

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –  
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

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

**En :** (Génie Mécanique)

**Spécialité :** (Assemblages Soudes et Matériaux)

**Par:** BOUAZZA ABID Saddam Hosayn

### **Sujet**

# **CONTROLE DES JOINTS SOUDES PAR RADIOGRAPHIE AUTOMATISEE**

Soutenu publiquement, le 26 / 09 / 2024, devant le jury composé de :

Mr BRAIRI Samir	MAB	Université de Tlemcen	Président
Mr MANGOUCI Ahmed	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr HADJOUI Fethi	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2023 /2024



# ***Remerciements***

*En premier, On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné le privilège, la chance d'étudier et de nous avoir donné force, courage, et*

*Patience pour accomplir ce travail.*

*On tient à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à notre*

*Encadreur **Mr HADJOUI Féthi**, Pour sa rigueur*

*Je voudrais monsieur le président **BRAIRI Samir** qui nous a fait l'honneur de présider le jury, et monsieur l'examineur **MANGOUCI Ahmed** qui ont accepté d'examiner notre manuscrit*

*Enfin, je remercie mon amis et collègue inspecteur de CND **Mr MEDJAHDAOUI Ahmed** de m'avoir fourni toutes les informations nécessaires et de m'avoir aidé a réalisé mon projet.*

# ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail à Dieu qui m'a toujours illuminé et m'a guidé sur le bon chemin.*

## ***A mes chers parents***

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me prodiguez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

## ***A mes amis***

*Que j'ai vécu avec eux des beaux moments au cours de mon cursus à*

## ***L'université***

*Je ne vous souhaite que du meilleur.*

## ***A mes camarades de la promo***

*Chacun en son nom.*

***Je dédie ainsi cet humble travail à mes professeurs.***

## ملخص :

ان الهدف من هذه المذكرة هو معرفة كيفية استخدام التصوير الشعاع بواسطة الاشعة السينية لوصلات اللحام لانابيب البترول والغاز والماء في المؤسسة الوطنية كوسيدار انابيب وذلك لدراسة العيوب الناتجة عن التلحيم ومعرفة اسباب ظهورها وطريقة علاجها.

## **Résumé :**

L'objectif de ce mémoire est de savoir comment utiliser la radiographie aux rayons X pour le soudage des joints des pipelines de pétrole, de gaz et d'eau de la National Cosider canalisation C01 , pour étudier les défauts résultant du soudage et de connaître les raisons de leur apparition et la méthode de leur traitement.

**Abstract:**

The objective of this thesis is to know how to use X-ray radiography for welding joints of oil, gas and water pipelines of the National Cosider pipeline C01, to study the defects resulting from welding and to know the reasons for their appearance and the method of their treatment.

# SOMMAIRE

Remerciements .....	I
Dedicaces .....	II
Resume .....	III
Sommaire .....	IV
Liste des tableaux .....	X
Liste des figures .....	XI
Liste des symbols .....	XV
Introduction générale : .....	1
Chapitre I .....	2
I.1.Introduction : .....	2
I.2.Classement des procédés de soudage: .....	2
I.2.3.Soudage sous gaz inerte avec électrode en tungstène (TIG) :a).Source d'énergie : .....	5
I.3.Soudage automatique : .....	7
I.3.1.Definition : .....	7
I.4.Préparation des joints à souder: .....	8
I.5.Types des joints soudés: .....	8
I.6.Contrôle des joints soudés: .....	9
I.6.1.Contrôle avant le soudage: .....	9
I.6.2. Contrôle pendant le processus de soudage : .....	9
I.6.3. Contrôle post-soudage : .....	10
I.7.Conclusion:.....	10
Chapitre II.....	11
II.1.Introduction : .....	11
II.2.Contrôles destructifs : .....	11
II.2.1.Essai de traction : .....	11
II.2.2. Essai de résilience Charpy : .....	13
II.2.3.Essai de dureté : .....	13
II.3.Contrôles non destructifs : .....	14
II.3.1.Contrôle visuel : .....	14
II.3.2.Ressuage : .....	15
II.3.3.Magnéoscopie : .....	16
II.3.4.Courants de Foucault: .....	17
II.3.5.Ultrasons:.....	18

II.3.6. Contrôle par radiographie :	19
II.4. Rayons X et rayons Gamma :	20
II.5. Choix d'une substance radioactive:	21
II.6. Comparaison entre la radiographie X et gamma :	22
II.7. Variation de l'intensité de radiation :	23
II.8. Appareils à rayon X pour radiographie industrielle :	23
II.8.1. Tube à rayons X :	23
II.9. Augmentation de la durée d'utilisation:	25
II.10. Augmentation de la sécurité :	25
II.11. Augmentation de l'identification des matériaux :	25
II.12. Conclusion:	25
Chapitre III.....	26
III.1. Définitions :	27
III.2. Eléments de crawler :	28
III.3. Films radiographiques:	28
III.4. Etapes d'études le joint de soudure et comment détecte les défauts :	29
III.4.1. Description de la technique utilisée :	29
III.4.2. Préparation de l'échantillon pour l'examen :	30
III.4.3. Préparation de la surface :	30
III.4.4. Détermination de la position et de la taille de la soudure :	30
III.4.5. Préparation et positionnement de la cassette :	30
III.4.6. Mesure de la radioactivité de la source d'Ir 192 :	30
III.4.7. Réalisation de l'exposition et règles de sécurité :	30
III.4.8. Chambre noire :	31
III.4.9. Processus de développement du film :	32
III.5. Défauts de soudure :	33
III.5.1. Introduction :	33
III.5.2. Fissures :	33
III.5.2.1. Généralités :	33
III.5.2.2. Direction des fissures :	33
III.5.2.3. Fissure longitudinale :	33
III.5.2.4. Fissures transversales :	34
III.5.2.5. Types des fissures :	35
III.5.2.6. Fissures de Gorge (Throat Cracks):	35
III.5.2.7. Fissures de Racine:	36
III.5.2.8. Fissures de Cratère:	36
III.5.2.9. Fissures dans les connexions :	37

