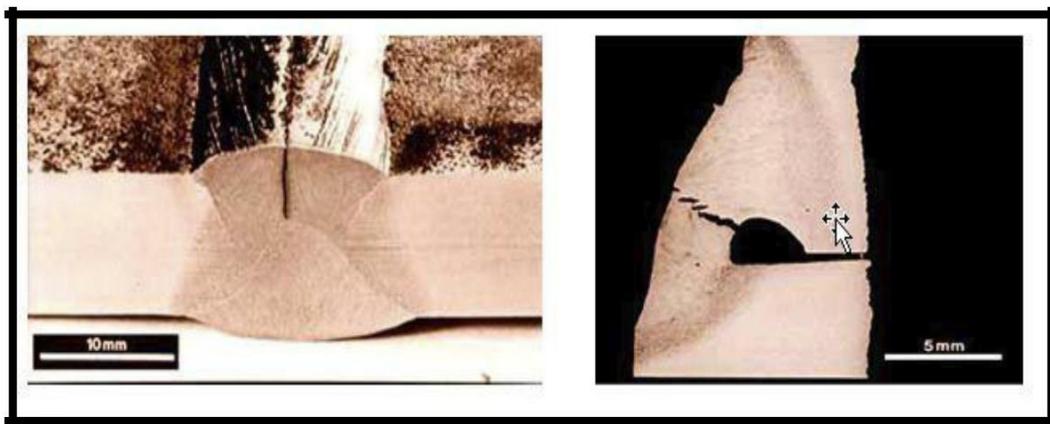


Figure II.9: Fissure à chaud (ou de solidification).

II.4.2 Causes possibles

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

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

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

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

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

II.4.3 Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes: examen par ultrasons ou radiographie.

II.4.4 Méthode de réparation

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

II.4.5 Mesures préventives

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur - largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base est limitée à 0,05 % pour les deux éléments.
- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important.

II.5 Fissures à froid (fissures d'hydrogène)

II.5.1 Définition

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage (Fig.II.10) [14].

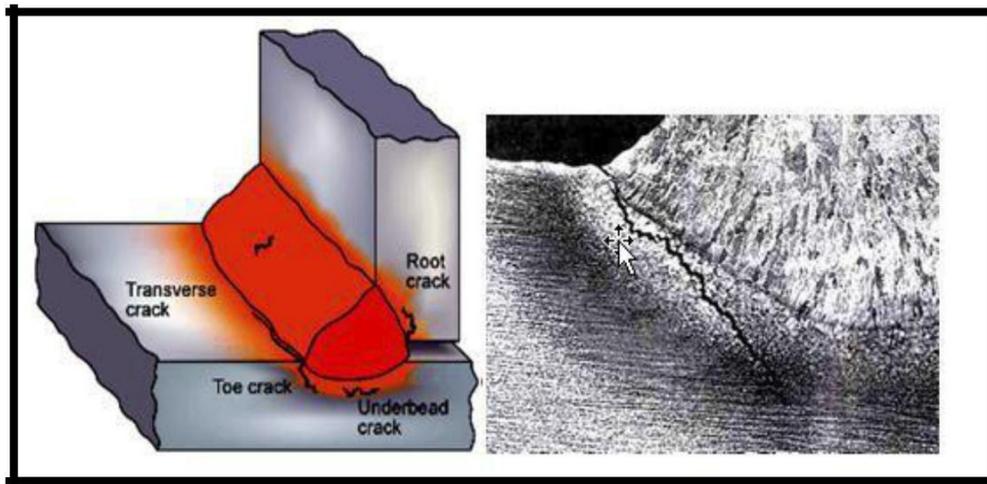


Figure II.10 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

II.5.2 Causes possibles

- La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une structure de trempe et qui est donc fissurant.
- Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans le MB ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.
- La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur.
- De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments.

II.5.3 Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

II.5.4 Méthode de réparation

Éliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage. Chaque réparation doit être exécutée ici par un préchauffage correct et doit être exécutée avec l'apport calorifique correct lors du soudage, afin d'éviter une nouvelle fissuration.

II.5.5 Mesures préventives

Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène (il faut suffisamment sécher les électrodes avant le soudage surtout celles avec enrobage basique).

S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.

Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement.

II.6 Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire)

II.6.1 Introduction

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

Nous décrirons ici, les traits caractéristiques, les principales causes, ainsi que les bonnes pratiques pour minimiser le risque d'arrachement lamellaire [13].

II.6.2 Identification

II.6.2.1 Aspect Visuel

Le principal trait caractéristique de l'arrachement lamellaire est qu'il se produit dans les soudures en T et en angle et qu'il se situe dans le métal de base parallèlement à la ligne de fusion de la soudure et de la surface de la tôle (Fig.II.11). Les fissures peuvent apparaître au bord de la pénétration de la soudure mais sont toujours associées avec des points de grande concentration de contraintes.

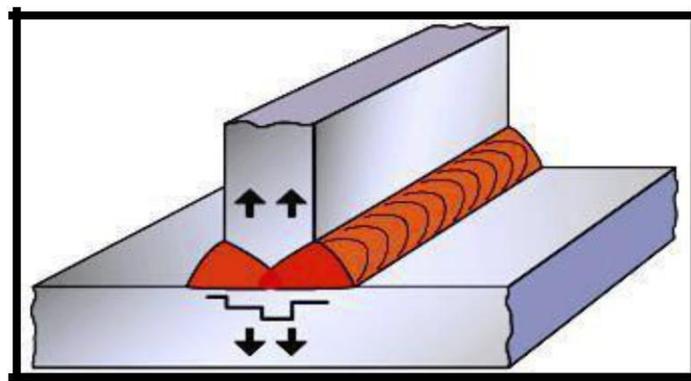


Figure II.11 : Arrachement lamellaire dans un joint en T.

II.7 Fissures de réchauffages (Reheat cracking)

II.7.1 Définition

Forme de fissure qui apparaît dans des aciers au Va ou Mo qui, dans le cas d'une teneur suffisamment élevée, provoquent une trempe importante dans la zone affectée thermiquement et par la suite une ductilité au fluage basée aux joints des grains dans cette zone affectée thermiquement, d'où apparition de fissures lors du fonctionnement à température élevée (Fig.II.12).

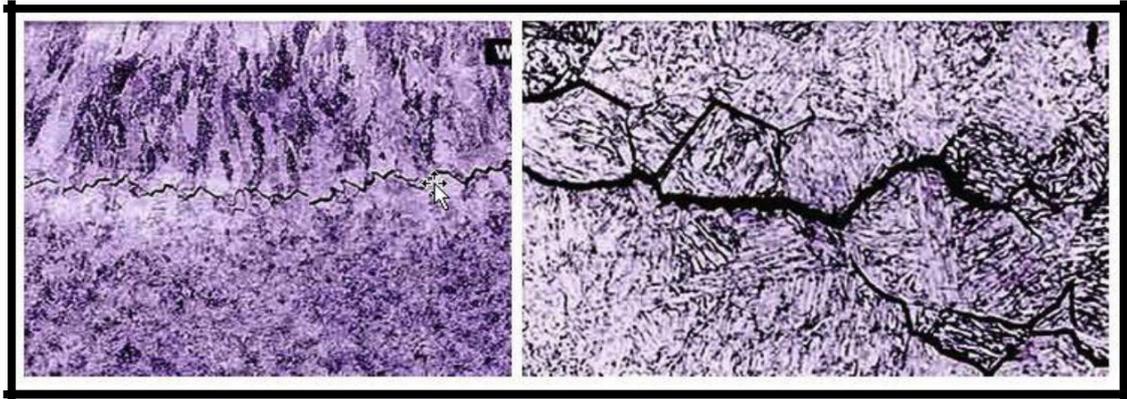


Figure II.12 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).

II.7.2 Causes possibles

Des facteurs contribuant sont :

- impuretés dans l'acier (As, Sn,.....).
- effets d'entaille.
- manque de pénétration.
- manque de fusion à la racine de la soudure.

II.7.3 Méthodes de détection

- à la surface : examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- à l'intérieur : examen par ultrasons.

II.8 Manque de fusion

II.8.1 Localisations possibles des manques de fusion

Des manques de fusion peuvent apparaître (FigII.13) :

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

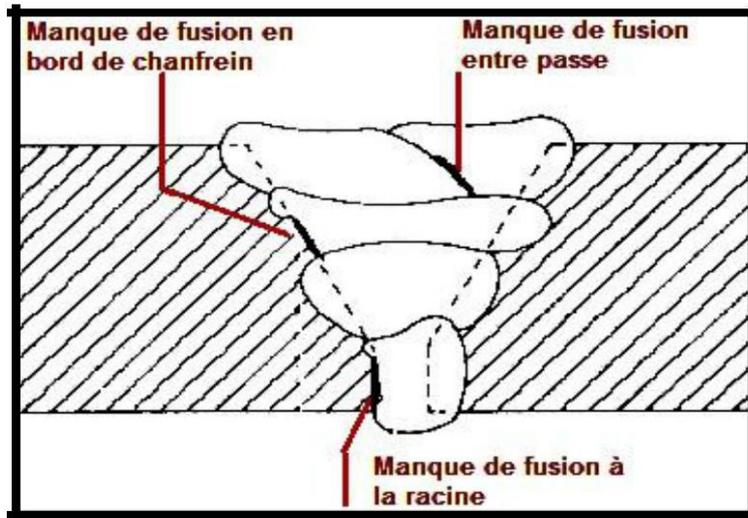


Figure II.13 : Localisations possibles des manques de fusion.

II.8.2 Manque de fusion dans le flanc de la soudure

II.8.2.1 Définition

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (FigII.14).

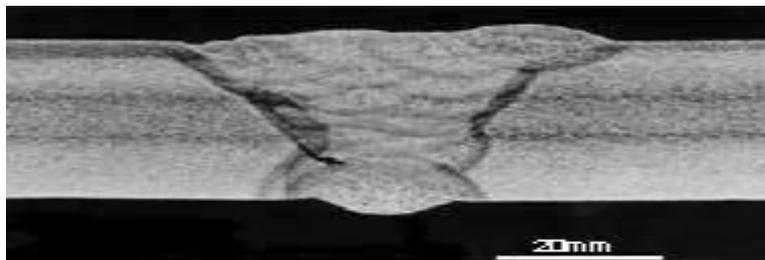


Figure II.14 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

II.8.2.2 Causes possibles

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

II.8.2.3 Méthodes de détection

Surtout examen par « Ultrasons » (difficilement détectable par radiographie).

II.8.3 Manque de fusion entre passes

II.8.3.1 Définition

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (FigII.15).

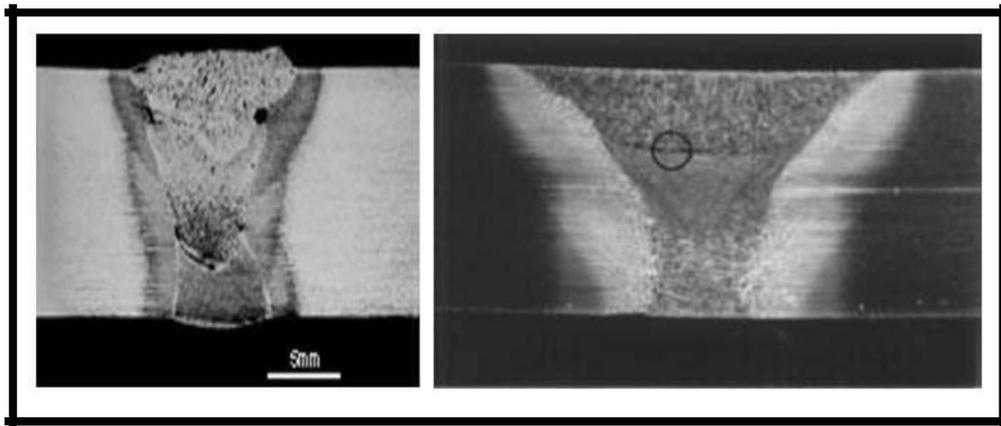


Figure II.15: Manque de fusion entre passes.

II.8.3.2 Causes possibles

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

II.8.3.3 Méthodes de détection

Surtout examen par « Ultrasons » (difficilement détectable par radiographie).

II.8.4 Manque de fusion à la racine de la soudure

II.8.4.1 Définition

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure.

Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration (Fig.25).

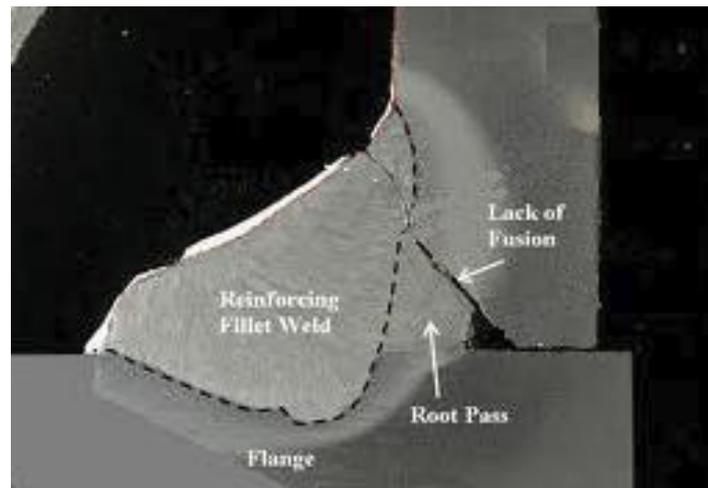


Figure II.16 : Manque de fusion à la racine de la soudure.

II.8.4.2 Causes possibles

- Energie de l'arc trop faible.
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Mauvais angle de l'électrode.
- Métal d'apport qui coule devant l'arc à la suite de la position de soudage.
- Inductance trop importante en soudage MAG.
- Bords à souder mal nettoyés.
- Ecartement trop faible.
- Méplat trop important lors de la préparation.
- Diamètre de l'électrode trop important dans le soudage à l'arc électrique.

II.8.4.3 Méthodes de détection

Surtout examen par « Ultrasons » (difficilement détectable par radiographie).

Si la soudure peut être contrôlée à revers: examen visuel, magnétique ou par ressuage.

II.9 Manque de pénétration

II.9.1 Localisations possibles des manques de pénétration

Le manque de pénétration peut être localisé (FigII.17)

II.9.1.1 A la racine de la soudure (soudure en « V ») :

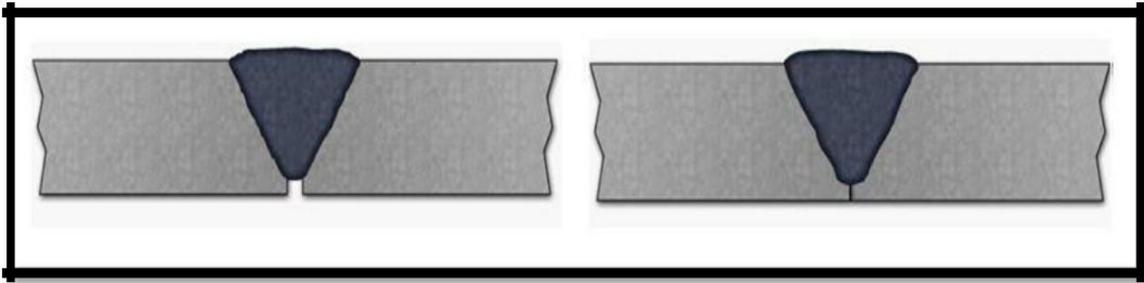


Figure II.17 : Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure.

II.9.1.2 A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X »)

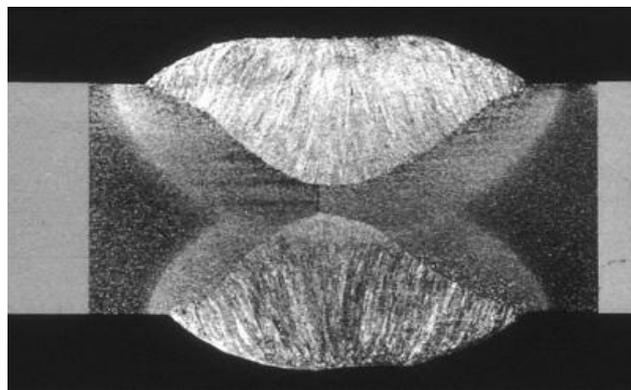


Figure II.18 : Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur de la soudure.

II.9.2 Manque de pénétration à la racine

II.9.2.1 Définition

Le métal d'apport n'atteint pas la racine du chanfrein.

II.9.2.2 Causes possibles

Ecartement trop faible.

Méplat trop grand.

Soudage vertical descendant tandis que vertical montant spécifié pour obtenir une pénétration complète.

- Apport calorifique trop faible.
- Vitesse de soudage trop grand.

- Diamètre d'électrode fautif dans le soudage électrique manuel.
- Inductance trop importante dans le soudage MAG.
- Laitier qui coule devant le bain de soudage.

II.9.2.3 Méthodes de détection

Défaut débouchant en surface; examen visuel, magnétique ou ressuage.

Défaut interne: examen par ultrasons ou radiographie.

II.9.3 Manque de pénétration dans la soudure

II.9.3.1 Définition

Le métal d'apport n'atteint pas le milieu du chanfrein en X (FigII.19)

- Talon trop grand
- Ecartement trop faible
- Soudage désaxé
- Courant trop faible



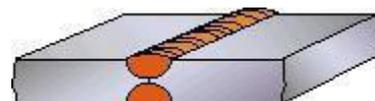
a). Talon trop grand



b). Ecartement trop faible



c). Soudage désaxé



d). Courant trop faible

Figure II.19 : Manque de pénétration dans la soudure.

II.9.3.2 Causes possibles

- Ecartement trop faible.
- Méplat trop grand.
- Soudage vertical descendant tandis que vertical montant spécifié pour obtenir une pénétration complète.
- Apport calorifique trop faible.
- Vitesse de soudage trop grand.

- Diamètre d'électrode fautif dans le soudage électrique manuel.
- Inductance trop importante dans le soudage MAG.
- Laitier qui coule devant le bain de soudage.

II.9.3.3 Méthodes de détection

Examen par ultrasons ou radiographie.

II.9.4 Inclusion gazeuses

II.9.4.1 Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes (Fig. II.20.21.22) :

- Porosités vermiculaires.
- Porosités de reprise.
- Porosités uniformes.

II.9.4.2 Porosités vermiculaires

II.9.4.2.1 Définition

Cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon. Elles peuvent se présenter isolées ou groupées (elles ont souvent une forme caractéristique d'arrête de poisson suivant les séquences de solidification des dendrites) (FigII.20.)