III.5.2.10. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) :	37
III.5.2.11. Fissures à chaud (ou de solidification) :	38
III.5.2.12 Fissuration à froid (fissuration par l'hydrogène):	39
III.5.2.13. Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire) :	41
III.5.3. Manque de fusion :	44
III.5.3.1.Localisations possibles des manques de fusion :	44
III.5.4.Manque de pénétration :	47
III.5.4.1.Localisations possibles des manques de pénétration :	47
III.5.4.2. Manque de pénétration à la racine :a). Définition :	48
b) Mesures préventives :	49
III.5.5. Inclusion gazeuses :	50
III.5.5.1. Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités :	50
III.5.5.4. Porosités uniformes :	52
III.5.6. Inclusion solides :	53
III.5.6.1. Différents types d'inclusions solides :	53
III.5.7. Excès de matière :	56
III.5.7.1. Généralité :	56
III.6.Etablissement du rapport:	57
III.7.Conclusion partielle :	58
Chapitre IV Étude expérimental	59
IV.1 Introduction :	59
IV.2. Présentation de l'entreprise COSIDER Biskra :	59
IV.3. Diversité de l'activité à travers les filiales:	60
IV.4. Procédé de soudage à COSIDER :	61
IV.5.Etapes de radiographie :	63
IV.5.1.Déterminer le point de départ :	63
IV.5.2.Ruban gradue :	63
IV.5.3.Film radiographique :	63
IV.6.Etapes sur laboratoire :	67
IV.6.1.Développements des films :	67
IV.7.Interpretation des résultats :	70
IV.8.Analyse et discussion des résultats :	71
IV.8.1.Défauts de forme linéaire :	71
IV.8.2.Défauts de forme volumique :	72
IV.8.3.Impact sur l'assemblage soudé :	72
IV.8.4.Premier degré de risque : Défauts linéaires	72
IV.8.5.Deuxième degré de risque : Défauts volumiques	73

IV.8.6.Troisième degré de risque : Défauts de forme .....	73
IV.8.7.Réparation des défauts : .....	73
IV.9.Conclusion : .....	73
Conclusion générale : .....	74
Référence Bibliographiques.....	76

# Liste des tableaux

**Tableau III.1** : Comparaison entre la radiographie X et gamma

## La liste des figures :

<b>Figure I.1</b> : Modes d'assemblage.....	2
<b>Figure I.2</b> : Soudage manuel à l'arc.....	5
<b>Figure I.3</b> : Soudage des pipelines (type manuel).....	6
<b>Figure I.4</b> : Soudage semi-automatique (MIG) .....	6
<b>Figure I.5</b> : Soudage sous gaz inerte .....	8
<b>Figure I.6</b> : Soudage des pipelines type automatique.....	9
<b>Figure II.1</b> : Essai de traction .....	14
<b>Figure II.2</b> : Essai de résilience .....	15
<b>Figure II.3</b> : Essai de dureté .....	16
<b>Figure II.4</b> : Contrôle visuel. ....	17
<b>Figure II.5</b> : Etapes du contrôle par ressuage. ....	18
<b>Figure II.6</b> : Alimentation pour le contrôle magnétoscopique .....	19
<b>Figure II.7</b> : Détection des défauts par les courants de Foucault.....	20
<b>Figure II.8</b> : Contrôle par ultrasons des soudures .....	21
<b>Figure II.9</b> : Contrôle radiographique des soudures .....	22
<b>Figure II.10</b> : Tube à rayant X .....	27
<b>Figure III.1</b> : Tube à rayant X.....	30
<b>Figure III.2</b> : Eléments de crawler .....	31
<b>Figure III.3</b> : Structure de film radiographie.....	32
<b>Figure III.4</b> : Exposition par contact à double paroi.....	32
<b>Figure III.5</b> : Constitution d'une chambre noire.....	35
<b>Figure III.6</b> : Fissure longitudinale.....	37

<b>Figure III.7 :</b> Fissure transversale.....	38
<b>Figure III.8 :</b> Types des fissures.....	38
<b>Figure III.9:</b> Fissure de Gorge (Throat Cracks).....	39
<b>Figure III.10:</b> Fissure de Racine.....	39
<b>Figure III.11 :</b> Fissure de Cratère.....	40
<b>Figure III.12 :</b> Fissure au raccordement .....	40
<b>Figure III .13 :</b> Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) .....	41
<b>Figure III.14 :</b> Fissure à chaud (ou de solidification).....	41
<b>Figure III.15 :</b> Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.....	42
<b>Figure III.16 :</b> Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	43
<b>Figure III.17 :</b> Arrachement lamellaire dans un joint en T.....	45
<b>Figure III.18 :</b> Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.....	45
<b>Figure .III.19 :</b> Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	47
<b>Figure III.20 :</b> Localisations possibles des manques de fusion.....	48
<b>Figure III.21 :</b> Manque de fusion dans le flanc de la soudure. ....	48
<b>Figure III.22 :</b> Manque de fusion entre passes .....	49
<b>Figure III.23 :</b> Manque de fusion à la racine de la soudure .....	50
<b>Figure III.24a :</b> Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure..	51
<b>Figure III.24b :</b> Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur .....	51
<b>Figure III.25 :</b> Manque de pénétration dans la soudure.....	52
<b>Figure III.26a :</b> Apport (chaleur) arc trop faible. ....	53
<b>Figure III.26b :</b> Diamètre électrode trop grand .....	53
<b>Figure .III.27 :</b> Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.....	53

<b>Figure .III.28</b> : Inclusions gazeuses porosités de reprise.....	54
<b>Figure III.29</b> : Inclusions gazeuses porosités uniformes.....	55
<b>Figure III.30</b> : Inclusions de laitier.....	56
<b>Figure III.31</b> : Inclusions de tungstène.....	57
<b>Figure III.32</b> : Inclusions de cuivre.....	58
<b>Figure .III.33</b> : Excès de matière.....	59
<b>Figure.III.34</b> : Excès de pénétration.....	59
<b>Figure IV.1</b> : Pipelines au niveau de Cosider .....	65
<b>Figure IV.2</b> : Tronçons finie a bouira .....	65
<b>Figure IV.3</b> : Poste de soudure à l’arc électrique .....	66
<b>FigureIV.4</b> : Pipe welder soudage automatique .....	66
<b>Figure IV.5</b> : Opération de soudage automatique .....	67
<b>Figure IV.6</b> : Camsseur .....	67
<b>Figure IV.7:</b> Point zéro .....	68
<b>Figure IV.8</b> : Ruban gradue .....	68
<b>Figure IV.9</b> : Film radiographique .....	69
<b>Figure IV.10</b> : Fiche d’information .....	69
<b>Figure IV.11.12</b> : Fixation de film .....	70
<b>Figure IV.13</b> : Générateur de rayons x .....	71
<b>Figure IV.14</b> : Contrôleur de video .....	71
<b>Figure IV.15</b> : Développement des films .....	72
<b>Figure IV.16</b> : Séchage .....	72
<b>Figure IV.17</b> : Négatoscope .....	73
<b>Figure IV.18</b> : Manque de pénétration .....	74

<b>Figure IV.19 : Excès de pénétration</b> .....	74
<b>Figure IV.20 : Caniveaux</b> .....	74
<b>Figure IV.21 : Manque de pénétration</b> .....	74
<b>Figure IV.22 : Nid de soufflure</b> .....	75
<b>Figure IV.23 : Manque de fusion</b> .....	75
<b>Figure IV.24 : Zone saine</b> .....	75
<b>Figure IV.25 : Inclusion de laitier</b> .....	75

# Liste des symboles

**Ir:** Iridium

**Al:** Aluminium

**Mg:** Magnesium

**DN:** Diamètre nominal

**MIG:** Métal inerte gas

**MAG:** Métal active gas

**TIG:** Tungsten inert gas

**CND :** Contrôle non destructif

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

### **Introduction générale :**

Dans cette étude, la méthode d'inspection non destructive par rayons X est utilisée comme exemple de test.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

Différents types de défauts peuvent être observés dans le cordon de soudure, tels que (fissures, vides, inclusions solides, absence de fusion et de pénétration, défauts de forme, défauts divers).

Les techniques de détection des défauts sont réalisées par inspection visuelle et par inspection aux rayons X.

Dans l'application de la fluoroscopie à rayons X, l'attention est portée sur le domaine des assemblages soudés afin de déterminer l'utilité et l'efficacité de cette technique appliquée aux assemblages tubulaires soudés.

L'inspection par rayons X fournit une image fidèle et permanente du défaut, ce qui permet de définir la nature et l'emplacement du défaut. Cette définition est meilleure que celle des autres techniques d'inspection, en particulier pour les défauts de volume tels que les inclusions de gaz et de scories et les défauts de forme. Toutefois, cette technique reste moins sensible aux défauts linéaires.

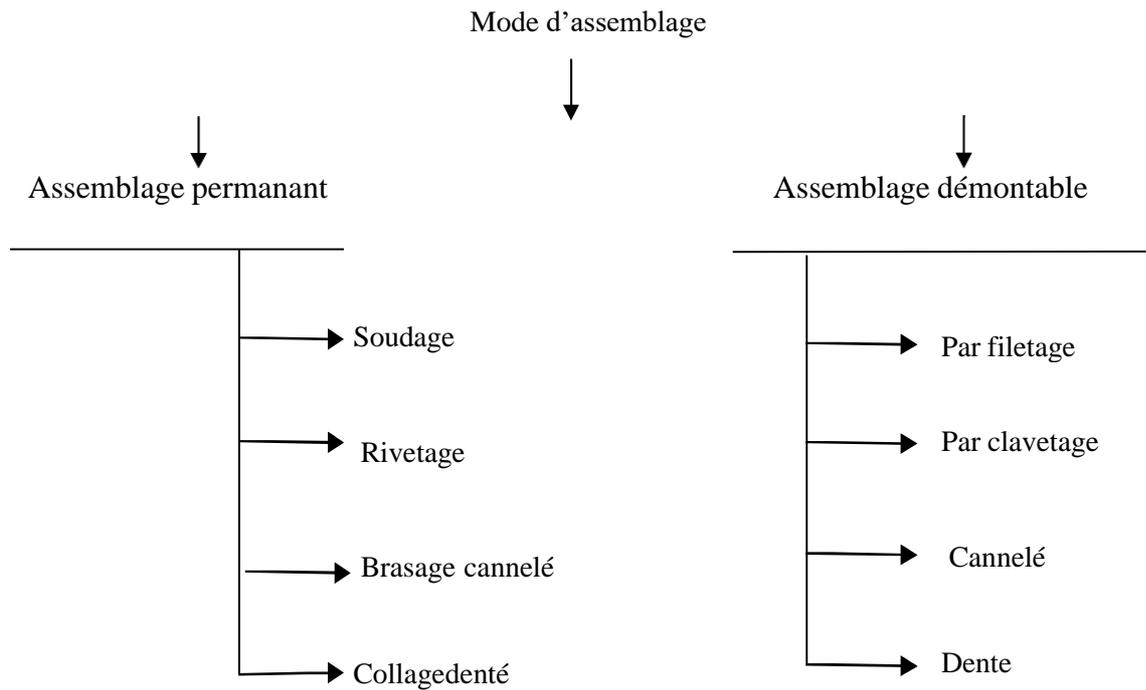
Quelle que soit l'efficacité des contrôles non destructifs, ils ne peuvent pas certifier entièrement les assemblages. Les fabricants d'assemblages soudés et de pipelines doivent utiliser au moins deux techniques d'inspection en plus de l'inspection spécifique des surfaces pour s'assurer que leurs produits répondent aux normes de qualité internationales. Cette approche nécessite l'accréditation du personnel d'inspection et la conformité aux normes qui spécifient chaque technique, ses conditions et ses résultats [1].

# **Chapitre I**

## **Technologie de soudage des pipes**

**I.1.Introduction :**

Le processus de soudage de tuyaux nécessite la formation d'une connexion métallique continue entre les pièces à assembler. Cela signifie qu'il n'y a pas de matériau non métallique entre les pièces à assembler. Contrairement au rivetage, à l'agrafage ou au collage, cette méthode d'assemblage est distincte. Le schéma ci-dessous présente les types d'assemblage les plus couramment utilisés [2].



**Figure I.1 : Méthodes d'assemblage**

**I.2.Clasement des procédés de soudage:**

Les procédés de soudage peuvent être classés de différentes manières, notamment en fonction de différentes conditions. Une classification plus complète est basée sur les sources d'énergie et les moyens de prévention de la pollution atmosphérique. A titre d'exemple, nous pouvons donner les principes de certains des procédés de soudage les plus couramment utilisés [1].

## I.2.1.Soudage manuel à l'arc :

### a).Source d'énergie :[8]

La source d'énergie est l'électricité, et la chaleur est générée par l'arc créé entre l'électrode enrobée et la pièce à assembler, le courant peut être du courant continu ou du courant alternatif.

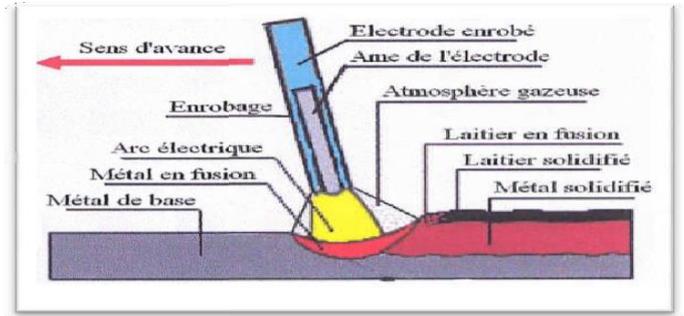


Figure I.2 : Soudage manuel à l'arc.

### b).Métal d'apport :

Le métal d'apport prend la forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre dunoyau métallique et la chimie du revêtement.

### c).Eléments de protection :

Le gaz produit par la décomposition du revêtement dans l'arc garantit que le bain fondu est protégé de la contamination atmosphérique.

### d).Domaine d'utilisation :

Le perçage manuel à l'arc convient à l'assemblage de métaux ferreux et de certains métaux non ferreux. En effet, il permet de souder tous types de joints dans toutes les positions et deréaliser toutes les épaisseurs à partir de 1 mm

### e).Avantages :

Comme avantages de ce procédé, nous pouvons citer ses coûts d'équipement réduits et les possibilités qu'il offre pour des joints soudés de différents types, dans toutes les positions et de différentes épaisseurs.