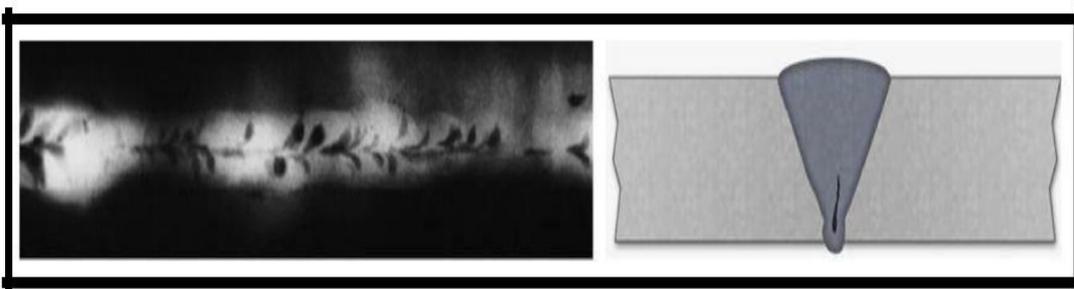


Figure II.20 : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.

II.9.4.2.2 Causes possibles

- Contamination de la surface à souder.
- Ouvertures, telles que l'ouverture entre une tôle verticale et horizontale qui sont assemblées par une double soudure d'angle.

- Doublures dans les tôles, si elles débouchent en surface.

II.9.4.2.3 Méthodes de détection

A la surface : examen visuel

A l'intérieur : radiographie et ultrasons.

II.9.5 Porosités de reprise

II.9.5.1 Définition

Porosités limitées à une petite partie du cordon et qui apparaissent lors d'un soudage électrique manuel ou automatique lors de l'amorce d'une passe (Fig II.21[14]).

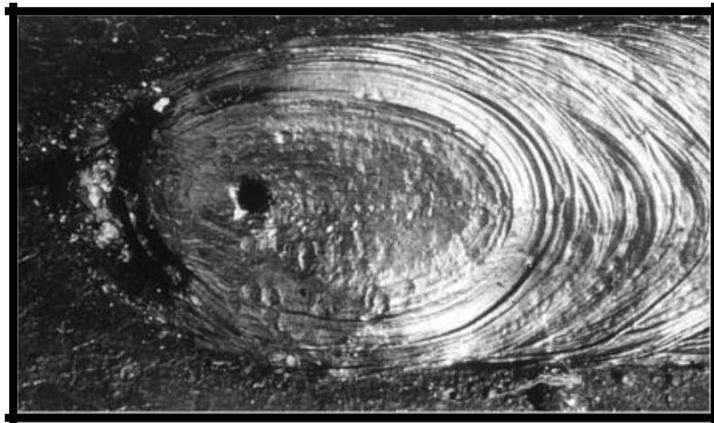


Figure II.21 : Inclusions gazeuses porosités de reprise.

II.9.5.2 Causes possibles

Délai dans le début des réactions de protection lors de l'amorce d'une passe.

Mauvaise amorce de l'arc par le soudeur dans le soudage manuel.

II.9.5.3 Méthodes de détection

A la surface: examen visuel.

A l'intérieur: radiographie ou ultrasons.

II.9.5.4 Porosités uniformes

II.9.5.4.1 Définition

Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon (FigII.22)

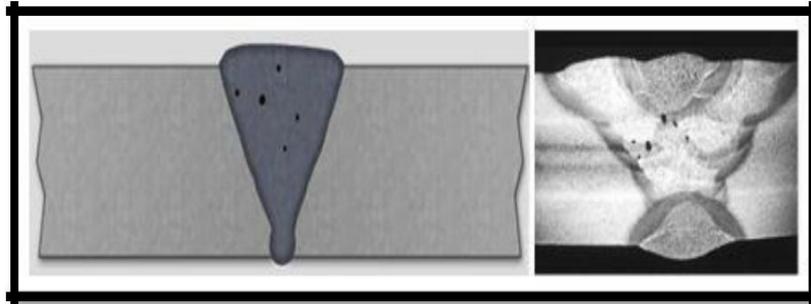


Figure II.22: Inclusions gazeuses porosités uniformes.

II.9.5.4.2 Causes possibles

- Electrodes ou baguettes de soudage corrodées.
- De l'air dans le gaz de protection.
- De l'huile ou des hydrocarbures (par ex. suite au nettoyage).
- Manque de débit des gaz de protection.
- Des fuites d'eau dans des équipements de soudage refroidis à l'eau.
- Manque d'éléments désoxydants dans l'électrode ou la baguette.
- Humidité (de l'électrode ou de la pièce à souder).
- Courants d'air (par ex. lors du soudage de tuyauteries en plein air).

II.9.5.4.3 Méthodes de détection

A la surface: examen visuel, magnétique ou par ressuage.

A l'intérieur: radiographie ou ultrasons.

II.9.6 Inclusions de laitier

II.9.6.1 Définition

Du laitier qui a été enfermé dans le cordon de soudure (FigII.23). Ces inclusions peuvent avoir deux aspects:

- Un aspect linéaire: les inclusions sont alors groupées en parallèle à l'axe du cordon.
- Un aspect quelconque: elles sont alors isolées.

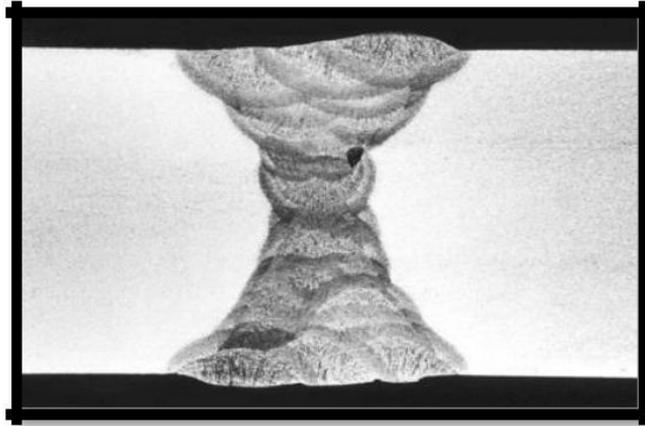


Figure II.23 : Inclusions de laitier.

II.9.6.2 Causes possibles

- Manque de contrôle sur le laitier (par ex. le laitier qui coule devant le bain de fusion à cause de la position de soudage.
- Manque d'élimination du laitier entre passes d'une soudure multi-passes.

II.9.6.3 Méthodes de détection

Ultrasons et radiographie.

II.9.7 Inclusions de tungstène

II.9.7.1 Définition

Parties fusionnées de l'électrode en tungstène qui est utilisée dans le procédé TIG (US= GTAW) (FigII.24).

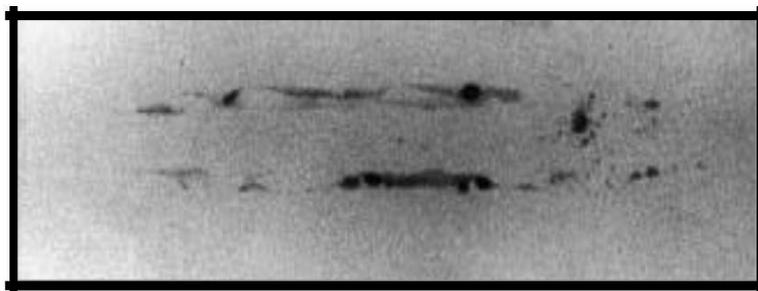


Figure II.24 : Inclusions de tungstène.

II.9.7.2 Causes possibles

- -Electrode trop pointue.
- -Intensité de courant trop élevée.
- -Débit de gaz de protection trop faible.

- -Coupure trop rapide du gaz de protection à la fin du soudage.

II.9.7.3 Méthodes de détection

Surtout radiographie où les inclusions de tungstène forment des taches très blanches sur le film (le tungstène absorbe très fort les rayonnements).

II.9.8 Inclusions de cuivre

II.9.8.1 Définition

Une inclusion accidentelle de cuivre dans le bain de fusion qui peut provoquer des fissures dans la zone de soudage (FigII25).

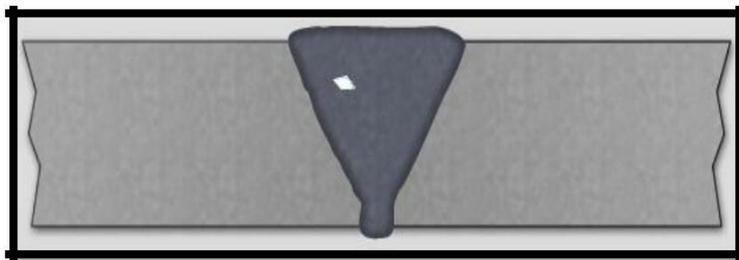


Figure II.25: Inclusions de cuivre.

II.9.8.2 Causes possibles

- Fusion de points de contact lors du soudage MIG à la suite d'un arc instable.
- Perte de refroidissement à l'eau provoquant la fusion de certaines parties de la torche.

II.9 Excès de matière

II.9.1 Généralités

Un excès de matière peut se présenter la racine du cordon (excès de pénétration) ou à la surface (surépaisseur) éventuellement accompagné de recouvrements du métal de base non fusionnés (FigII.26).

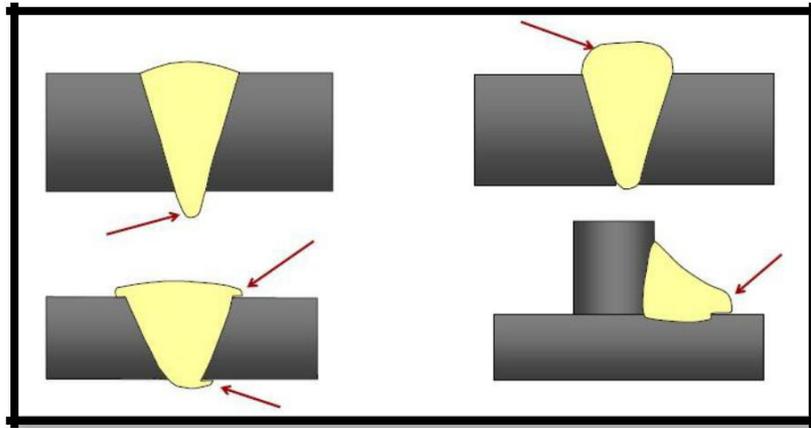


Figure II.26 : Excès de matière.

II.9.2 Excès de pénétration

II.9.2.1. Définition

Pénétration excessive du métal d'apport à la racine du cordon (FigII.27).

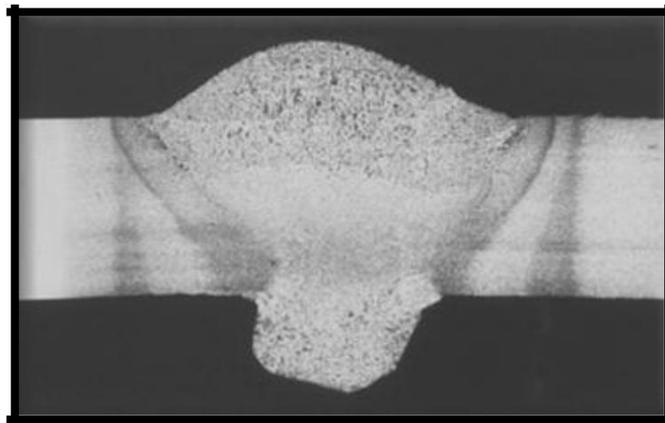


Figure II.27 : Excès de pénétration.

II.9.2.2 Causes possibles

- Ecartement trop important.
- Jeu entre l'anneau-support et le métal de base lors du soudage sur anneau-support.
- Apport énergétique trop important.
- Vitesse de soudage trop faible.

- Manque d'expérience du soudeur [15].

II.9.2.3 Méthodes de détection

Contrôle visuel, éventuellement radiographie si la racine est inaccessible (soudures Du tuyauteries).

II.9.3 Surépaisseur

II.9.3.1 Définition

Un apport excessif de métal qui cause, de la convexité dans les soudures d'angle, et des épaisseurs supérieures à celles du métal de base pour les soudures bout à bout (FigII.28).

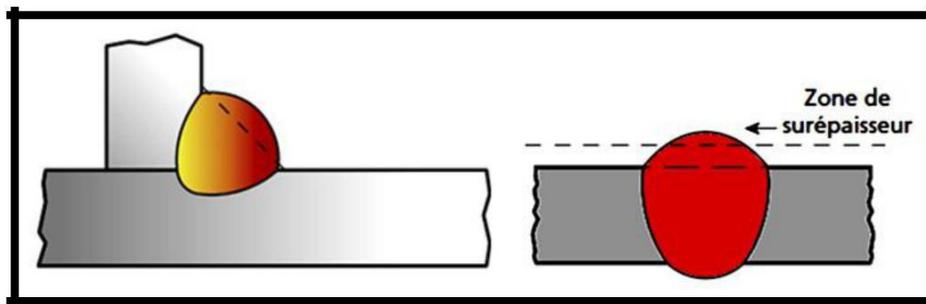


Figure II.28 : Convexité excessive & Surépaisseur excessive.

II.9.3.2 Causes possibles

- Energie de l'arc trop importante surtout pour le soudage MIG, MAC et sous flux.
- Mauvais choix des diamètres des électrodes dans des soudures multi-passes.
- De mauvaises manipulations de l'électrode.

II.9.3.3 Méthodes de détection

Examen visuel avec un calibre de soudage.

II.10 Recouvrements non fusionnés (Débordements)

II.10.1 Définition

L'écoulement d'un excès de métal d'apport sur la surface du métal de base, soit a la racine de l'a soudure, soit a la surface supérieure sans fusion avec ce métal de base (FigII.29).

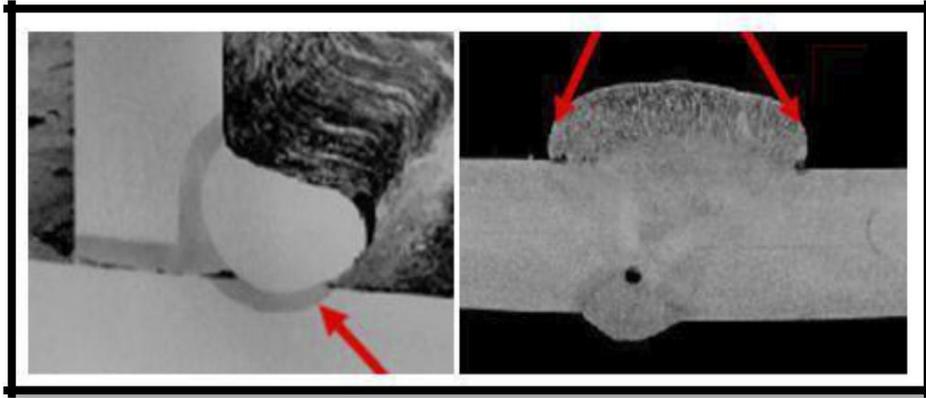


Figure II.29: Recouvrements non fusionnés (Débordements).

II.10.2 Causes possibles

- Mauvaise manipulation de l'électrode lors du soudage manuel (balancement excessif), surtout en soudage vertical.
- Apport énergétique trop faible.
- Vitesse de soudage trop faible avec un apport énergétique trop important.
- Mauvaise position de soudage.

II.10.3 Méthodes de détection

Examen visuel complété d'un examen par ressuage.

II.11 Dénivellement

II.11.1 Définition

Un alignement incorrect des bords à souder dans une soudure bout à bout. Ceci mène à des contraintes locales qui peuvent surtout être nocives en sollicitations cycliques (fatigue) (FigII.30).

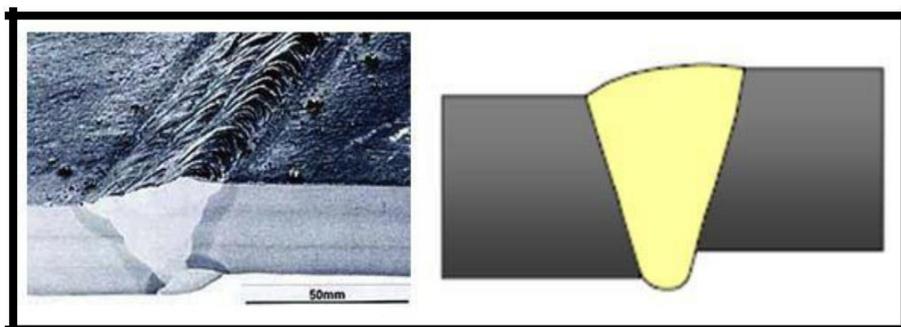


Figure II.30 : Dénivellement.

II.11.2. Causes possibles

- -Déformations par d'autres soudures.
- -Ovalisations trop importantes dans des tôles formées (cordons circulaires).

II.11.3 Méthodes de détection

Inspection visuelle avec calibre de soudage avant soudage.

II.12 Cratère

II.12.1 Définition

Une dépression de retrait a la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée (FigII.31).

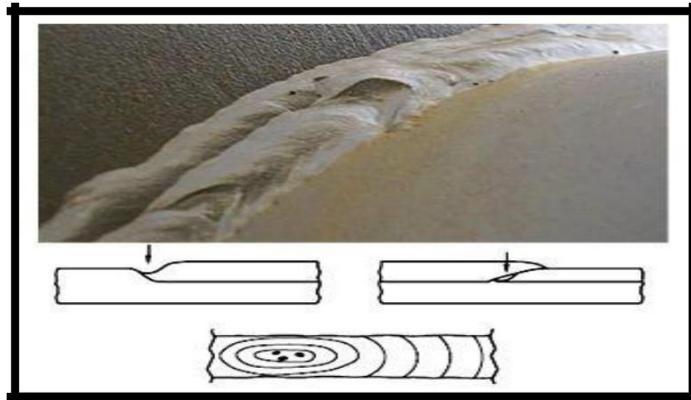


Figure II.31: Cratère.

II.12.2 Causes possibles

Ce défaut est provoqué par une combinaison de l'interruption des réactions de désoxydation et du changement de volume lors de la solidification du dépôt[15].

II.12.3 Méthodes de détection

Inspection visuelle un examen interne complémentaire par ex. par radiographie démontrera presque toujours des porosités associées.

II.13 Défauts de surface

II.13.1 Morsures/Caniveaux

II.13.1.1 Définition

Un creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base (FigII.32).