### f).Inconvénients :

Les inconvénients de ce procédé sont une faible productivité et la nécessité d'opérateurs qualifiés pour obtenir des soudures de bonne qualité. De plus, des mesures doivent être prises pour éliminer les scories de protection.

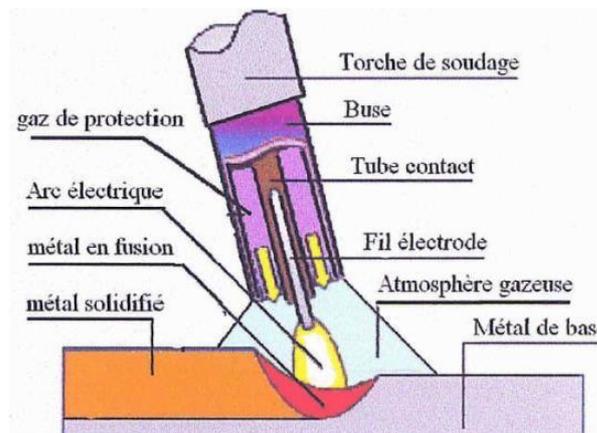


**Figure I.3 :** Soudage des pipelines (type manuel).

### I.2.2. Soudage semi-automatique sous protection gazeuse (MIG/MAG) : §

#### a). Source d'énergie :

Il s'agit d'un procédé de soudage semi-automatique. La fusion du métal est obtenue grâce à l'énergie thermique dégagée par un arc électrique qui se déclare dans une atmosphère protectrice entre le fil de l'électrode fusible et le composant à assembler.



**Figure I.4 :** Soudage semi-automatique.

Les abréviations MIG et MAG signifient respectivement en anglais : Metal Inert Gas et Metal Reactive Gas. La différence entre les deux procédés réside dans la composition du gaz. Le procédé MIG utilise un gaz neutre (argon ou argon + hélium) qui ne réagit pas avec le métal en fusion, contrairement au procédé MAG qui utilise des proportions différentes d'argon et de dioxyde de carbone ou d'oxygène moléculaire selon le mélange de métal à souder. Du gaz est injecté en continu dans l'arc pour isoler complètement le métal en fusion de l'air ambiant.

### **b).Métal d'apport :**

Le métal d'apport est soit un fil plein, soit un fil fourré et son diamètre varie de 0,5 à 3,2mm.

### **c).Elément de protection:**

La protection du bain de fusion est assurée principalement par un flux continu de gaz inerte (argon) ou réactif (CO<sub>2</sub>) ou de fil fourré.

### **d).Domaine d'utilisation:**

Ce procédé convient à l'assemblage de métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tous types de joints dans toutes les positions et avec une épaisseur de 0,5 mm.

### **e).Avantage:**

L'un des principaux avantages du soudage sous protection gazeuse est qu'il s'agit d'un processus semi-automatique ou automatique qui nécessite peu d'opérations de finition et est nettement plus productif que le soudage à l'arc manuel.

### **f).Inconvénients:**

Pour des raisons d'approvisionnement en fil de soudage, les opérations de soudage ne peuvent pas être effectuées trop loin de la source d'alimentation. Par conséquent, la résistance du soudage est liée à la perte de fil, ce qui entraîne certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage.

## **I.2.3.Soudage sous gaz inerte avec électrode en tungstène (TIG) :**

### **a).Source d'énergie :**

La protection du bain de fusion est assurée principalement par un flux continu de gaz inerte (argon) ou réactif (CO<sub>2</sub>) ou de fil fourré.

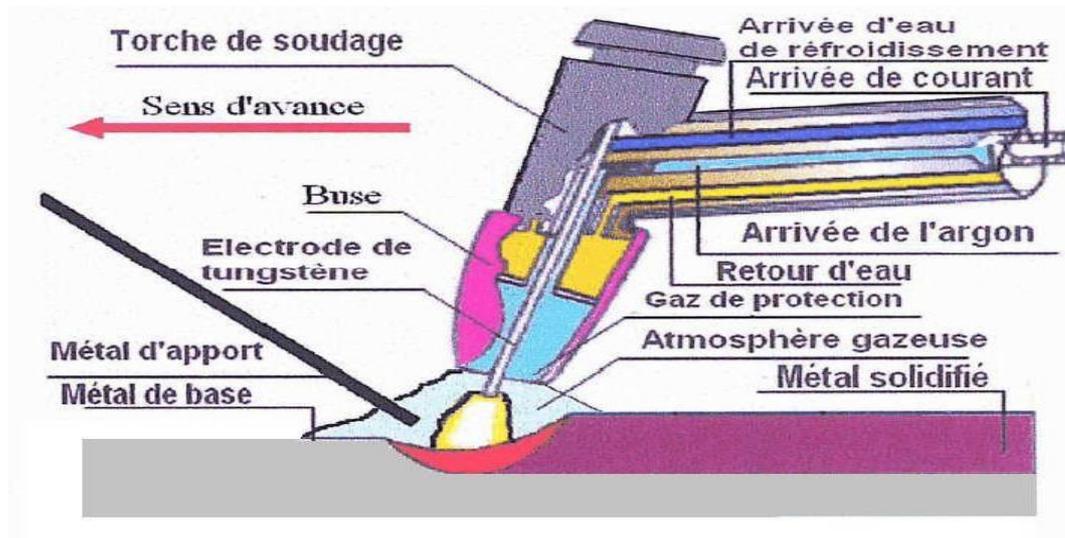


Figure I.5 : Soudage sous gaz inerte.

**b).Métal d'apport :**

Ce procédé convient à l'assemblage de métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tous types de joints dans toutes les positions et avec une épaisseur de 0,5 mm.

**c).Elément de protection:**

L'un des principaux avantages du soudage sous protection gazeuse est qu'il s'agit d'un processus semi-automatique ou automatique qui nécessite peu d'opérations de finition et est nettement plus productif que le soudage à l'arc manuel.

**d).Domaine d'utilisation :**

Pour des raisons d'approvisionnement en fil de soudage, les opérations de soudage ne peuvent pas être effectuées trop loin de la source d'alimentation. Par conséquent, la résistance du soudage est liée à la perte de fil, ce qui entraîne certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage.

**e).Avantages :**

Le procédé produit des joints de haute qualité, convient à différents métaux et peut être facilement autorisé pour le soudage sans métal d'apport. Convient à de nombreux métaux différents et peut être facilement autorisé pour le soudage sans métal d'apport.

### f).Inconvénients:

Ce procédé nécessite une préparation minutieuse du joint, une grande précision dans la réalisation des chanfreins et la propreté des pièces à souder.

### I.3.Soudage automatique :

#### I.3.1.Definition :

Les robots de soudage TIG-MIG sont conçus pour le soudage TIG (acier et inox) et MIG(acier, inox et aluminium), permettant de se positionner sur une série de pièces répétitives et d'améliorer le rapport coût/performance (Figure I.6) . Nous avons remarqué que certaines soudures étaient difficiles à réaliser sans robot.

#### a).Avantages:

- Taux d'intérêt sur les dépôts élevés.
- Les soudures ont de meilleures propriétés mécaniques et chimiques.
- Réduisez la fatigue du soudeur.
- Temps de formation du soudeur réduit.
- Les joints longs peuvent être soudés.
- Peut-être soudé dans toutes les positions.
- Économie de temps.
- Le cycle de service atteint généralement 100 %.



**Figure I.6 :** Soudage des pipelines type automatique.

### **b).Choix du métal de base:**

Le choix du métal de base se fait généralement en termes de soudabilité, il n'appartient donc pas au bureau d'études de sélectionner la nuance d'acier lors du dimensionnement de la structure. Les méthodes de sélection des métaux de base ne prennent généralement en compte que le risque de rupture fragile, en supposant que d'autres aspects de la soudabilité soient pris en compte lors de l'assemblage. Ainsi, la sélection des métaux de base pour une classe structurelle donnée repose sur une classification en fonction des propriétés des métaux à souder, qui donnent leur domaine d'utilisation, leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques.

### **c).Choix du métal d'apport:**

Le métal d'apport doit être sélectionné pour obtenir un joint présentant une uniformité maximale en termes de propriétés mécaniques, de composition chimique et de structure métallurgique. Une homogénéité complète est souvent difficile à obtenir. En pratique, le choix du métal d'apport dépend de la nature du métal de base et d'exigences qui peuvent varier considérablement, et la manière dont ces exigences sont respectées dépend du procédé de soudage utilisé. Les catalogues développés par les producteurs de métaux d'apport en collaboration avec les producteurs de métaux de base peuvent fournir des informations pour guider la sélection.

### **I.4.Préparation des joints à souder:**

La qualité d'un joint soudé dépend en grande partie du soin apporté à la préparation des pièces à assembler. Une bonne préparation ne doit pas modifier de manière significative les propriétés mécaniques ou métallurgiques des pièces à souder et doit être d'une précision suffisante pour faciliter le soudage. En effet, si la géométrie du chanfrein initial n'est pas uniforme sur toute la longueur du joint ou si le métal de la pièce est altéré ou fissuré, il est difficile, voire parfois impossible, de réaliser une pièce performante à l'usage. Par manque de préparation. Par conséquent, le choix approprié des opérations de préparation du chanfrein est très important, car la géométrie et l'état de surface de la zone à souder affectent directement la qualité de la soudure [6].

### **I.5.Types des joints soudés:**

Le but de la modification et de la préparation des composants est de garantir la profondeur de soudure souhaitée et de faciliter la réalisation des assemblages soudés. Les éléments clés qui influencent la préparation de ces articulations sont :

- Positions pour le soudage.
- Procédés de soudage.

- Les mesures des composants à assembler.
- L'étendue de la pénétration dans la soudure.
- Coûts associés à la préparation.
- Les quantités de métal à déposer.
- La composition du métal utilisé dans les composants.

La gamme de variations de ces facteurs est élargie par les différents procédés de soudage et les conditions qu'ils imposent. En se concentrant sur les assemblages bout à bout, qui sont les plus répandus dans les constructions en acier, les soudures bout à bout servent à relier deux ou plusieurs composants, maintenant généralement la continuité complète de la section de ces éléments uniquement à travers le métal d'apport de soudure. Ces soudures peuvent être réalisées sur des bords relevés, des bords non chanfreinés ou des bords chanfreinés, avec ou sans support. Les types de chanfreins associés à cette technique de soudage comprennent V, Y, demi-V, X, K, U, J, demi-U et double U.

### **I.6. Contrôle des joints soudés:**

Quelle que soit la méthode de fabrication, obtenir des produits avec une qualité clairement définie et constante nécessite non seulement la vérification de la conformité des pièces finies, mais également le maintien des facteurs influençant la qualité finale dans les normes attendues tout au long des différentes étapes de fabrication. Se fier uniquement à une inspection finale concernant la production de pièces non conformes, rendant impossible la résolution du problème une fois qu'il est trop tard. Ceci est particulièrement pertinent dans le domaine du soudage, où de nombreux facteurs complexes ont un impact sur la qualité. C'est pourquoi trois types de contrôles distincts sont généralement mis en œuvre [7].

#### **I.6.1. Contrôle avant le soudage:**

Son objectif est de vérifier :

- Le projet a été conçu de manière appropriée en termes de placement des soudures, de séquence et de vitesse d'exécution, les joints étaient facilement accessibles et correctement positionnés, et la séquence d'exécution a évité autant que possible les déformations.
- Le métal de base est soudable dans les conditions prévues.
- Le matériau entrant ou le flux possible a une masse spécifiée.
- Le soudeur est suffisamment qualifié pour effectuer le travail requis.

#### **I.6.2. Contrôle pendant le processus de soudage :**

Son objectif est de vérifier :

- Préparation correcte des bords, ancrage et positionnement des panneaux
- Le procédé est mis en œuvre conformément aux règles de l'état de l'art.

### **I.6.3. Contrôle post-soudage :**

Il s'agit d'effectuer certains tests sur les composants terminés afin de pouvoir agir en temps opportun sur les causes des changements de qualité [9].

### **I.7. Conclusion:**

À première vue, le soudage semble être une technologie d'assemblage simple, mais en réalité, la technologie du soudage est une technologie d'assemblage simple. Mais en approfondissant un peu, la complexité du processus et ses domaines d'application constituent un sujet très vaste. Il n'est donc pas facile d'étudier complètement cette technologie. En raison des défauts naturels du processus de soudage, des problèmes de qualité des composants soudés surviennent toujours, ce qui nous oblige à trouver des solutions pour les résoudre chaque fois que le contrôle des composants soudés apparaît [10].

## **Chapitre II**

### **Les contrôles destructifs et non destructifs**

### II.1.Introduction :

Dans l'industrie, les exigences croissantes en matière de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité imposent des défis importants. En production, il est essentiel de dimensionner les pièces avec précision tout en garantissant leur disponibilité et performance. Lors de l'exploitation d'un produit, le maintien en bon état de marche et en toute sécurité nécessite une connaissance approfondie de l'évolution des pièces. Cette connaissance exige des contrôles qui préservent l'intégrité des pièces et minimisent les interruptions. C'est là que le contrôle non destructif (CND) prend toute son importance. Les principales applications du CND incluent la détection de défauts, la mesure d'épaisseur et l'identification des métaux et alliages. Dans les industries métallurgiques, cela concerne souvent l'inspection de tubes ou de barres pendant leur fabrication. En aéronautique, le CND est utilisé pour détecter les fissures, évaluer les dommages thermiques et identifier les couches de corrosion cachées [16].