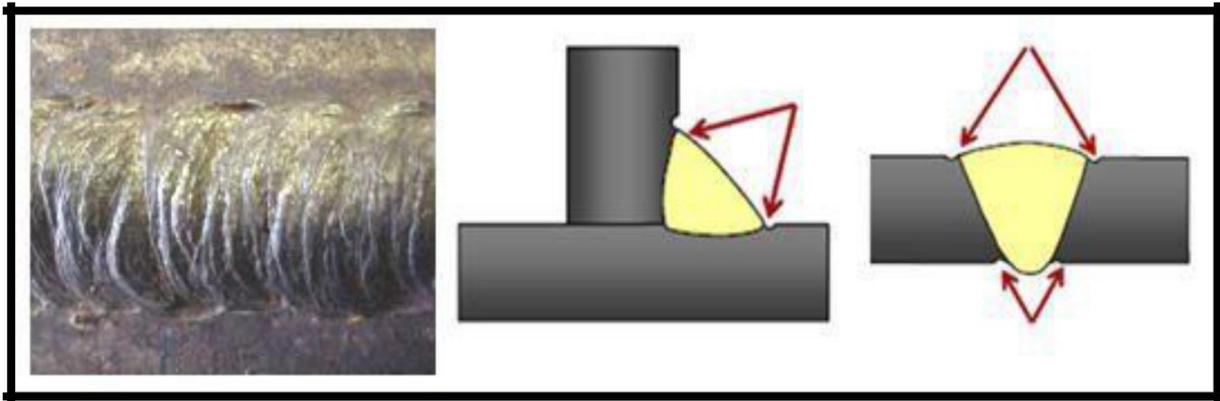


Figure II.32: Défauts de surface (Morsures/Caniveaux).

II.13.1.2 Causes possibles

- -La fusion du bord supérieur une soudure d'angle ou d'une soudure bout-à-bout par une intensité trop forte.
- -Le dépôt d'un cordon d'angle avec en section transversale une longueur de coté supérieure à 9mm.
- -Un balancement trop fort de l'électrode (surtout en position verticale).
- -Vitesse de soudage trop basse.
- -Gaz de protection fautif (MIG/TIG).
- -Angle de l'électrode fautif, surtout lors du soudage d'une pièce plus mince à une pièce plus épaisse.

II.13.1.3 Méthodes de détection

Visuel (mesure de la profondeur avec un calibre de soudage).

II.14 Effondrement à la racine

II.14.1 Définition

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (FigII.33).

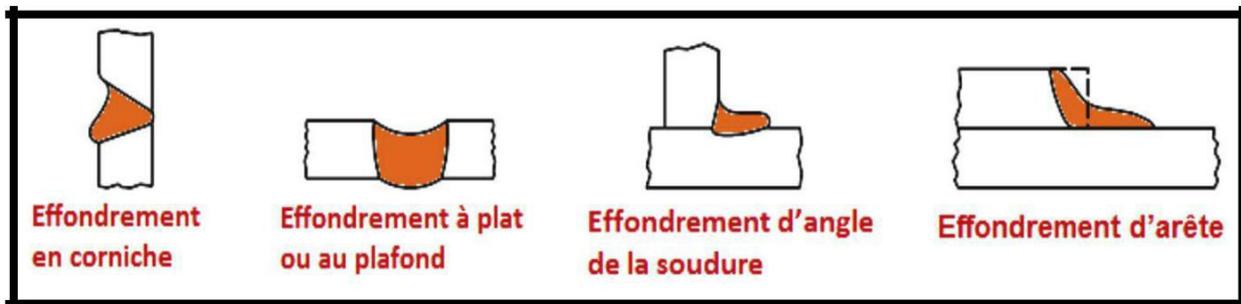


Figure II.33 : Effondrement à la racine.

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou ou perçage.

Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort (FigII.34).

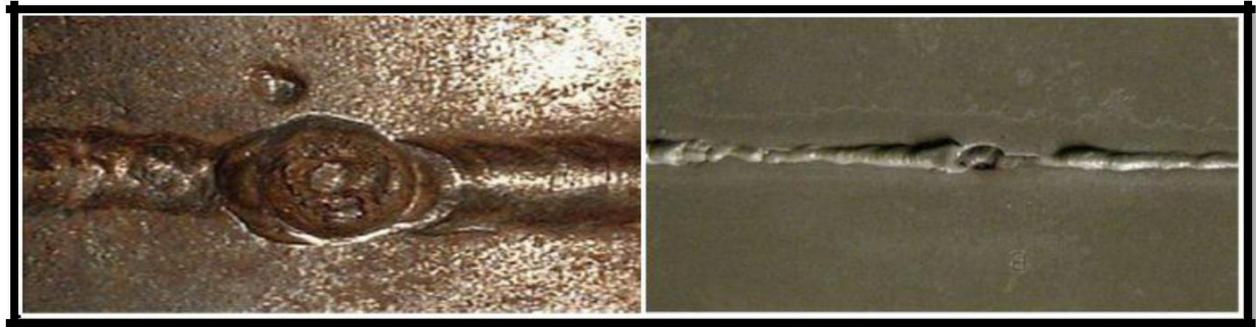


Figure II.34 : Effondrement.

II.14.2 Causes possibles

- -Vitesse de soudage trop lente
- -Chaleur trop élevée.

II.14.3 Méthodes de détection

Inspection visuelle.

II.15 Amorces d'arc

II.15.1 Définition

Des points de métal fondu où l'électrode, la pince d'électrode ou la masse ont touché par hasard le métal de base et ont provoqué un arc de courte durée (FigII.35).

Ceci peut créer localement une structure de trempe qui peut être à la base de fissures.



Figure II.35 : Amorces d'arc.

II.15.2 Causes possibles

- Accès difficile à la zone de soudage.
- Isolation de la pince d'électrode dégradée.
- Borne de masse mal fixée.

II.15.3 Méthodes de détection

Examen visuel -éventuellement examen magnétique ou par ressuage pour rechercher les fissures.

II.16 Projections sur le métal de base

II.16.1 Définition

De petites gouttes du matériau d'électrode qui ont été projetées sur le métal de base et qui sont fusionnées avec ce métal (FigII 36).



Figure II.36 : Projections sur le métal de base.

II.16.2 Causes possibles

Tous les procédés de soudage avec électrode fusible à arc ouvert produisent une certaine quantité de projections (par ex. soudage manuel à l'électrode avec enrobage cellulosique), mais si la densité des projections est trop importante, les causes spécifiques peuvent être :

- Apport d'énergie trop élevé.
- Longueur de l'arc trop important.
- Produits de soudage contaminés

II.16.3 Méthodes de détection

Examen visuel.

II.16.4 Défaut d'aspect

Une pauvre technique de soudage est la cause habituelle de ces imperfections, telles que:

- Dimension de l'électrode pour la passe de finition trop grande.
- Vitesse de soudage trop lente.
- Courant de soudage trop faible.
- Tension d'arc trop basse (SAW et GMAW).
- Une mauvaise manipulation de l'électrode.

- Un positionnement/placement incorrect du cordon de soudure.



Figure II.37 : Défaut d'aspect.

II.17 Métal de base (Inspection des défauts)

II.17.1 Inspection des matériaux

Tous les matériaux arrivant sur site devraient être inspectés pour:

- Taille / Dimensions.
- Condition.
- Type / Spécification.

De plus d'autres éléments peuvent nécessiter considération en fonction du matériau et/ou de sa forme.

II.17.2 Inspection des tubes

Condition

(Corrosion, Dommages mécaniques, Épaisseur, Ovalisation, Doublures & Soudure) (Fig II.38).

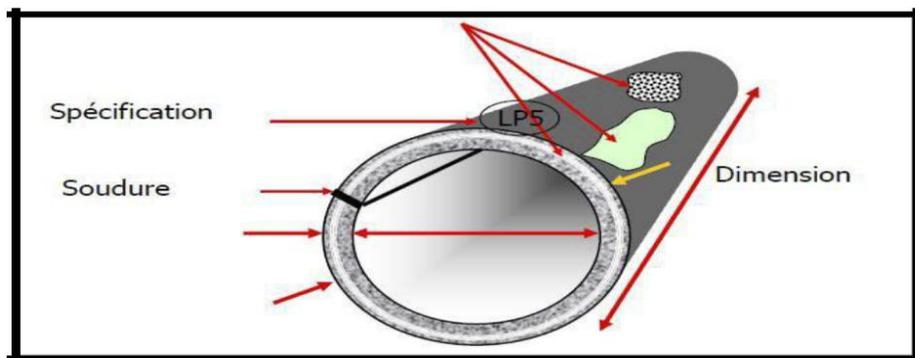


Figure II.38 : Métal de base (Inspection à défauts).

D'autres contrôles peuvent avoir besoin d'être faits telles que: tolérance de distorsion, nombre de tubes et conditions de stockage.

II.17.3 Inspection des tôles

Condition :

(Corrosion, Dommages mécaniques, Pliure, Bourrelets & Délaminage) (FigII.39).

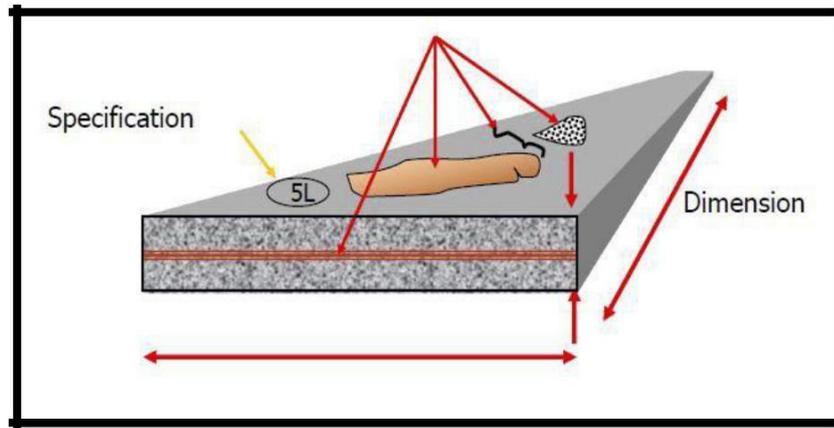


Figure II.39 : Inspection de tôles.

II.18 Imperfections du métal de base

II.18.1 Doublures

Sont causées dans le matériau de base lors processus de fabrication de l'acier et ont pour origine les défauts de coulées en lingotière.

II.18.2 Bandes de Ségrégation

Se produisent dans le centre de la tôle et sont constitués d'impuretés à point de fusion bas tels que le soufre et le phosphore.

II.18.3 Pliure

Sont causées durant le laminage lorsque le métal de chevauchement ne fusionne pas avec le matériau de base (FigII.40).

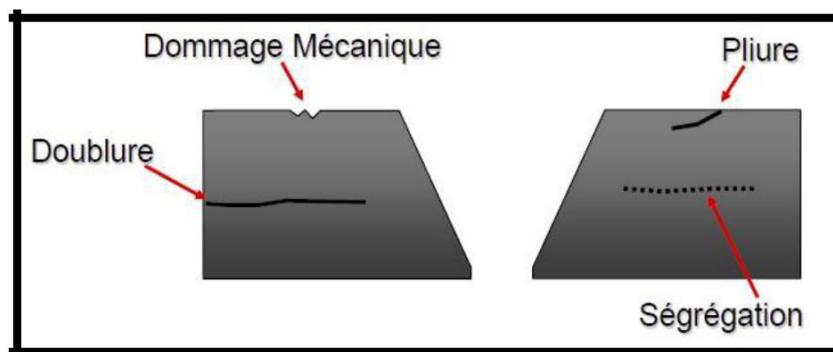


Figure II.40 : Imperfections du métal de base.

II.18.4 Repliure

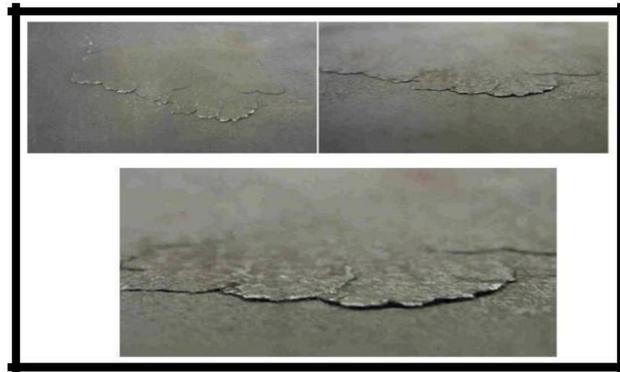


Figure. II.41 : Repliure.

Doublure de laminage :



Figure II.42 : Doublure de laminage.

II.19 Dommages Mécaniques

Les dommages mécaniques peuvent être définis comme tout dommage de la surface du matériau durant le processus de fabrication/construction (FigII.43).

- Meulage.
- Martelage.
- Cisailage.
- Burinage.

Enlèvement des attaches temporaires (zones d'arrachements).

Utilisation de pistolets à aiguilles pour compresser les cordons de finition.

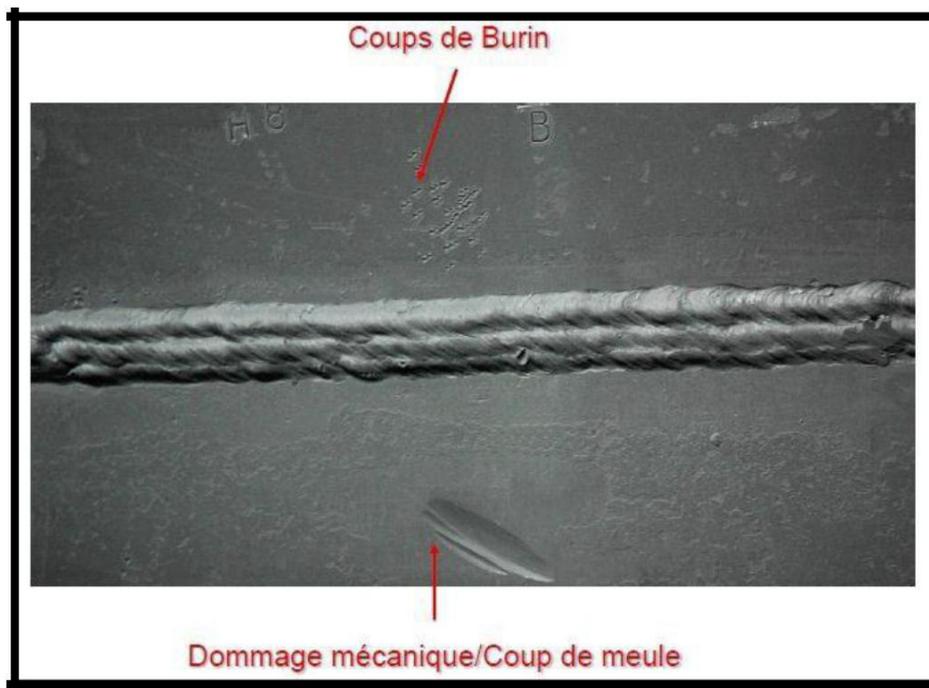


Figure II.43 : Dommages Mécaniques.

II.20 Conclusion partielle

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

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

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

Dans le prochain chapitre on va illustrer les différentes méthodes de détection des défauts de soudage (contrôle non destructif).

Chapitre III:

**Éléments sur les méthodes
de contrôle non destructif
(CND)**

III.1 Introduction

Le contrôle non destructif (CND) consiste à rechercher la présence éventuelle de défauts au sein des matériaux constituant les objets ou parties d'objets à tester par l'utilisation de techniques diverses, sans attenter à l'intégrité de ceux-ci.

Les contrôles non destructifs permettent, en respectant l'intégrité des objets :

- L'examen direct des pièces et la détection des défauts internes,
- Le suivi de l'évolution en service des défauts détectés.

La mise en œuvre d'un contrôle non destructif demande la connaissance :

- Des possibilités et limites des procédés utilisables,
- De l'histoire de la pièce (forme et mode de fabrication),
- Des défauts recherchés (nature, position, dimensions,...),
- Des propriétés physiques du matériau contrôlé.

Ces connaissances permettent de choisir :

- La méthode de contrôle la mieux adaptée,
- La procédure permettant :
 - D'observer les défauts recherchés avec le maximum de chances de détection,

De quantifier de façon la plus fidèle ces défauts

III.1.2 Définition

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** » [16].

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 [16].

III.1.3 Généralités sur le contrôle non destructif

Le contrôle non destructif (CND) consiste à rechercher la présence éventuelle de défauts au sein des matériaux constituant les objets ou parties d'objets à tester par l'utilisation de techniques diverses, sans attenter à l'intégrité de ceux-ci.

La mise en œuvre d'un contrôle non destructif demande la connaissance :

- Des possibilités et limites des procédés utilisables.
- De l'histoire de la pièce (forme et mode de fabrication).
- Des défauts recherchés (nature, position, dimensions,...).
- Des propriétés physiques du matériau contrôlé.

Ces connaissances permettent de choisir :

La méthode de contrôle la mieux adaptée.

La procédure permettant :

D'observer les défauts recherchés avec le maximum de chances de détection,

De quantifier de façon la plus fidèle ces défauts.

III.1.4 Mise en œuvre des contrôles non destructifs

La mise en œuvre correcte de contrôles non destructifs comporte trois volets :

- La qualification des opérateurs,
- Le choix des équipements,
- La définition des modes opératoires.

III.1.5 Principaux contrôles non destructifs

Les contrôles non destructifs peuvent se classer en trois catégories :

- Les méthodes dites de surface pour lesquelles l'anomalie est localisée, soit en surface, soit dans une zone proche de la surface (Examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les courants induits),
- Les méthodes dites volumiques pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce (Ultrasons, rayonnements ionisants),
- Les méthodes complémentaires (Etanchéité, thermographie, émission acoustique).

III.1.6 Principe de la détection d'un défaut

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

Mise en œuvre d'un processus physique énergétique (**excitation**);
perturbation); **révélation**);

III.2 Examen visuel

III.2.1 Principe du contrôle

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.

L'examen visuel direct des pièces peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en surface et surtout des **hétérogénéités locales et superficielles** (taches de différentes natures) constituant des défauts d'aspect rédhitoires pour des produits plats du types tôles, tissus, verre, etc. Toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures [17].

III.2.2 Mise en œuvre du contrôle

III.2.2.1 Eclairage

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, luminosité et longueur d'onde permettant à l'œil de travailler avec la meilleure acuité ; ainsi un éclairement de plus de 300 lux en lumière vert-jaune à 0,55 μm est optimal. 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.