On distingue plusieurs techniques de contrôle non destructif, dont principalement :

- Les ultrasons,
- Les rayons X ou Gamma,
- Le ressuage ou la thermographie infrarouge,
- La magnétoscopie,
- Les courants de Foucault.

### II.2. Les contrôles destructifs :

Principalement utilisé pour la production de masse, ce processus consiste à sélectionner des composants spécifiques parmi un ensemble de pièces soudées. [16]

#### II.2.1.Essai de traction :

L'essai de traction est une expérience en physique utilisée pour obtenir des informations sur le comportement élastique, le comportement plastique, et le degré de résistance à la rupture d'un matériau soumis à une sollicitation uniaxiale. Certains objets manufacturés doivent atteindre un certain niveau de solidité pour supporter des charges, des poids, et d'autres types d'efforts. Cet essai permet de caractériser les matériaux indépendamment de la forme de l'objet sollicité, ou encore de la performance d'un assemblage mécanique.

Comme tous les essais mécaniques, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, éloignée des sollicitations réelles, mais maîtrisable et reproductible. Il consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture.

On enregistre alors l'allongement et la force appliquée, convertis ensuite en déformation et contrainte.

Une variante moderne de cet essai utilise la force centrifuge sur un assemblage pour générer une contrainte de traction. Lorsque la valeur limite de résistance à la traction (exprimée en MPA ou  $N/mm^2$ ) d'un assemblage ou d'un collage atteint la force centrifuge appliquée, la rupture se produit, permettant d'enregistrer cette limite de rupture.

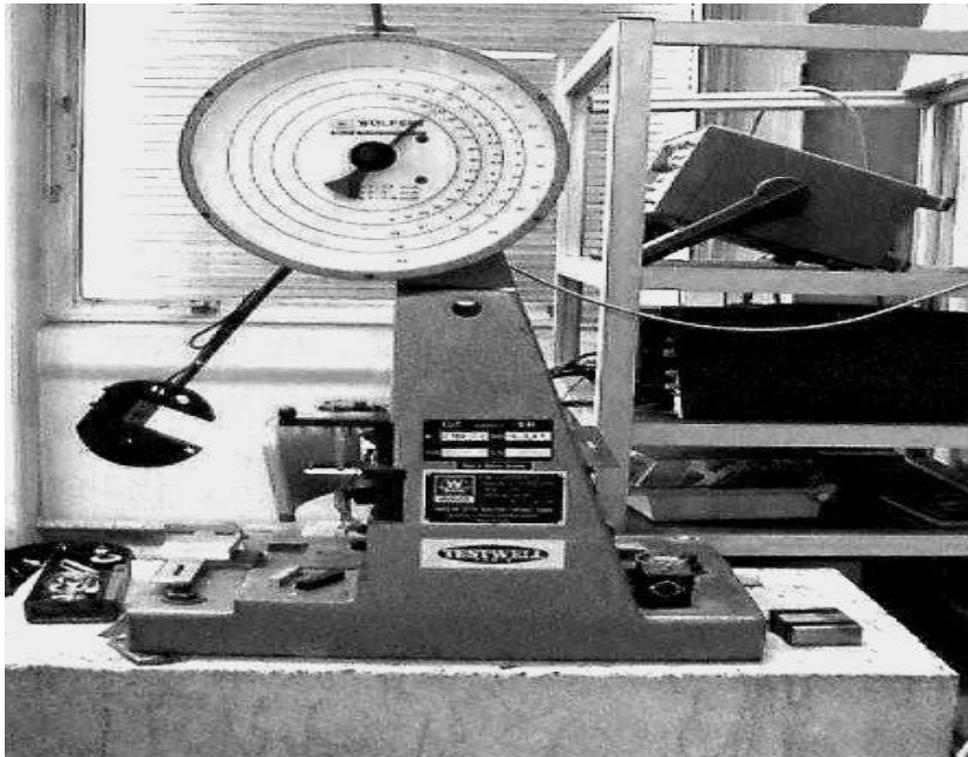
L'avantage de cette méthode est de pouvoir tester simultanément plusieurs éprouvettes sous une contrainte strictement identique (Figure II.1).[5].



**Figure II.1** : Essai de traction

**II.2.2. Essai de résilience Charpy :**

L'essai de flexion par choc Charpy réalisé sur éprouvette entaillée est destiné à évaluer la résistance à la rupture d'un matériau. Cette méthode est communément appelée test de résilience Charpy ou simplement test Charpy (Figure II.2).[5]



**Figure II.2 :** Essai de résilience.

**II.2.3. Essai de dureté :**

Le test de dureté consiste à appliquer un pénétrateur, soit un cône de diamant, soit une bille d'acier, sur la surface du composant en deux étapes. Dans les conditions conventionnelles établies, l'augmentation résiduelle de la profondeur de pénétration est ensuite mesurée. Il existe plusieurs types d'essais de dureté.

- Test Brinell-HB : Une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène, d'un diamètre spécifié, sert de pénétrateur et est soumise à une charge en Newtons pendant 15 secondes, après quoi le diamètre de l'indentation résultante est mesuré.
- Test Vickers-HV : Le pénétrateur est constitué d'une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de  $136^\circ$ , qui est placée sous une charge  $F$ , et les diagonales de l'indentation sont ensuite mesurées.

- Le test Rockwell C-HRC implique un pénétrateur à cône en diamant avec un angle de  $120^\circ$  et une charge de 1 373 N. On mesure l'augmentation de profondeur ou la dépression résiduelle.
- Une bille en acier trempé d'un diamètre de 1,6 mm sert de pénétrateur, appliquant une charge de 883 N, et l'augmentation de profondeur ou l'indentation résiduelle qui en résulte est enregistrée [5].



**Figure II.3 :** Essai de dureté

### II.3. Les contrôles non destructifs :

Le processus de contrôle non destructif des soudures (CND) comprend une série d'examen et de tests qui garantissent l'intégrité de la soudure ou de l'assemblage sans causer de dommages. Le choix de la méthode de test appropriée est influencé par le type d'assemblage, les caractéristiques des matériaux impliqués et l'équipement spécifique utilisé [16].

#### II.3.1. le contrôle visuel :

Avant d'appliquer toute autre technique de CND, cette forme de contrôle non destructif est utilisée. Réalisée à l'œil nu, cette méthode de contrôle est capable d'identifier toute irrégularité de surface. Comme elle repose sur l'observation, il est essentiel d'établir et d'améliorer les conditions d'observation. L'inspection visuelle peut révéler des défauts de forme et divers problèmes présents sur les surfaces des joints soudés, offrant des informations telles que l'apparence du métal, la largeur du cordon, l'inclinaison de la rainure, etc.

- **Les avantages :**
  - Examen facile, rapide et économique.
  - Flexibilité dans l'inspection.