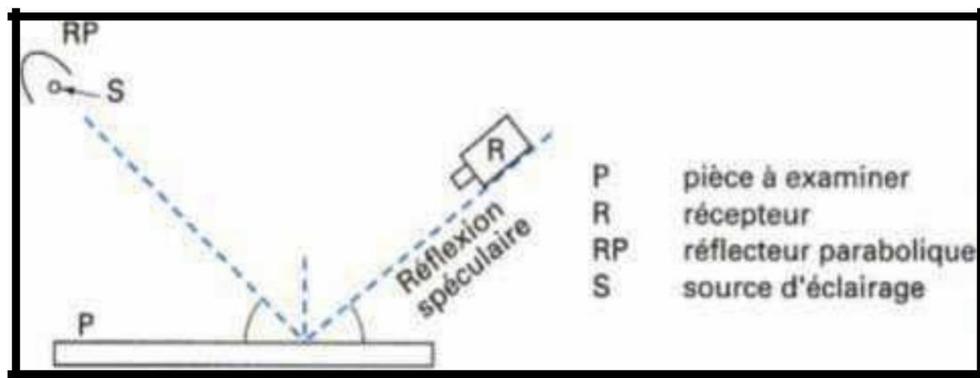


Figure III.1 : Examen par éclairage.

III.2.2.2 L'œil et ses limitations

L'œil est un capteur optique certes remarquable à bien des points de vue 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. 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.

III.2.2.3 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.

III.2.2.4 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.

III.2.2.5 Appareils optiques spécifiques

Des appareils optiques spécifiques ont été développés pour le CND.

- **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**.



Figur.III.2 : Endoscope

- **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.
- **Télévision**
- La télévision apporte une aide précieuse au contrôle visuel ; permettant une observation à distance, elle complète ou remplace les endoscopes ; couplée à des moyens de traitement et d'enregistrement des images vidéo, elle permet le contrôle optique automatique.
- Le matériel de télévision utilisé en contrôle non destructif est généralement spécifique, car les performances recherchées ne sont pas les mêmes que celles requises dans les applications plus banales de la télévision ; ainsi on se contentera d'une transmission par câble d'une image vidéo en noir et blanc, sans le son. Par contre, on recherchera une caméra robuste, miniaturisée, télécommandable à distance et surtout possédant des qualités optiques et une bande passante vidéo bien supérieure à celle du matériel courant.

III.3 Contrôle par ressuage

III.3.1 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 fissures débouchant, 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).

III.3.2 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 aboutissant 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).

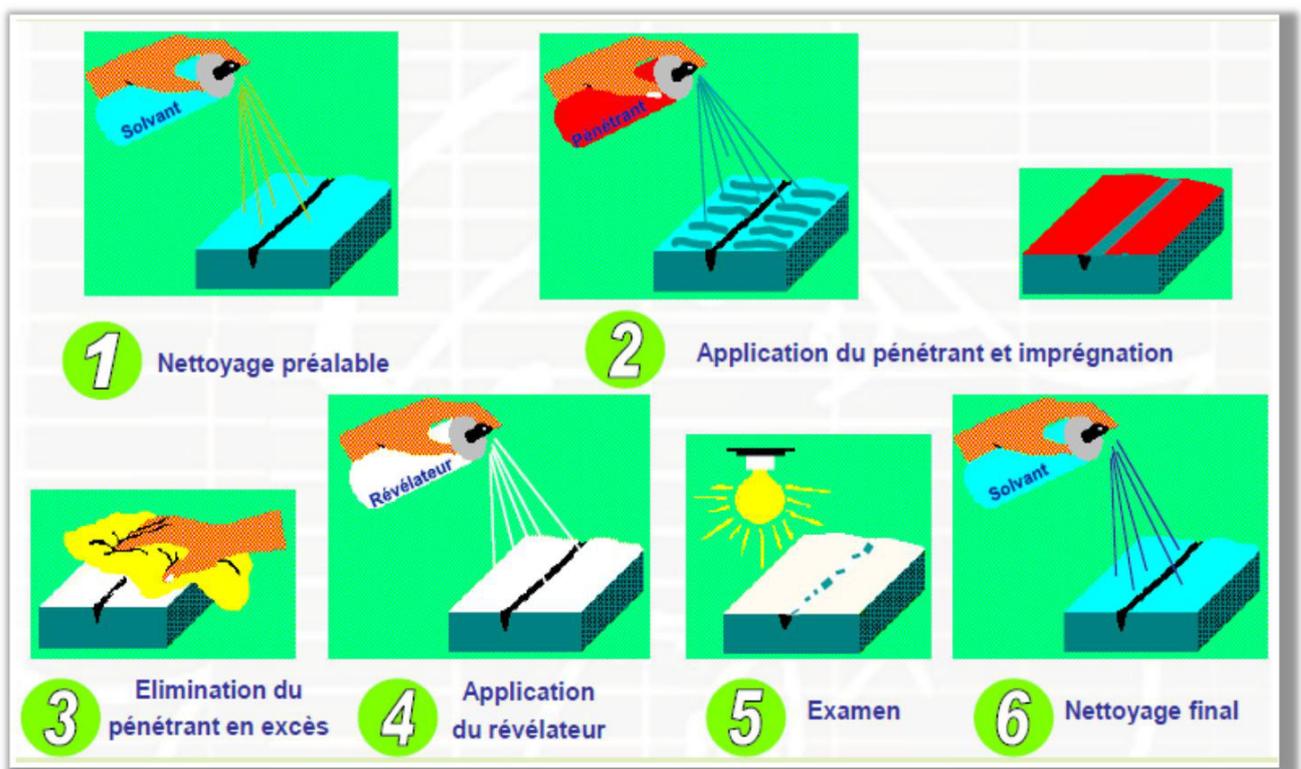


Figure III.3 : Contrôle par ressuage.

III.3.3 Méthode de contrôle

- **le dégraissage** : par solvants chlorés en phase vapeur, par alcalins ou encore au jet d'eau chaude, s'effectue dans des installations adaptées et est complété, si nécessaire, par une opération de séchage.
- **la déposition du pénétrant** : peut se faire par trois techniques correspondant bien
- **entendu à du matériel différent** : immersion dans une cuve adaptée à la taille des pièces ou des paniers de pièces, installation de pulvérisation électrostatique (technique très intéressante en particulier pour l'économie de produit qu'elle entraîne), installation de pulvérisation conventionnelle.
- **l'élimination de l'excès de pénétrant** : correspondant à un rinçage, qui peut se faire en cuve avec agitation d'eau par air comprimé, en cuve avec pulvérisation par rangées de buses ou en pulvérisation par pistolet air-eau ; on adjoint à l'équipement de rinçage une lampe à ultraviolets de façon à pouvoir contrôler l'efficacité de l'opération.
- **le séchage intermédiaire** : s'effectue en étuve à circulation d'air réglée entre 65 et 80 ° C
- **l'application du révélateur** : se fait dans une enceinte appropriée lorsqu'il s'agit d'un révélateur sec se présentant sous forme d'une poudre qu'il faut agiter, ou dans une cuve chauffée lorsqu'il s'agit d'un révélateur en suspension aqueuse.
- **le poste d'inspection visuelle** : doit être conçu pour répondre aux meilleures conditions d'observation en lumière blanche ou en fluorescence UV. Dans le premier cas, il faut réunir deux facteurs : un contraste maximum et un éclairage correct, les normes indiquant un minimum de 350 lux pour ce paramètre qui devra être vérifié avec un luxmètre. Pour l'examen sous rayonnement ultraviolet, le poste d'inspection doit être isolé de la lumière blanche ; il doit être très propre et exempt de surfaces réfléchissantes, moyennant quoi l'œil sera attiré par les petites sources de fluorescence pour lesquelles on choisit d'ailleurs la zone spectrale la plus appropriée, le jaune-vert à 555 nm. Le rayonnement UV d'excitation se situe vers 365 nm, raie intense de la décharge dans la vapeur de mercure. L'intensité des tubes luminescents UV à basse pression est insuffisante pour fournir la densité énergétique requise de 8 W/m² minimum (15 W/m² souhaitable) à la surface de la pièce. Il faut donc utiliser un projecteur à vapeur de mercure à haute intensité, muni d'un filtre incorporé à la source pour arrêter les UV courts et la lumière visible.

III.3.4 Procédure de contrôle

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

- Des conditions de préparation de la pièce,
- De la nature des produits de ressuage,

- Des conditions d'application du pénétrant,
- Des conditions de nettoyage,
- Des conditions d'application du révélateur,
- Des conditions d'examen.

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme à respecter. Le lecteur se reportera aux normes NF A 09-120, NF A 09-122, NF A 09-123, NF A 09-130.

III.4 Contrôle par magnétoscopie

III.4.1 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 permettent la détection des défauts superficiels débouchant ou non débouchant dans les matériaux ferromagnétiques (forgés, moulés, soudés, laminés).

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 ».

Le contrôle par magnétoscopie permet la détection de défauts superficiels débouchant ou sous-jacents dans les matériaux ferromagnétiques. C'est à dire aux matériaux qui sont soumis à un champ de 2 400 A/m, présentent une induction d'au moins 1 T.

Ils ne permettent pas de déterminer avec précision l'importance dimensionnelle du défaut, mais d'en définir la position et souvent la nature.

III.4.2 Principe de contrôle

La théorie des circuits magnétiques indique que la présence d'un entrefer correspond à un fort accroissement local de la réluctance du circuit et donc de la différence de potentiel magnétique (d.p.m.), constituant ainsi un obstacle au flux magnétique dont les lignes de force doivent alors

s'épanouir latéralement selon un flux de fuite comme l'indique la figure II.3. Cet effet de dispersion des lignes de flux s'exerce même pour un entrefer minime, dans la mesure où le rapport des ré reluctances entre l'entrefer et le circuit est inversement proportionnel à la perméabilité relative de celui-ci, Cet effet de dispersion d'un flux magnétique hors d'une pièce ferromagnétique, au endroit d'une fissure débouchant ou sous-cutanée (ou toute autre hétérogénéité non ferromagnétique se comportant comme un entrefer), est à la base d'une gamme de procédés magnétiques de détection des défauts de surface dans les aciers dont le plus connu et le plus employé est la magnétoscopie [18].

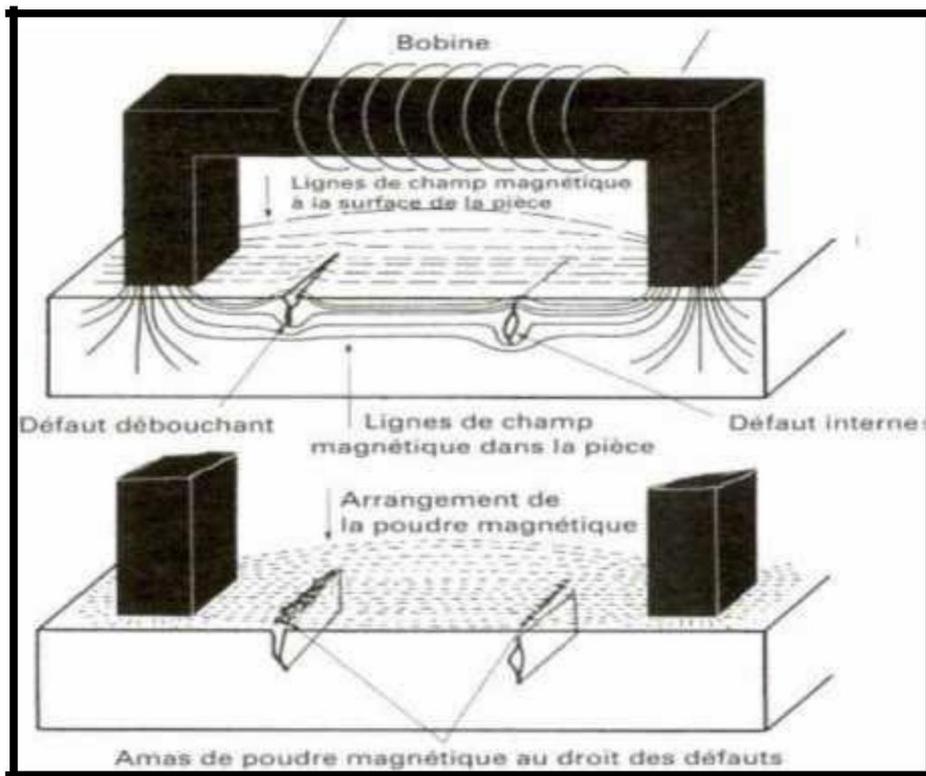


Figure III.4 : Contrôle par magnétoscopie.

III.4.3 Méthode de contrôle (Méthode de magnétisation)

La nature et l'orientation générale du champ magnétique vont dépendre de celles du courant électrique utilisé pour le produire soit par magnétisation directe à l'aide d'un électroaimant, soit par le passage du courant lui-même dans la pièce à contrôler (délivrante un champ circulaire). Un courant continu produira un champ magnétique continu favorable à la détection des défauts sous-cutanés. En pratique, on cherche à utiliser des générateurs économiques, et cela conduit à l'emploi de courants alternatifs redressés sur une ou deux alternances. L'utilisation d'un courant, donc d'un champ magnétique alternatif, est fréquente ; dans ce cas, la présence d'un effet de peau renforce le champ magnétique à la surface de la pièce et accroît, toutes choses égales par ailleurs, le pouvoir de détection des très fines fissures débouchantes. En magnétoscopie, on utilise la fréquence industrielle de 50 Hz, alors que certains procédés de flux de fuite utilisent des fréquences nettement plus élevées, de quelques milliers de hertz [18].

III.4.4 La nature du champ magnétique

Les formes de courants utilisés sont les suivantes :

- Monophasé sinusoïdal,
- Monophasé redressé une ou deux alternances,
- Triphasé redressé une ou deux alternances.

La forme d'onde agit sur la pénétration des courants (Effet de peau en courant alternatif). Plus on se rapproche du courant continu, plus la pénétration est importante.

III.4.5 L'intensité du champ magnétique

Une valeur trop importante provoque la saturation du matériau.

III.4.6 La direction du champ magnétique

On peut utiliser une magnétisation longitudinale, transversale ou oscillante de façon à s'adapter à l'orientation des défauts.

III.4.7 Défauts détectables

Les défauts détectables sont ceux qui introduisent suffisamment de perturbation dans le champ magnétique. Pour cela il faut prendre en compte.

➤ La géométrie du défaut

Les défauts doivent introduire une variation de section de passage suffisante.

➤ Sa position dans la pièce

Le défaut doit être proche de la surface. Plus il sera proche de la surface, plus l'indication donnée par le révélateur sera nette.

➤ Son orientation par rapport au champ magnétique

Seules les anomalies orientées presque perpendiculairement (Au moins 45° plus efficacement au dessus de 60°) aux flux seront décelables.

III.4.8 Produits révélateurs

Les caractéristiques de base de ces produits sont :

- Ils doivent pouvoir être facilement attirés par les fuites magnétiques.

- Ils doivent être suffisamment fins et légers pour ne pas nécessiter de grandes forces d'attraction.
- Ils doivent être suffisamment mobiles pour circuler sur toute la pièce.

Pour améliorer la visibilité, la poudre et la pièce pourront être colorées de façon à obtenir un contraste maximum suffisant. Des poudres à base de produits fluorescents sont utilisées pour un examen en "lumière noire" [18].

On distingue :

- **La voie sèche**

La poudre est appliquée au cours de la magnétisation par saupoudrage manuel ou mécanique ou soufflage. Après application on enlève l'excès de poudre par un léger soufflage.

- **La voie humide**

On utilise un porteur de poudre qui peut être un produit pétrolier ou de l'eau. Outre les

Propriétés de viscosité de ce liquide, la qualité du contrôle est conditionnée par la granulométrie et la concentration de la poudre.

La voie sèche permet des contrôles à des températures plus élevées et les indications apparaissent plus nettement tandis que la voie humide est d'usage plus facile et permet des images plus fines.

L'information donnée par l'image magnétique peut être conservée :

- Sous forme de clichés photographiques,
- Sous forme de prélèvements à l'aide de papiers adhésifs ou produits pelliculaires.

III.4.9 Démagnétisation

Le magnétisme résiduel, conservé par les pièces, peut présenter des inconvénients pour les phases ultérieures d'élaboration (usinage, soudage,...) ou pour l'utilisation (pièces mobiles,...).

Il convient dans ce cas de démagnétiser les pièces. Le principe consiste à soumettre la pièce à un champ magnétique dont on diminue très progressivement l'intensité en inversant à chaque fois son sens. On parcourt ainsi des cycles d'hystérésis de plus en plus petits.

Cette opération peut se faire avec l'appareil de magnétisation ou dans un tunnel.

III.4.10 Procédure de contrôle

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

- a) Des conditions de préparation de la pièce.
- b) Des conditions d'aimantation
- c) Des conditions d'application du révélateur
- d) Des conditions d'examen
- e) Des conditionnements des pièces après contrôle

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme à respecter.

Le lecteur se reportera aux normes NF A 09-125, NF A 04-121, NF A 09-130, NF A 09-170.

III.4.11 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 portent bien à l'automatisation.

III.4.12 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.

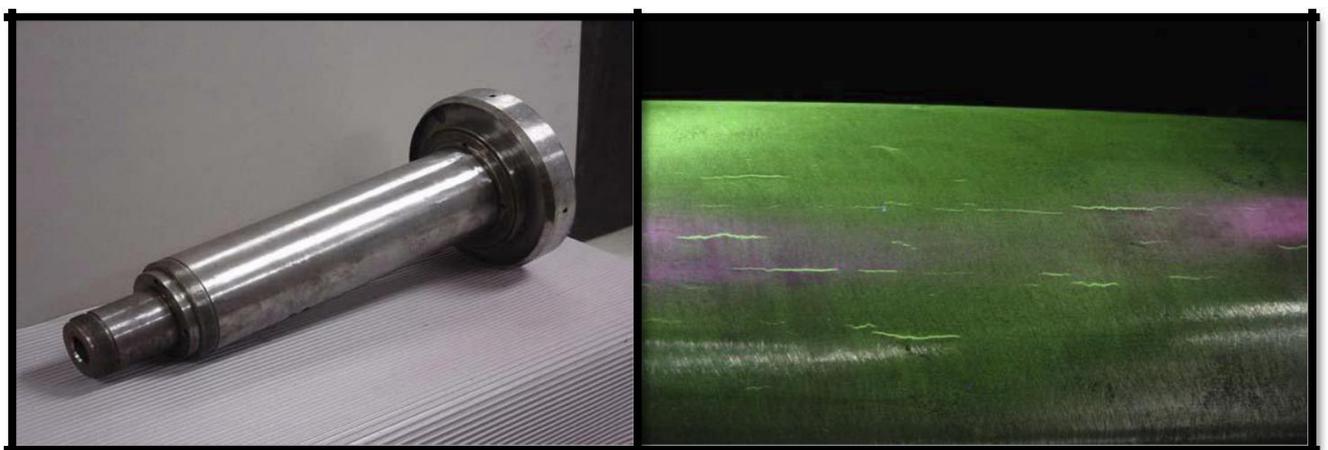


Figure III.5 : Fissuration induite par un traitement thermique.