- **Les inconvénients :**

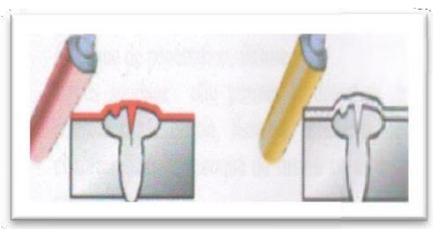
- Détection limitée aux défauts de surface ;
- Nécessité d'une surface propre ;
- Aucun obstacle ne doit interférer entre l'œil et la pièce examinée.(Figure II.4).



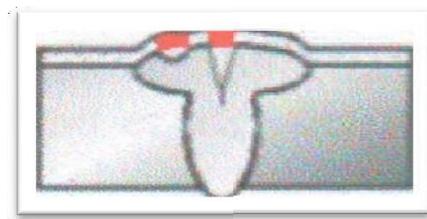
**Figure II.4 :** Contrôle visuel

**II.3.2.Le ressuage :**

Le contrôle par ressuage est une technique conçue pour identifier les défauts de surface, améliorant ainsi l'examen visuel des défauts. Cette méthode permet de découvrir les imperfections qui se manifestent à la surface et est particulièrement utilisée pour les matériaux non magnétiques, tels que les alliages à base d'Al, de Cu, de Ti et les aciers inoxydables. Le processus est assez simple. Il implique l'absorption du pénétrant par une couche de révélateur en poudre, et le mécanisme de révélation des défauts dans le contrôle par ressuage se déroule en quatre étapes : l'application du pénétrant, suivie d'une période d'imprégnation désignée, l'élimination de l'excès de pénétrant de la surface et enfin, le saignement du pénétrant par l'application d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'observateur verra les défauts à mesure que le pénétrant s'étale sur le révélateur, ce qui entraîne un changement distinct de couleur ou de luminosité.



**Pénétrant Révélateur**



**Ressuage**

**Figure II.5:** Etapes du contrôle par ressuage.

### ● Les avantages :

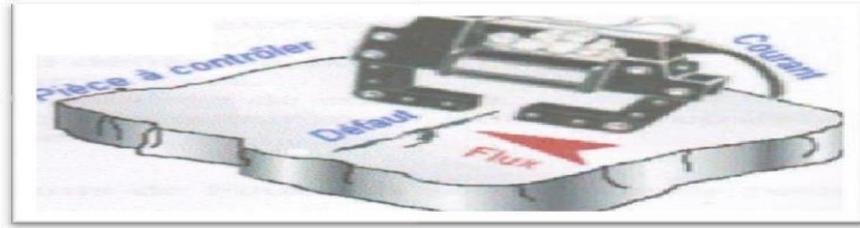
- Facile à appliquer manuellement sur le chantier.
- Insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface.
- Capable de détecter de petits défauts pouvant causer des fuites.
- Possibilité de mise en place de lignes de contrôle automatisées.
- Efficace sur les métaux non ferromagnétiques où les contrôles magnétoscopiques sont inefficaces.
- Utilisable sur les matériaux ferromagnétiques dans les cas où la désaimantation est critique ou lorsque la géométrie des pièces est trop complexe.

### ● Les inconvénients du contrôle par ressuage :

- Incapacité à détecter les défauts internes ou obstrués.
- Nécessité d'un nettoyage rigoureux des pièces avant contrôle.
- Certains procédés nécessitent des opérateurs expérimentés.
- Utilisation de produits inflammables, volatils et nocifs.
- Gestion des déchets liquides rejetés dans les égouts.

### II.3.3. La magnétoscopie :

La magnétoscopie, une méthode de contrôle non destructif, est exclusivement appliquée aux matériaux ferromagnétiques (comme le fer, l'acier, ou la fonte). Elle permet de détecter des discontinuités à la surface ou juste en dessous. Bien que plus restrictive que le ressuage, la magnétoscopie est souvent privilégiée lorsqu'elle est applicable, en raison de sa rapidité d'exécution. Le processus consiste à aimanter la pièce à inspecter, ou une partie de celle-ci, à l'aide d'un champ magnétique constant et suffisamment puissant (figure II.8). Les discontinuités en surface ou sous-jacentes perturbent les lignes de force du champ magnétique, créant ainsi des flux de fuite. Ces flux sont révélés par des particules magnétiques micronisées déposées sur la surface de la pièce. En attirant ces particules, les flux de fuite mettent en évidence les discontinuités par des signatures distinctes. Cependant, la détection optimale des discontinuités se fait lorsque celles-ci sont perpendiculaires aux lignes de force du champ magnétique. Pour garantir une détection complète des discontinuités à la surface d'une pièce, il est nécessaire de procéder à deux aimantations orthogonales (Figure II.6).

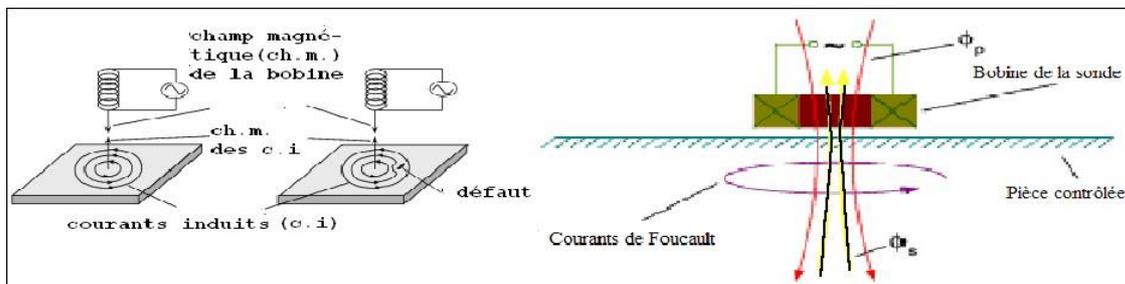


**Figure II.6 :** Alimentation pour le contrôle magnétoscopique.

- Avantages du contrôle magnétique des poudres
  - Opération manuelle facile sur site Économique Résultats presque immédiats.
  - Détection des défauts de substrat mat et des défauts ouverts bouchés.
- Inconvénients du contrôle par poudrage magnétique
  - L'inspection est limitée aux matériaux ferromagnétiques.
  - Les défauts profonds (>2 mm de profondeur) ne peuvent pas être détectés.
  - Les opérateurs doivent être formés et expérimentés.
  - Risque d'interprétation d'images incorrectes (sur filetage de vis par exemple).
  - Risque électrique dû au courant continu.
  - Risque de microfissures dans certains aciers sensibles.
  - La démagnétisation après l'inspection est obligatoire.
  - Restrictions concernant l'inspection de grandes pièces.

### II.3.4. Les courants de Foucault:

Les courants de Foucault permettent de réguler la compacité des métaux conducteurs d'électricité. La profondeur du contrôle est influencée à la fois par les propriétés magnétiques et électriques du matériau étudié, allant d'une fraction de millimètre pour l'acier à plusieurs millimètres pour le titane, ainsi que par la fréquence de la sonde utilisée. Ce processus de contrôle consiste à comparer les signaux détectés lors du déplacement de la sonde à ceux produits par des défauts artificiels créés sur un bloc standard de la même nuance (Figure II.7).