Figure III.6 : Fissuration en service d'un crochet.

III.5 Contrôle par Ultrason

III.5.1 Introduction aux ondes ultrasons

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16 Hz à 16 KHz). Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui même et du type d'onde.

Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est tel qu'elles ne s'y propagent pratiquement pas.

Le phénomène initial du son ou d'un ultrason est toujours produit par un corps élastique animé de vibrations mécaniques dues par exemple à un choc (diapason), à une impulsion électrique (tonnerre) ou à un jet gazeux interrompu (sirène).

Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques. Elles ne se diffèrent entre eux que par leurs fréquences [20].

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage utilisée est comprise entre 10^5 Hz et $20 \cdot 10^6$ Hz.

0 à 16 Hz	16 Hz à $16 \cdot 10^3$ Hz	$16 \cdot 10^3$ Hz à $150 \cdot 10^6$ Hz	$150 \cdot 10^6$ Hz
Infrasons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

III.5.2 Émission et réception des ultrasons

L'émission doit se faire par impulsions pour que la réception puisse être effectuée entre deux impulsions. Pour cela un appareil à ultrason est utilisé, qui permet de visualiser sur un écran, le parcours des ultrasons entre deux impulsions successives. Les appareils à ultrason sont deux types principaux :

- **Appareils de chantier** : qui possèdent un faible encombrement, un faible poids et des possibilités réduite.
- **Appareils de laboratoire** : lourds, encombrement, complexes. Et qui permettent grâce à leur multiples de possibilités la mise au point de méthodes de recherches.

La chaîne de mesure qui englobe les différentes parties d'un appareil doit comporter :

III.5.3 Un élément d'excitation ou de commande

Pour fixer le déroulement du cycle de contrôle, à quel moment émettre et à quel moment écouter (recevoir et évaluer).

III.5.3.1 Un générateur d'impulsions

Il délivre l'impulsion grâce à laquelle le palpeur sera excité pour engendrer les oscillations mécaniques.

III.5.3.2 Un palpeur (ou des palpeurs)

Il transforme les impulsions électriques d'excitation en oscillations mécaniques (ultrasons) et, à l'inverse, les oscillations ultrasonores en impulsions électriques. Les palpeurs peuvent être au même temps émetteur-récepteur ou séparés.

III.5.3.3 Un amplificateur

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

III.5.3.4 Un tube cathodique (ou écran de visualisation)

Après le traitement du signal, les résultats sont affichés sur un écran d'un tube cathodique, les distances et les amplitudes des échos sont obtenues grâce à un balayage horizontal et vertical

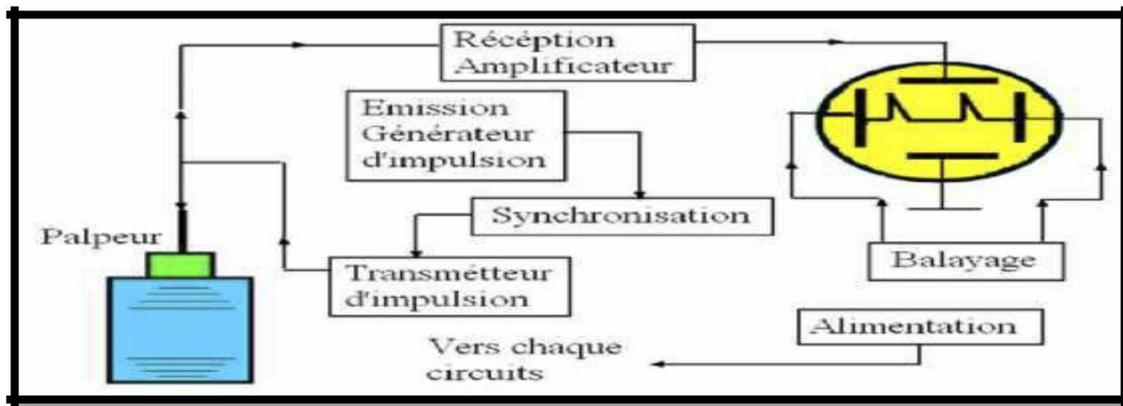


Figure III.7 : Chaines de mesure de contrôle par ultrason.

III.5.3.5 Technologie des palpeurs

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

Un palpeur est constitué principalement de quatre éléments [20] :

- **La pastille piézoélectrique :**

Le choix de la nature des pastilles piézoélectriques est déterminé par des critères des prix, de fragilité de sensibilité, de tension d'excitation, de coefficient de couplage piézoélectrique et de résistance à la température.

Actuellement les matériaux les plus utilisés pour réaliser industriellement les éléments sensibles sont à la base de zirconite-titanate de plomb et de titanate de baryum. On joint à ces deux matériaux de base des produits qui améliorent leur sensibilité.

- **L'amortisseur :**

L'amortisseur a pour but de supprimer la transmission, il permet d'obtenir un signal bref, son impédance acoustique étant égale à celle de la pastille, la vibration est très rapidement amortie (pas de réflexion sur la face arrière).

- **Les connections électriques :**

Les faces de l'élément sensible sont métallisées pour permettre un bon couplage électrique avec les fils de connexion à l'aide de soudure, colles conductrices, ressorts...

- **Le boîtier :**

Le boîtier permet une manipulation simple et des montages spécifiques, il protège la pastille, assure l'étanchéité et la résistance à l'usure.

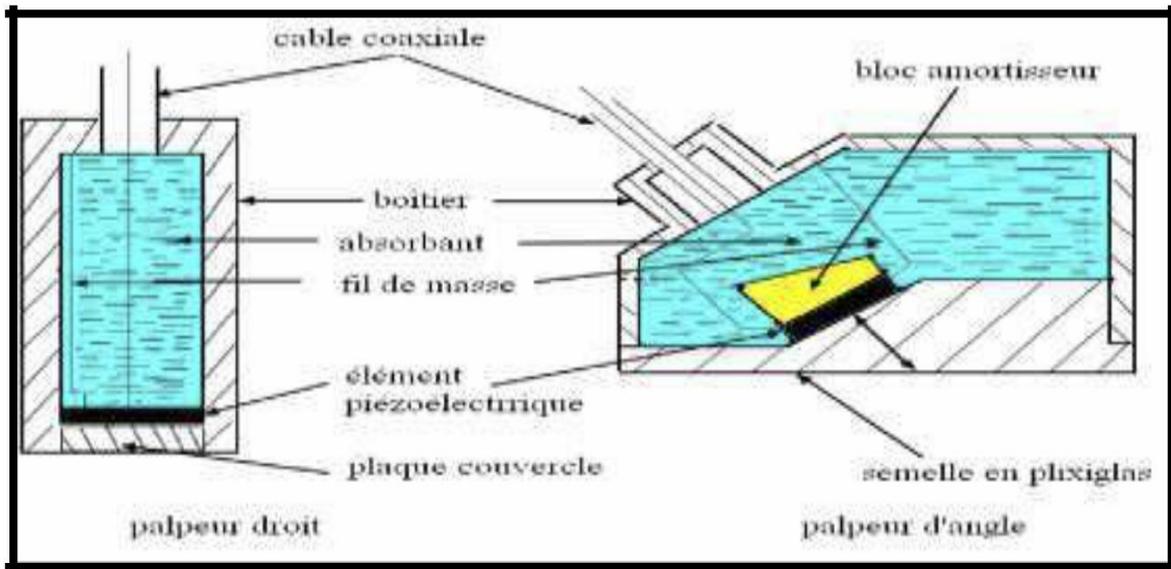


Figure III.8 : Élément des palpeurs.

III.5.3.6 Les type des palpeurs

L'utilisation des ultrasons pour le contrôle des pièces de formes complexes nécessite la conception de palpeurs parfaitement adaptés [19].

➤ Palpeurs droits ou normaux

Les palpeurs droits sont ceux qui émettent des ondes de compression (longitudinale) dont l'axe du faisceau est perpendiculaire à la surface d'émission. Ce sont les palpeurs les plus couramment utilisés, ils offrent une gamme étendue de fréquence, de diamètre et d'amortissement ; le prix est relativement peu élevé.

Ce type de palpeurs est utilisé dans les méthodes d'examen par réflexion en jouant successivement le rôle d'émetteur et de récepteur ou dans la technique de transmission soit comme émetteur soit comme récepteur.

➤ Palpeurs doubles monoblocs :

Les palpeurs doubles ou « émetteur-récepteur » sont constitués de deux palpeurs jumelés dans un seul bloc support ; les cristaux sont inclinés afin de permettre par chevauchement des zones déterminées au sein de la pièce en examen.

Toutefois, il faut mentionner que la sensibilité de ces palpeurs est maximale au point d'intersection ou foyer des faisceaux et il est impossible de définir les notions du champ proche et du champ éloigné. L'utilité de ces palpeurs s'étend, pour un palpeur déterminé, sur une profondeur relativement courte.

➤ Palpeurs d'angle :

Les palpeurs d'angle produisent des ondes transversales dans les matériaux en envoyant une onde longitudinale incidente entre le 1^{er} et le 2^{ème} angle critique. En pratique, on construit des palpeurs d'angle avec des valeurs angulaires de réfraction dans l'acier de 35°, 45°, 60°, 70° et 80°.

III.5.3.7 Le choix du palpeur

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

- Type de palpeur et son élément actif. Selon les modalités du contrôle et le type et l'orientation des défauts recherchés, nous prenons un des palpeurs décrits déjà (palpeur droit, palpeur d'angle) en considérant son fonctionnement en émission et/ou en réception.
- choix de la fréquence ; La fréquence du palpeur est subordonnée au contrôle à effectuer pour les épaisseurs faibles ou les défauts très fins on utilise les fréquences élevées.
- pour les matériaux à gros grains, on choisit les fréquences faibles pour éviter le phénomène de
- diffusion.

Tableau représentative des vitesses des ultrasons (vitesses ondes) dans la matière

Vitesses et impédances acoustiques				
Matériau	Masse volumique (10^3Kg/m^3)	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Vitesse des ondes transversales (m/s)	Impédance acoustique ($10^6 \text{Kg/m}^2\text{s}$)
Aciers	7,8	5900	3250	46
Fontes	7,2	4600	2150	33
Aluminium	2,7	6300	3100	17
Cuivre	8,9	4700	2250	42
laiton	8,5	4500	2100	38
Béton	2,5	4500		11
Muscle	1,0	1600		1,6
Araldite	1,2	2500	1050	3
Plexiglas	1,2	2700	1100	3,2
Verre	2,6	5650	3400	14
Huile	0,8	1500		1,2
Glycérine	1,3	1900		2,5
Eau	1,0	1480		1,5
Mercure	13,6	1450		20
Quartz	2,7	5750		15
Titane de baryum	5,7	4400		35
Air	$1,3 \times 10^3$	330		4×10^{-4}

Tableau.III.1 : Vitesses de propagation des ondes dans la matière

III.6 Matériel mis en œuvre

- Postes U.S. analogiques ou numériques ;
- Traducteurs OL, OT et à angles variables ;
- Mesureurs d'épaisseurs ;
- Logiciels de saisi et de suivi des mesures d'épaisseurs.



Figure III.9 : Appareil de contrôle par US Traducteurs Mesureur d'épaisseur

III.6.1 Caractéristiques

III.6.1.2 Avantages

- La méthode se prête bien à la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et elle présente une grande sensibilité, notamment pour la recherche de défauts plans.
- Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers.
- Epaisseurs contrôlables trop importantes.
- Elle peut être utilisée indifféremment sur chantier ou en atelier et se prête bien à l'automatisation.

III.6.1.3 Inconvénients

- La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique.
- Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire « couplant » entre le traducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation.
- L'interprétation de la nature des défauts et de leur dimension nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience.

- La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux.

III.7 Contrôle par radiographie

III.7.1 Introduction

La radiographie met en œuvre des sources émettrices de rayonnements ionisants. Ces rayonnements ont une énergie très grande qui leur permet de traverser la matière.

Lors de la traversée de la matière, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus aux moins le rayonnement. Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent (par exemple : la radiographie utilisée dans le domaine médical), soit enregistrées sur un film spécial (cas de radiographie industrielle).

III.7.2 Principe de la méthode

L'examen de la structure ou de la santé interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et A recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la figure IV.1. Selon le même principe, on peut obtenir des images en utilisant d'autres particules que les photons et ainsi mettre en œuvre des techniques. [21]

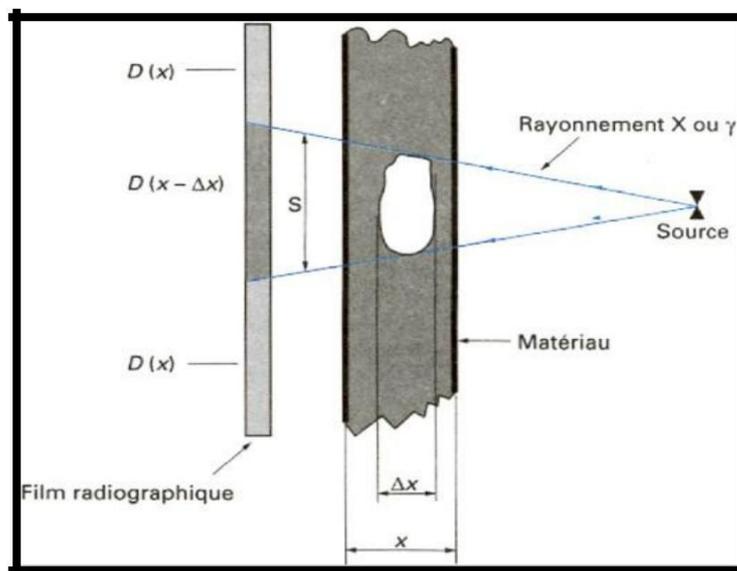


Figure III.10 : le principe du contrôle radiographie (rayonnement X ou γ).

L'examen radiographique est utilisé pour détecter des défauts sous la surface d'un matériau. Deux types de rayons électromagnétiques sont utilisés :

Le rayon X

Il est généré dans un tube radiogène, un appareil électrique qui émet des rayons X lorsqu'il est mis sous tension.

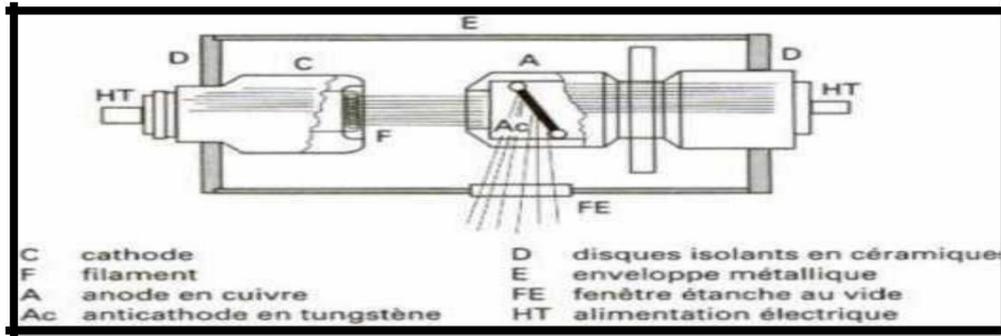


Figure III.11 : obtentions des rayons X.

Le rayon gamma

Il est généré par des éléments radioactifs (isotopes). Les isotopes les plus fréquemment utilisés sont le cobalt-60, le césium-137 et l'iridium-192. Le tableau.2 donne quelques sources utilisées.

Nature	Période	Epaisseur de Décimétransmission
Césium 137	30 ans	8.4 mm de Pb
Cobalt 60	5,3ans	13 mm de Pb
Iridium 192	74 jours	2.8 mm de Pb

Tableau III.2 : les périodes de radioactivité de quelques

Sources Un film fixe toutes les inégalités de la pièce soumise aux rayons.

Ces rayonnements ont la propriété de traverser la matière, d'être atténués plus ou moins selon les matériaux traversés et de transporter une image radiante de ces derniers pouvant être convertie en image visible sur un dispositif approprié : Film radiographique (radiographie industrielle, ou écran fluorescent (radioscopie industrielle). Dans le cas de radioscopie industrielle, nous pouvons utiliser, outre l'écran fluorescent, une intensification d'image associé éventuellement à une caméra qui permet la vision directe sur un écran de télévision et d'enregistrement éventuelle sur magnétoscope.

III.7.3 Utilisation des rayons X ou γ

Le tableau III.2 représente l'utilisation de la radiographie(X ou γ) par rapport aux autres contrôles non destructifs :

Type de contrôle non destructif	% d'utilisation
Radiologie industrielle (X ou gamma)	51
Ultrasons	25
Courant de Foucault	11
Ressuage (avec ou sans ultraviolet)	6
Magnétoscopie	3,5
Emission acoustique et vibrations	2
Divers (thermographie, étanchéité, etc....)	1,5

Tableau III .3 : le taux d'utilisation des contrôles non destructifs.

Le contrôle non destructif par technique à l'aide de photons X ou gamma, parfois de faisceaux d'électrons (accélérateurs de particules) ou de neutrons ne se limite pas aux constructions soudées. Il concerne également les ouvrages d'art où les défauts recherchés sont :

- l'hétérogénéité d'un béton mal vibré, des reprises de bétonnage ou des joints de construction.
- absence partielle ou totale de coulis d'injection (protection des câbles contre la corrosion).
- les contrôles d'entretien notamment sur les chaudières, les hauts fourneaux, cubilots.
- le contrôle d'objets très divers : pneus, pièces de fonderie ou en matériaux composites, etc...

III.7.4 Lois de propagation des rayonnements ionisants :

Ce mode de contrôle utilise des rayonnements électromagnétiques de faible longueur d'onde (ordre de grandeur de l'angström) pour traverser des matériaux opaques à la lumière.

III.7.4.1 Nature et propriétés principales

Les rayons X ou γ qui sont employés en contrôle ont les propriétés suivantes :

- Ils se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière.
- Ils sont invisibles.
- Ils traversent la matière et sont partiellement absorbés au cours de la transmission.
- Ils peuvent endommager ou détruire les cellules vivantes.
- Ils ionisent les milieux gazeux.

III.7.4.2 Phénomène d'absorption

Lors de la traversée d'un matériau, le rayonnement électromagnétique subit un affaiblissement par :

- Effet photo-électrique ;
- Effet Compton ;
- Formation de paires d'ions ;

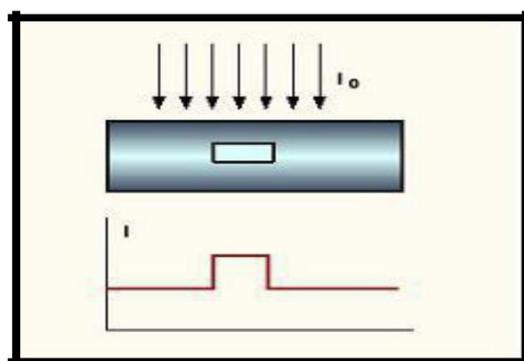


Figure III.12 : Absorption des rayons ionisants.

D'une façon schématique, on peut écrire (en rayonnement monochromatique) :

$$I = I_0 e^{-\mu e}$$

avec : **I** : intensité en sortie ;
I₀ : intensité incidente ;
μ : coefficient d'absorption ;
e : épaisseur du matériau.

Le coefficient d'absorption prenant la forme :

$$\mu = k \rho^3 Z^3$$

Avec : **k** : fonction de la masse volumique du matériau ;

λ : longueur d'onde du rayonnement ;

Z : numéro atomique de l'élément traversé.

L'absorption peut aussi s'exprimer par :

➤ L'épaisseur de demi-absorption : **I=I₀/2**

L'épaisseur de déci-transmission : **I = I₀/10** (utilisée en radioprotection).

III.7.4.3 Mise en œuvre

Le contrôle par radiographie nécessite un choix approprié du matériel, de la procédure et des conditions d'examen. En fait, pour obtenir une image nette et contrastée pour révéler les défauts recherchés, on doit suivre certaines étapes:

- Le rayonnement, et donc la source, doit être de puissance suffisante pour pouvoir traverser la pièce sans dégrader le contraste lié au rayonnement diffusé. L'intensité de ce rayonnement, c'est à dire l'activité de la source, sera choisie la plus grande possible pour réduire les durées d'exposition tout en limitant le flou géométrique.
- La prise de vue doit être définie en termes de conditions géométriques, position et orientation relative de la source, de l'objet et du film. L'emploi d'un certain nombre d'accessoires permet d'améliorer les résultats par exemple : diaphragme en plomb, filtres disposés devant ou derrière l'objet, sans oublier les écrans renforceurs qui sont des convertisseurs de rayonnement pour améliorer la sensibilité du film.

- Le choix du film résulte aussi d'un compromis entre rapidité d'impression et résolution, en égard au type de défaut recherché et aux conditions de prise de vue. La détermination du temps de pose se fait en pratique à l'aide d'abaques prenant en compte les paramètres de la source et les conditions de prise de vue. L'exploitation des clichés se fait, après développement, fixage (fixage : procédé d'insensibilisation à la lumière d'une image par élimination des sels d'argent, après développement) et lavage, par un examen du film par transparence sur des boîtes à lumières normalisées, les négatoscopes, conçus pour que la luminance émergeant du cliché soit de l'ordre de 100 cd/m^2 , ce qui exige des appareils particuliers pour l'examen des clichés à haute densité optique. La fiabilité de l'examen est liée à l'acuité visuelle de l'observateur, elle-même fonction de sa vue mais aussi des conditions optiques présentes.

III.8 Principe de la Gammagraphie

III.8.1 Choix de l'isotope

Le choix de l'isotope pour effectuer un contrôle dépend de plusieurs paramètres :

- temps de pose
- épaisseur de la pièce à contrôler
- contraste photographique (plusieurs longueurs d'onde impliquent meilleurs contrastes)
- netteté de l'image (dépend de la dimension de la tâche focale : petite dimension implique meilleure netteté).

On utilisera les mêmes techniques radiographiques qu'en rayon X en tenant compte l'émission est panoramique :

- Utilisation de contrôleurs de qualité.
- Choix de la distance d'émission.
- Même types de films radiographiques.
- Précaution à prendre pour le phénomène de diffusion.

III.8.2 Temps de pose

Le tableau III.4 représente le temps de pose en minute.

Epaisseur en mm	10	20	30	40	50	60	80	100	120	150
IRIDIUM192 10 curies	7	9	15	25	42	65	180	480	-	-
CESIUM137 10curies	9	12	18	26	40	60	130	270	-	-
COBALT 60 10curies	3	3,5	4,5	6	8	10	16	35	65	180

Tableau III.4 : le temps de pose.

III.8.3 Méthode de contrôle

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par :

- l'impression de films photographiques,
- l'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision,
- l'utilisation de détecteurs de rayonnements.

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme (NF EN 444, NF EN 462-1). Le tableau.5 suivant donne quelques indications sur les apparences radiographiques de quelque défaut de soudure.

Défaut	Apparence radiographique
Soufflures sphériques	Taches sombres à contours circulaires.
Soufflures vermiculaires	Taches sombres à contours allongés.
Inclusions de laitier	Taches sombres à contours irréguliers.
Cavités allongées	Lignes sombres plus ou moins interrompues et parallèles aux bords de la soudure.
Mauvaise reprise	Tache sombre isolée au niveau de la reprise.
Manque de fusion	Mince ligne sombre avec des bords nettement définis.
Manque de pénétration	Ligne sombre, continue ou intermittente au milieu de la soudure.
Fissures longitudinales	Fines lignes sombres, rectiligne ou non.
Caniveau	Ligne sombre, large et diffuse le long du bord de la soudure.

Tableau III.5 : apparences radiographiques de quelques défauts de soudure.

III.8.4 Le film radiographique

Les films sont constitués d'un support plastique recouvert sur les deux faces d'une émulsion de sels d'halogénures d'argent dans une couche de gélatine.

Une des caractéristiques des films est la taille du grain. Les films à gros grains sont plus rapides que les films à grains fins mais la définition des images est plus faible.

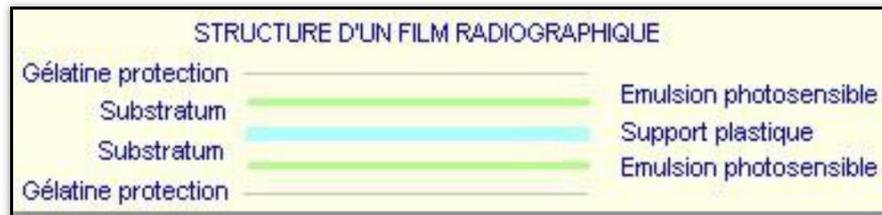


Figure III.13 : Structure d'un film radiographique.

III.8.5 Développement manuel d'un film radiographique

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 Ag Br 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.

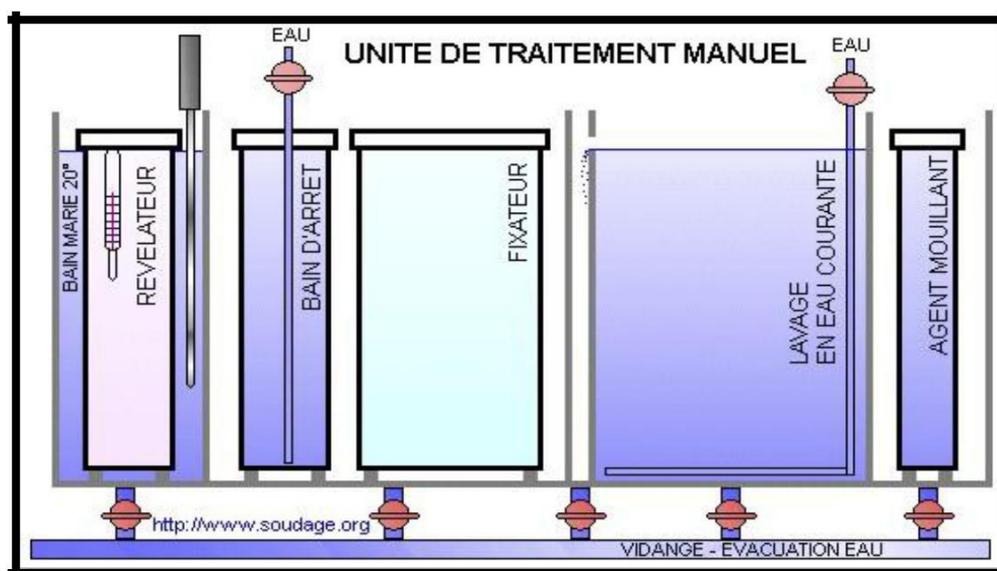


Figure III.14 : Développement manuel d'un film radiographique.

III.8.6 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 trois 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).

III.8.7 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 DES 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.

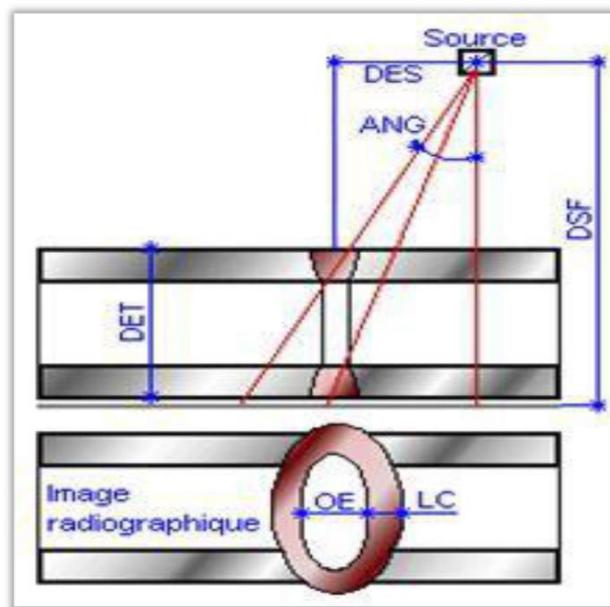


Figure III.15: La projection elliptique.

III.8.8 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.

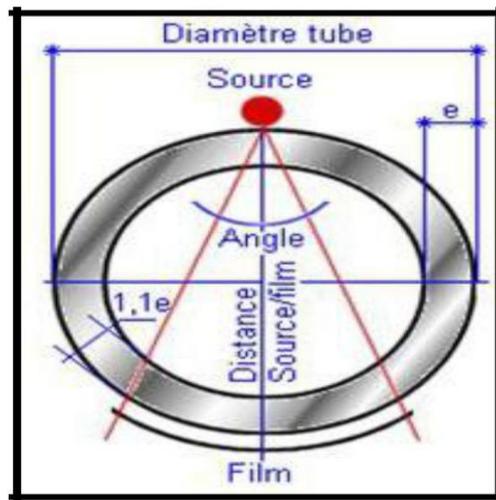


Figure III.16: Le tir au contact.

III.8.9 Visibilité des défauts

Cette visibilité des défauts est déterminée par les facteurs suivants :

La nature et l'épaisseur traversée par le rayonnement du défaut ;

- Les facteurs géométriques (distance du foyer de la source au film par exemple) qui vont conditionner la netteté des contours du défaut (problème de flou) ;
- Les propriétés du film (granulation, voile de base, présence d'écrans filtrants et (ou) de renforçateurs) ;
- La qualité du rayonnement utilisé.

III.8.10 Qualité du contrôle

Pour apprécier la qualité de l'image radiographique, il faut la traduire sous forme numérique.

Pour cela, on utilise des indicateurs de qualité d'image (IQI). Ils sont placés au contact de la pièce face à la source de rayonnement. L'image de l'IQI sur le film traduira la qualité de l'image.

Les principaux IQI utilisés sont les suivants :

- Indicateurs à fils (utilisé dans la plupart des pays européens) ;
- Indicateurs à gradins percés (utilisé surtout en France) ;
- Indicateurs à plaquettes percées (utilisé aux USA).

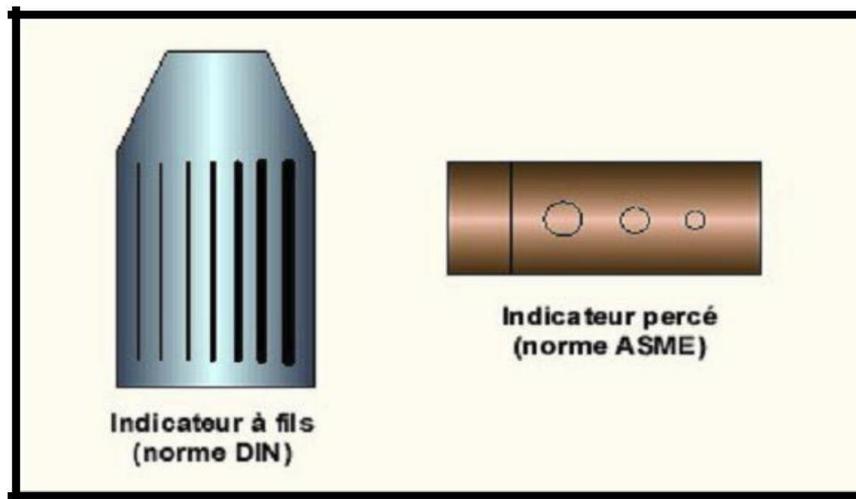


Figure III.17. Indicateurs de qualité d'image.

III.8.11 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 (Fig.III.16).

Des lettres et chiffres en plomb ainsi que des rubans métriques ou bande de **Wulf** sont utilisés pour assurer le marquage et l'identification des films. Ces marquages sont placés sur les pièces à contrôler.

- La nature et l'épaisseur traversée par le rayonnement du défaut
- Les facteurs géométriques (distance du foyer de la source au film par exemple) qui vont conditionner la netteté des contours du défaut (problème de flou) ;
- Les propriétés du film (granulation, voile de base, présence d'écrans filtrants et (ou) de renforçateurs) ;
 - La qualité du rayonnement utilisé.

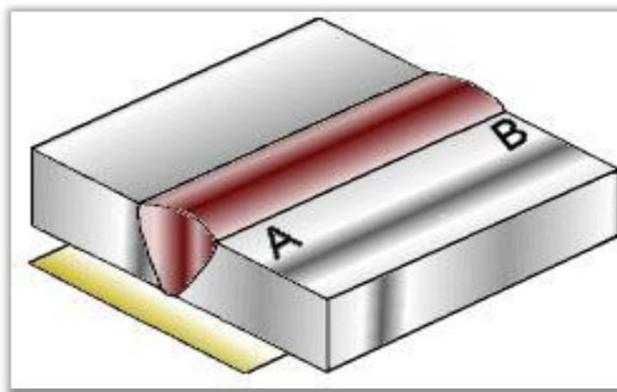


Figure III.18: Le repérage des radiogrammes

III.8.12 Protection

L'emploi de source de rayonnement demande le respect des réglementations sur la sécurité des opérateurs de contrôle.

III.8.13 Applications

Recherche d'anomalies internes :

- a) **Pièces moulées** : retassures, criques, restes de noyaux«
- b) **Soudures** : fissures, manques de fusion, manque de pénétration, soufflures, inclusions, défauts de formes ;
- c) **Tuyauterie** : corrosions ou érosions internes, dépôts internes, défauts de soudure ;
- d) **Parois en béton armé** : cavité, fissures, armatures ;

Position du clapet dans une vanne ;

- a) Contrôle de jeux dans un assemblage emboîté ;
- b) Vérification d'un assemblage monté en aveugle.

III.9 Caractéristiques

III.9.1 Avantages

- Détection des défauts de surface ou volumique dans tous les matériaux ;
- Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm ;
- Dimensionnement et identification possible des défauts ;
- Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques ;
- Sensibilité de détection de l'ordre de quelques μm avec grossissement ;
- Examen possible en temps réel (radioscopie) ;
- Pas de zone morte sous la surface ;

- Conservation possible des radiogrammes plusieurs dizaines d'années ;
- Transportabilité (générateurs de rayons X de faibles énergies, appareils de radiographie gamma portatifs d'environ 20 Kg).

III.9.2 Inconvénients

- La sensibilité de détection des défauts dépend des dimensions de la source et de son énergie, de la position et de l'orientation des défauts dans la pièce, de l'épaisseur de la pièce, de la sensibilité du film...
- Difficulté de localiser les défauts en profondeur ;
- Coûts de fonctionnement élevés (sources de rayonnement, entretien du matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, radioprotection...) ;
- L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi qu'une grande expérience.

III.9.3 Inconvénients en Hygiène et Sécurité

- Les rayonnements utilisés sont dangereux et peuvent provoquer des maladies professionnelles graves ;
- Les opérateurs sont classés travailleurs de catégorie A et portent un dosimètre individuel ;

La réglementation est souvent très contraignante (transport et stockage des sources radioactives, déclarations, autorisations, travail des femmes...).

III.10 Conclusion partielle

Les méthodes de contrôle non destructif sont appliquées souvent sur les joints de soudures. Quel que soit le procédé de soudage utilisé, les contrôles non destructifs sont nécessaires pour qualifier les pièces à assembler.

Chapitre IV :

**Etude expérimentale
appliquée sur les joints
soudés**

IV L'EXECUTION DE CONTRÔLE

IV.1 Introduction

Dans le cadre d'une inspection d'un joint soudé d'une canalisation en acier/carbone.

Programme d'inspection

- Ressuage
- Magnétoscopie
- Ultrasons

Spécifications techniques du réservoir :

Désignation du contenu: transport du gaz sec.

Diamètre de la pipe: 6'' (168 mm).

Nature du métal: API 5L Grade B.

Surépaisseur corrosion: 1.5 mm

Pression de service : 40 Bar.

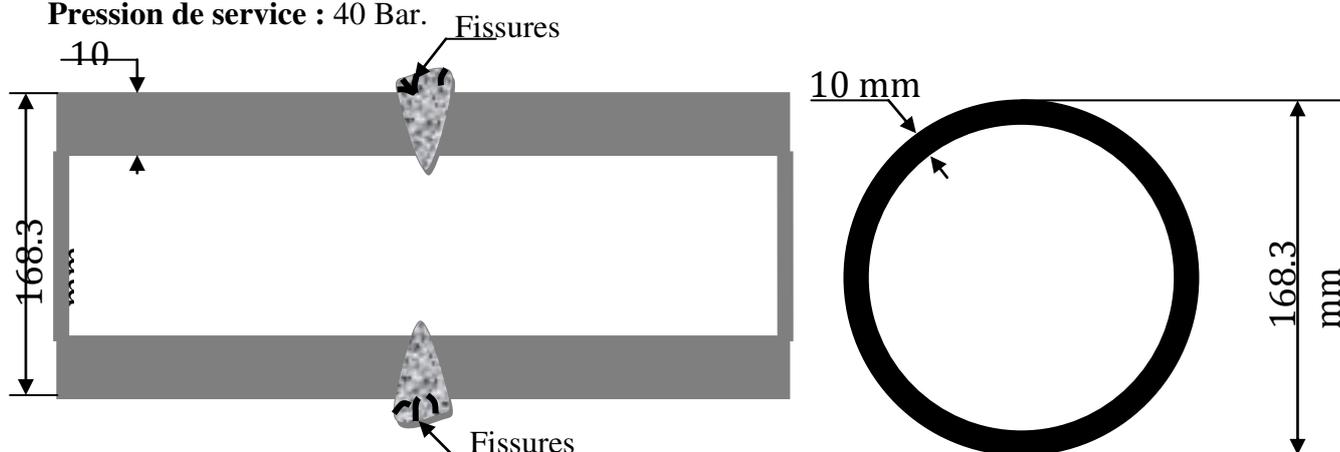


Figure IV.1 : Forme de l'échantillon.

IV.2 Essai de ressuage

IV.2.1 Produits utilisés

<p>Dégraissant N°120 dégraisseur à la vapeur de solvant</p>	
<p>Pénétrant rouge DP51- AERO</p>	
<p>Révéléateur D100-AERO</p>	

Tableau IV.1 : Produits utilisés dans l’essai de ressuage.

IV.2.2 Première étape : préparation et nettoyage préalable (l'étape la plus importante)

Les résidus doivent être éliminés en utilisant des agents de nettoyage appropriés (dégraissant au solvant), des agents qui éliminent les résidus tels que graisse, huile, peinture qui peuvent réagir avec le pénétrant et diminuer fortement sa sensibilité. Les acides et les chromates, notamment, peuvent diminuer fortement la fluorescence de pénétrants fluorescents et la couleur des pénétrants colorés. C'est pourquoi les agents chimiques doivent être éliminés de la surface à examiner



Figure IV.2 : Nettoyage de la pièce.

IV.2.3 Application du pénétrant

a) Méthodes d'application

Le pénétrant peut être appliqué sur la pièce à contrôler

- 1 au pinceau,
1. par pulvérisation,
2. par brossage,
3. par arrosage,
4. par trempage ou immersion. Surface à examiner reste complètement mouillée pendant toute l'adurée de la pénétration



Figure IV.3 : Application du produit ressuage

a) durée d'imprégnation

La durée d'imprégnation appropriée dépend des propriétés du pénétrant, de la température d'application, du matériau de la pièce à examiner et des discontinuités à détecter. La durée d'imprégnation peut varier de 5 min à 60 min.

b) élimination de l'excès

En général, l'excès de pénétrant doit être d'abord éliminé au moyen d'un chiffon propre non pelucheux.

Un nettoyage au moyen d'un chiffon légèrement humecté de solvant doit être réalisé ensuite

c) application du révélateur

L'application fine et uniforme du révélateur est réalisée par pulvérisation

L'opération se fait à une distance de (15 CM) forment une fine couche Blanche

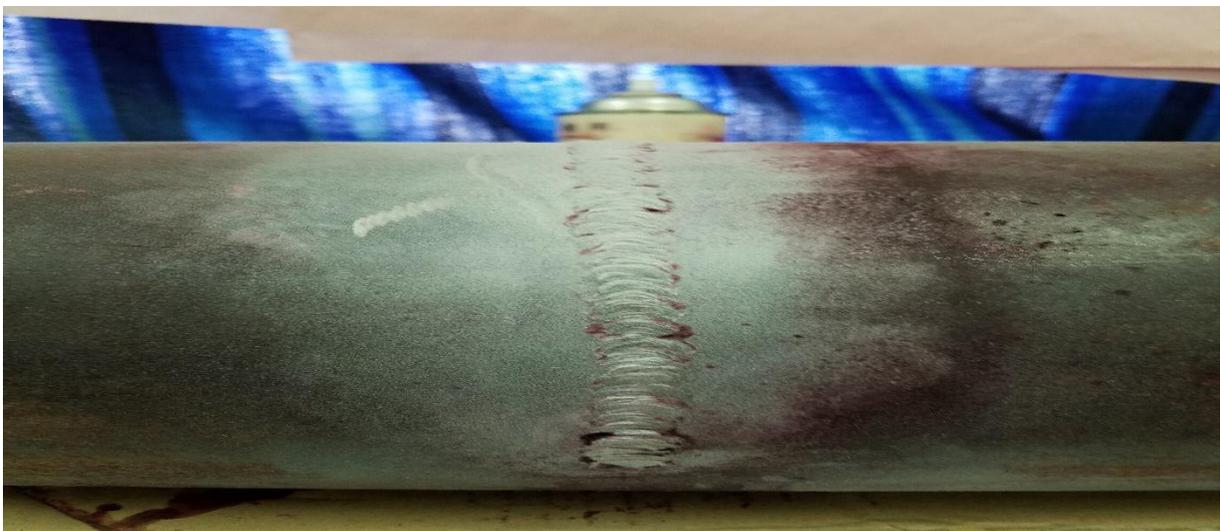


Figure IV.4 : Application du révélateur.

Après 2 minute le pénétrant remonte à surface de la pièce par le phénomène de capillarité et révèle les micros fissure dans le joint de soudure



Figure IV.5 : Les défauts détectés dans la pièce après ressuage.

IV.2.4 Conclusion

La pièce contrôlée était défectueuse, mais durant l'inspection visuelle la détection des défauts étaient impossible par l'œil nu. Après l'application du ressuage les défauts sont devenus visibles, et ça prouve que le ressuage est un bon moyen de contrôle pour la détection des petits défauts débouchant à la surface.

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

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

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

IV.3 Magnétoscopie :



Figure IV.6 : Contrôle par magnétoscopie.

IV.3.1 Mode expérimentale

La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité, les lignes du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un "champ de fuite magnétique", appelé également "fuite de flux magnétique" et tout sa après avoir bien nettoyé la pièce à inspecter à l'aide d'un solvant dégraissant.



Figure IV.7: Le matériel nécessaire pour le contrôle par magnétoscopie.

Un produit indicateur est appliqué sur la surface à examiner pendant l'aimantation (technique simultanée) ou après aimantation (technique résiduelle). Le produit indicateur noir coloré et/ou fluorescent est attiré au droit du défaut par les forces magnétiques pour former des indications.

Ces indications sont observées, dans des conditions appropriées, soit en lumière blanche artificielle ou lumière du jour, soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A) ou lumière bleue actinique, selon le type de produit indicateur utilisé.



Figure IV.8 : Rayonnement ultraviolet (UV-A)

Indicateur : poudre fluorescente ; Conditions : rayonnement ultraviolet (UV)

Les indications sont d'autant mieux détectées qu'elles se situent perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique. Pour détecter toutes les discontinuités à la surface d'une pièce, il faut effectuer deux aimantations orthogonales l'une par rapport à l'autre. L'aimantation longitudinale met en évidence les discontinuités transversales ($\pm 45^\circ$), et l'aimantation transversale met en évidence les discontinuités longitudinales ($\pm 45^\circ$) et après l'usage des ultraviolets les fissures commencent à apparaître comme affichée sur la photo ci dessous.

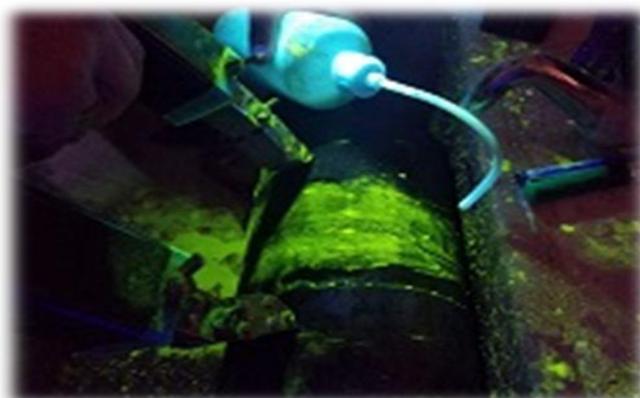


Figure IV.9 : Application du champ magnétique

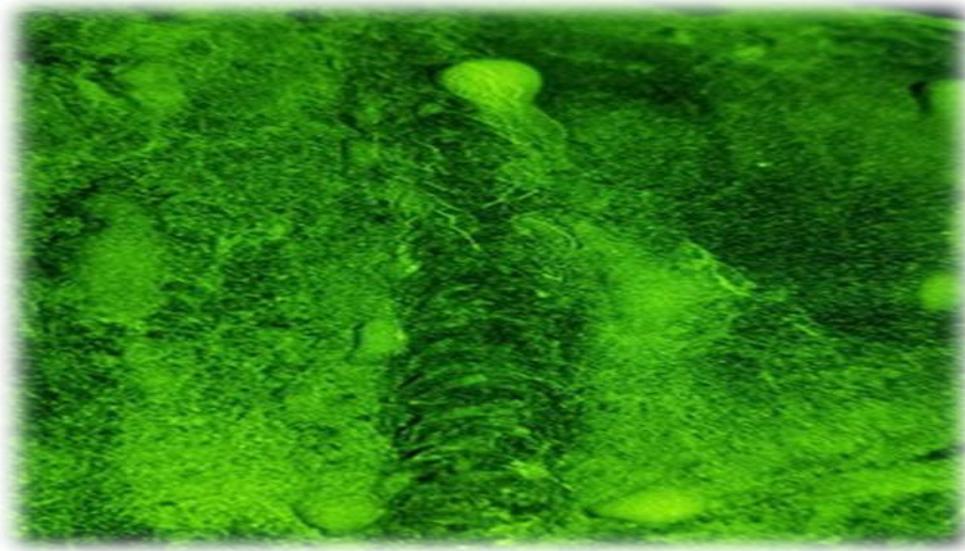


Figure IV.10 : Les défauts détectés dans la pièce à contrôlé par magnétoscopie.

IV.3.2 Conclusion

Après une inspection visuelle qui ne qui n'a pas été concluente la premiere iniative fut la magnétoscopie qui est une methode rapide,efficace et peu couteuse pour toutes sortes de dimenssions dans des environnement faciles ou difficiles soit-ils .et les resultats(défauts et fissures) sont affichés en toute clarté sur les photos si dessus.

IV.4 Ultrasons

IV.4.1 Matériels utilisé

1) Appareil détecteur des défauts par ultrasons SIUI CTS-9005 :



Figure IV.11 : Appareil détecteur des défauts par ultrasons SIUI CTS-9005.

2) Câble de connexion coaxial :



Figure IV.12 : Câble de connexion coaxial.

3) Palpeur a angle SIUI AFN4-1010-45L (4MHZ) 45° :



Figure IV.13 : Palpeur a angle SIUI AFN4-1010-45L (4MHZ) 45°

Bloc d'étalonnage :

Nous avons utilisé un bloc d'étalonnage de type V1 dont les dimensions sont illustrées dans le croquis ci dessus :

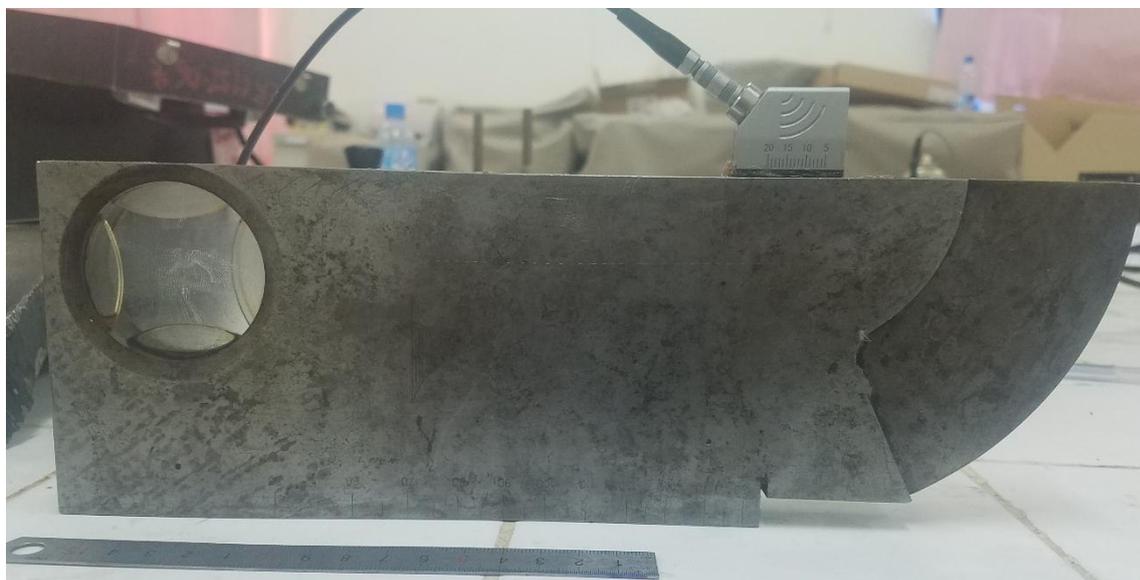


Figure IV.14: Bloc d'étalonnage.

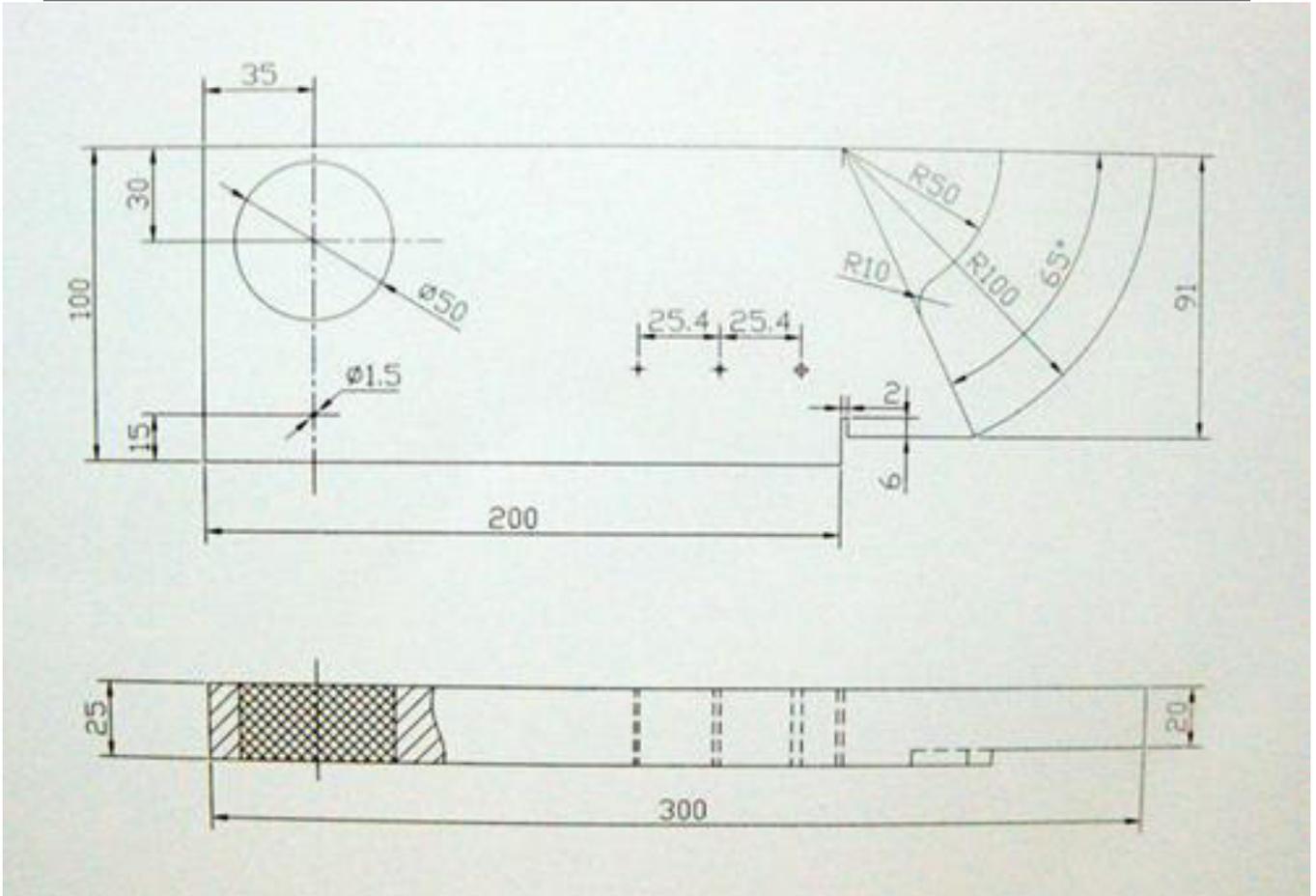


Figure IV.15:Schéma fonctionnel de Bloc d'étalonnage

IV.4.2 L'étalonnage de l'appareillage

a) vérification de la linéarité horizontale :

Pour la vérification de la linéarité horizontale (linéarité de la base du temps) nous avons utilisé un palpeur droit afin d'afficher plusieurs échos répétitifs en utilisant la cote de 25 mm sur le bloc d'étalonnage, et nous avons constaté que les échos répétitifs sont équidistants sur la base de temps comme il est montré dans l'image ci-dessus.

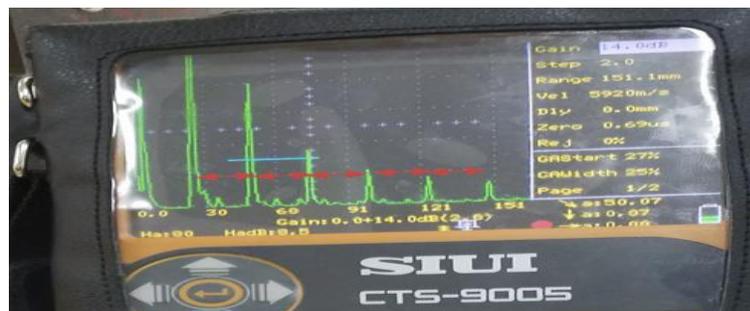


Figure IV.16: Vérification de la linéarité horizontale.

b) vérification de la linéarité verticale

Pour vérifier la linéarité verticale (linéarité de gain) nous avons ajuster le premier écho de fond à une amplitude de 20% de l'écran, et puis on ajoute un gain de +6dB (ceux ce qui va introduire une amplification de 100% de l'écho) pour avoir un écho de 40% de l'écran, et puis on ajoute +6dB pour avoir un écho de 80% de l'écran.

Nous avons constaté que notre appareillage a une très bonne linéarité verticale comme il est montré dans les images suivantes :

c) vérification du point d'émergence

Pour la vérification du point d'émergence on utilise le quart de cercle dans le bloc d'étalonnage, afin de trouver l'écho maximum.



Figure IV.17: Vérification du point d'émergence

d) l'angle de réfraction

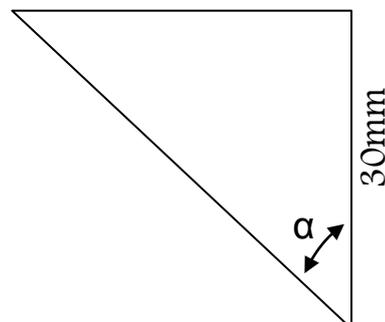
Pour calculer l'angle de réfraction nous utilisons le cercle percé dans le bloc d'étalonnage



Figure IV.18: L'angle de réfraction

On utilise le triangle schématisé dans l'image pour calculer l'angle de réfraction réel :
 α : l'angle de réfraction.

$$tg(\alpha) = \frac{29.7}{30} = 0,99 \rightarrow \alpha = Arctg(0,99) = 44,71^\circ \quad 64,7 - 35 = 29,7\text{mm}$$



Dans notre cas nous avons trouvé l'angle de réfraction égale à (44.71°) pour un palpeur de 45° .

e) Vérification de l'angle de Bigle

L'angle de Bigle c'est l'angle composé entre l'axe du palpeur et un réflecteur perpendiculaire à cet axe une fois que le signal max de ce réflecteur est obtenu sur l'écran de visualisation. Dans notre cas l'angle de Bigle est nul, comme il est montré dans l'image.



Figure IV.19: Vérification de l'angle de Bigle

a) Réglage du zéro palpeur :

Le réglage de zéro palpeur consiste à éliminer le parcours préliminaire parcouru par l'onde ultrasonore dans la semelle placée entre l'élément piézoélectrique et la pièce à contrôler. Et pour le régler dans le cas d'un palpeur à angle nous utilisons le quart de cercle dans le bloc d'étalonnage pour avoir l'écho maximum, et puis l'ajustement de parcours sonore à 100mm en modifiant le zéro palpeur dans l'appareil.

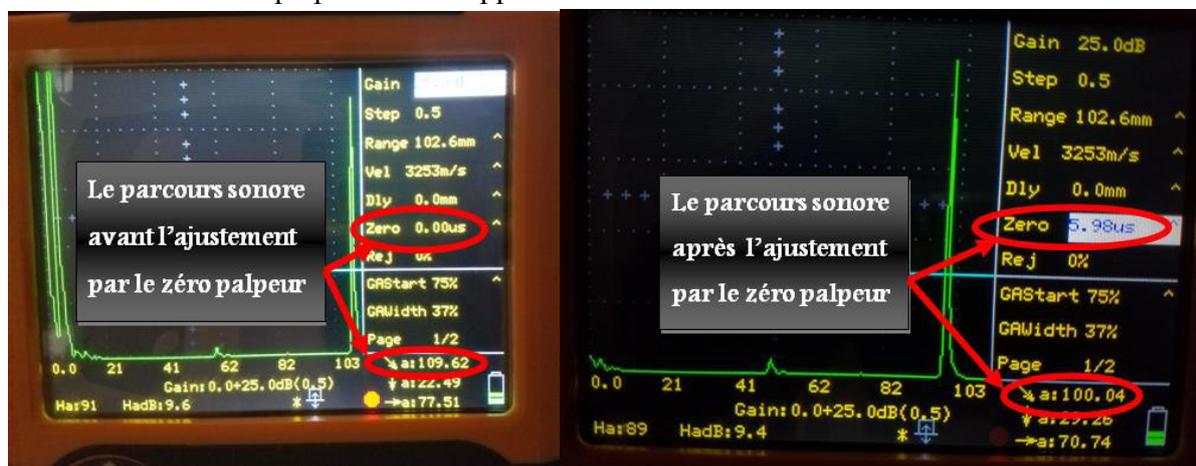


Figure IV.20: Réglage du zéro palpeur.

b) traçage de la CAD :

La courbe de correction amplitude-distance (DAC) sert à tracer la variation d'amplitude des réflecteurs de la même taille situés à des distances différentes de la sonde. Ces réflecteurs créent des échos dont l'amplitude dans le champ lointain diminue avec la distance en raison de l'atténuation et de la divergence du faisceau pendant son trajet à travers la pièce inspectée. La courbe DAC compense graphiquement l'atténuation du matériau, les effets du champ proche et la divergence du faisceau. Dans une configuration DAC, l'amplitude des échos provenant de réflecteurs de la même taille que les réflecteurs utilisés pour l'étalonnage correspondra à la hauteur de la courbe, peu importe la profondeur ou la distance. De la même manière, les réflecteurs plus petits ou plus grands que les réflecteurs utilisés pour l'étalonnage généreront des échos au-dessous ou au-dessus de la courbe.

Dans notre cas nous avons utilisé un réflecteur de 1.5mm de diamètre percé dans le bloc d'étalonnage pour tracer la CAD en utilisant 05 parcours sonores différents afin de tracer 05 points.

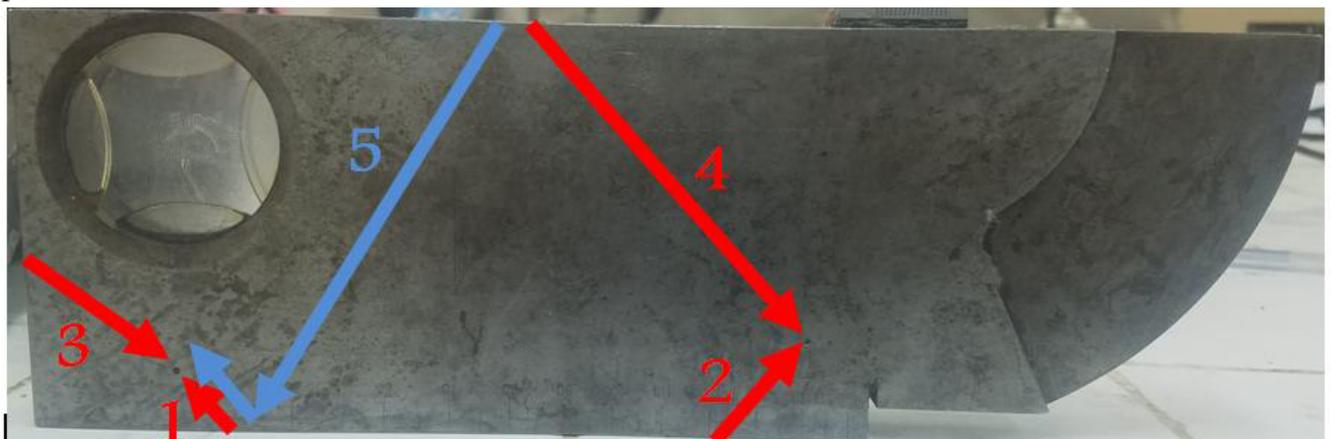


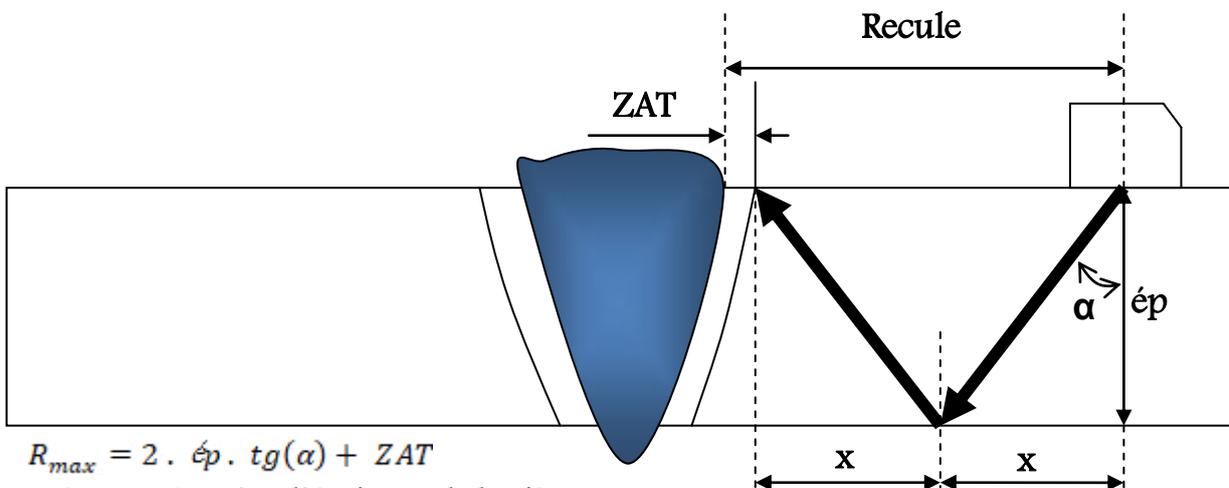
Figure IV.21 : Traçage de la CAD

IV.4.3 Le contrôle de pièce soudée

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

1- Le recule max :

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



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

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

ZAT : généralement on la prend 10mm

Dans notre cas ép = 28.9 mm, α = 44.71°, ZAT= 10 mm.

Donc :

$$R_{max} = 2 \cdot 28,9 \cdot \operatorname{tg}(44,71) + 10 = 67,21 \text{ mm}$$

2- L'échelle minimale (l'étendu)

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

Etendu = 1.25 X (un bond complet)

Un bon complet = 2. Y

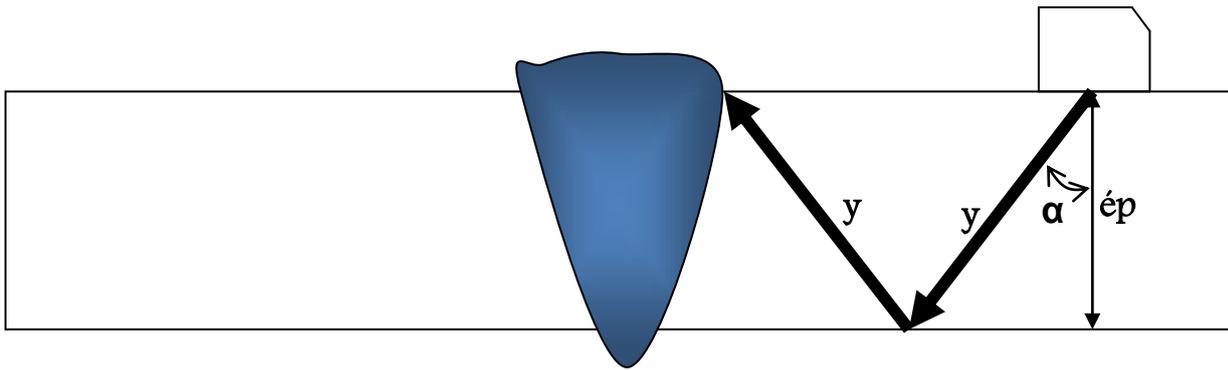
$$y = \frac{ép}{\cos \alpha}$$

Donc :notre

$$y = \frac{28,9}{\cos 44,71} = 40,66 \text{ mm}$$

cas

$$\text{Etendu} = 1,25 \times 2 \times 40,66 = 101,65 \text{ mm}$$



3- Contrôle de la pièce soudée :

Durant le contrôle, nous avons trouvé un défaut à l'intérieur du cordon de soudure à une profondeur de 22 mm environ comme il est montré dans les images au-dessus :

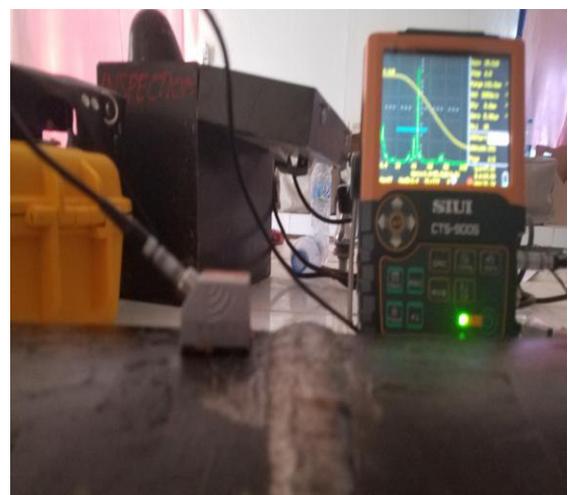
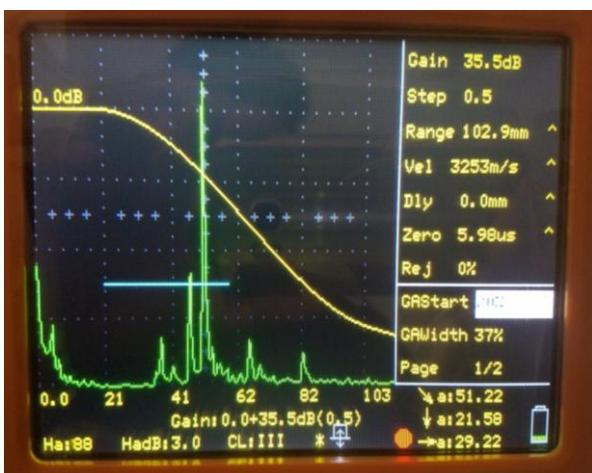
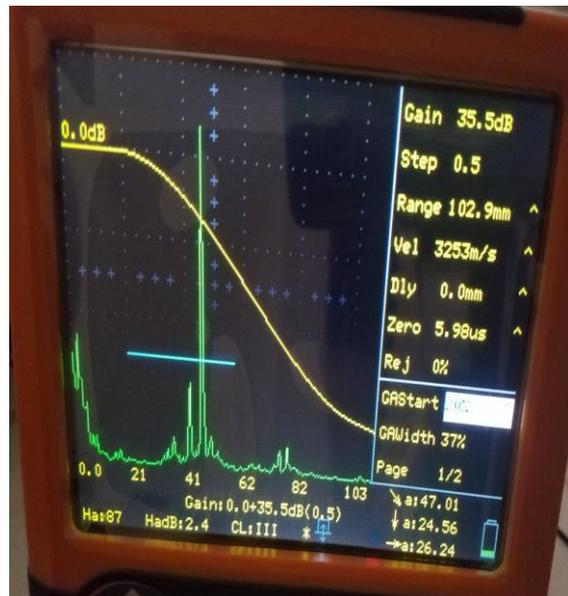
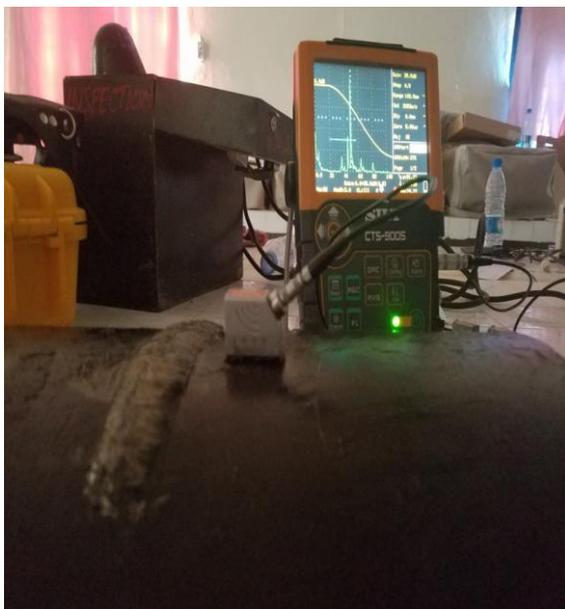


Figure IV.22: Contrôle de la pièce soudée

Conclusion :

La pièce contrôlée était défectueuse, mais durant l'inspection visuelle la détection des défauts étaient impossible par l'œil nu (défaut interne). Après le contrôle par ultrasons, le défaut est détecté. L'écran de visualisation présente un autre écho entre les échos d'émission et de fond, qui s'appelle écho de défaut, et ça prouve que la méthode de contrôle par ultrason est un bon moyen de contrôle pour la détection des défauts internes d'une pièce soudée.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire de fin d'étude avait pour but « les méthodes de contrôle du soudage non destructif » dans les cordons de soudure des pipelines en acier au niveau de la direction technique à SONATRACH, Hassi R'mel.

Malgré les circonstances difficiles auxquelles nous avons été exposés à cause de « covid 19 » nous avons continué notre recherche en ligne, et nous espérons avoir conclu ce qui suit:

- Chaque type de défaut de soudage a sa méthode de détection, soit par ressuage, par ultrason, ou par la magnétoscopie.
- Généralement les défauts sont inévitables dans un procédé de soudage.

Les techniques de remèdes effectuées sont:

- Le chauffage qui permet d'éliminer une grande partie de ces défauts.
- Le meulage.

Les imperfections ne sont pas toutes considérées comme des défauts, il ya des critères d'acceptation suivant la norme API 1104. Par contre, tous les défauts sont des imperfections.

Références bibliographiques

1. Mémoire de master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN. Thème : étude de comportement en fatigue des aciers pour pipelines.
2. Tubes aciers (ENSPM formation industriel -IFP Training) [26/01/2005].
3. Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation (J. VINCENT-GENOD) [1972].
4. Technologie de soudage (programme de formation GTP) [10/03/2003].
5. R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.
6. S.BENSAADA.D.FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ».Office de publications universitaires.
2^{ème} Edition.01-2009.
7. V.RYBARCOV, « le soudage et le coupage des métaux».2^{ème} EDITION.1983.
EDITION MIR.MOSCOU
8. SAF-AIR LIQUIDE, Procédés TIG. et plasma, Ed.1-SUY 542/20/2000.
9. Guide de soudage, Soudage l'arc sous gaz de protection TIG, MIG, MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
10. R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOUT 1995.
11. VARIANTE DE BROCEE TIG PAR IMPULSION, Soudage électrique à l'électrode réfractaire publications Centre de Soudage de Cheraga
12. H.GRANJON. «Bases métallurgiques de soudage » 2^{ème} édition, publications de soudage
et
de ses applications Paris .1995.
13. Documents Technique COSIDER Canalisation 2012.
14. Documents Yamani Institute of Technology.
15. Site Internet : <http://www.yamani-institute.com/>

16. **APAVE Lyon France**-Présentation des principaux moyens d'investigation par contrôle non destructif Document de formation.
17. Jacques DUMONT-FILLON : Contrôle non destructifs.
18. **M.C. GUILPIN, Maître de conférence à l'Université Paris VII M^{me} B. MANGEOT, Maître de conférence à l'Université Paris VI** Magnétoscopie Niveau 2, 2^{ème} Edition 1990.
19. manuel pour l'examen par ultrasons des soudures, institut international de la soudure, commission V. 1978.
20. cours théorique et pratique de l'ultrason : Programme de formation « Gtp » [02/01/2008].
21. Jacques DUMONT-FILLON : Contrôle non destructifs.
22. DUBRESSON (J.). - Caractéristiques dominantes et évolution des matériels de CND. Soudage et Techniques connexes nov. déc. 1991.
23. NORME API 1104 DIXNEUVIEME EDITION, SEPTEMBRE 1999.