**Figure II.7 :** Détection des défauts par les courants de Foucault.

### ● **Avantage :**

- Le contrôle nécessite l'accès à un seul côté de la pièce.
- Contrôle sans contact ni besoin de milieu de couplage pour tous les métaux conducteurs.
- Possible à des températures élevées (supérieures à 900°C).
- Vitesse de contrôle élevée (par exemple, contrôle de fils défilant à 100 m/s).
- Capteurs personnalisés pour des applications spécifiques.
- Automatisation relativement simple du processus de contrôle, si nécessaire.
- Peut-être une alternative au ressuage ou à la magnétoscopie, particulièrement pour la détection de défauts en service lors des opérations de maintenance.

### **II.3.5. Les ultrasons:**

Le contrôle non destructif par ultrasons utilise des transducteurs piézoélectriques pour générer des ondes ultrasoniques qui se propagent à travers la pièce à contrôler et sont analysées. Les ondes ultrasoniques sont réfléchies par le fond de la pièce et les discontinuités du matériau. La localisation du défaut dans la profondeur de la pièce est déterminée par la position des échos obtenus sur l'échogramme. Les amplitudes relatives des différents échos donnent une indication de la taille du défaut. En revanche, les anomalies de surface sont difficiles à détecter. La méthode est applicable à tous les matériaux qui ne présentent pas une très forte atténuation ou une grande anisotropie, tels que les matériaux métalliques, les matériaux composites et les céramiques. Elle offre une grande sensibilité de détection, atteignant 1 mm à 0,2 mm dans le cas de l'acier, par exemple, et permet de détecter des défauts localisés dans le volume de pièces épaisses (figure II.8).



**Figure II.8 :** Contrôle par ultrasons des soudures.

- **Avantage :**

- Accessible d'un seul côté du composant.
- Haute précision dans la détection des défauts de plan.
- Possibilité de contrôler la compacité de l'ensemble du volume.
- Positionnement des marques détectées en fonction de l'épaisseur.
- Estimation de l'importance d'une marque par l'intensité de la réflexion (test de réflexion) ou l'atténuation (test de transmission).
- Peut-être automatisé et contrôlé à l'aide d'un dispositif d'imagerie.

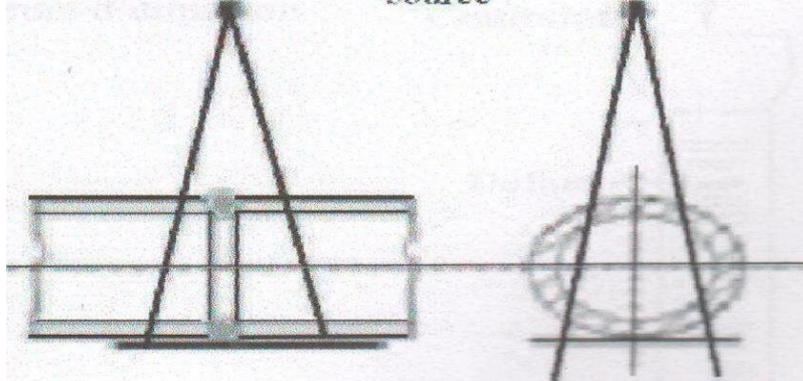
- **Inconvénients :**

- Nécessite l'utilisation d'un liant entre la sonde et la pièce.
- Difficile d'interpréter la nature et la taille des défauts nécessitent un personnel qualifié.
- Difficile à utiliser sur certains matériaux (par exemple la fonte).
- Très dépendante de la sensibilité à la direction du défaut.

### **II.3.6. Contrôle par radiographie :**

La radiographie est une méthode largement utilisée pour examiner l'intérieur des composants. Elle consiste à faire passer un faisceau de lumière ionisante de très courte longueur d'onde à travers le

matériau à examiner. En traversant la pièce, l'énergie photonique de ce faisceau est partiellement absorbée par le matériau qu'il rencontre, en fonction de son intensité. Les défauts sont visualisés par des changements d'intensité locale (Figure II.9).



**Figure II.9 :** Contrôle radiographique des soudures

### II.4. Les rayons X et rayons Gamma :

Dans le domaine des contrôles non destructifs, la radiographie aux rayons X et la radiographie gamma sont deux techniques étroitement liées qui exploitent les caractéristiques des rayons X et gamma lorsqu'ils pénètrent dans les matériaux. L'absorption du rayonnement émis varie en fonction de la nature, de la densité et de l'épaisseur du matériau. À la sortie, ce rayonnement expose un film qui, une fois développé, révèle des variations de noircissement indiquant des différences dans le matériau. Une évaluation précise du type et de l'importance des défauts éventuels du composant examiné suivra l'interprétation du film.

Les rayons X :

Les rayons X sont produits lorsqu'un flux d'électrons, accéléré par une différence de potentiel élevée, s'arrête brusquement lorsqu'il heurte une plaque métallique correctement positionnée. Les équipements standards utilisent généralement des électrons accélérés dans une plage de différence de potentiel de 20 à 400 KV. Cette différence de potentiel est un facteur déterminant.

L'énergie cinétique atteinte par les électrons est remarquable. Il est important de souligner que seule une partie de cette énergie cinétique est convertie en rayons X, tandis que la plus grande partie est libérée sous forme de chaleur.

Les rayons X ont des longueurs d'onde allant de  $10 \text{ \AA}$  à  $0,001 \text{ \AA}$ . Par conséquent, en modifiant la différence de potentiel, on peut obtenir la longueur d'onde souhaitée pour les rayons X.

Les rayons gamma :

Certaines substances radioactives émettent également des ondes électromagnétiques d'une longueur d'onde adaptée à la radiographie.

Des photons (rayons gamma) sont émis lors de la désintégration de noyaux atomiques instables. Les substances radioactives anciennes et naturelles (radium, mésotrium).

Caractéristiques et propriétés des rayons X et des rayons gamma :

Les rayons X et gamma sont des ondes électromagnétiques, similaires aux ondes hertziennes, à la lumière visible et aux rayons ultraviolets, mais se distinguent par leurs longueurs d'onde plus courtes. En radiographie des soudures, les longueurs d'onde des rayons X et gamma utilisées se situent dans une certaine plage. C'est la longueur d'onde qui détermine la capacité de pénétration des rayonnements. La différence principale entre les rayons X et gamma réside dans leur mode de production et leur distribution spectrale [13].

### **II.5. Choix d'une substance radioactive:**

Lorsque l'utilisation d'une source de rayons gamma est requise, il est nécessaire de sélectionner l'un des radio-isotopes suivants. Ce choix dépend de la qualité d'image souhaitée, du temps d'exposition acceptable, ainsi que d'autres critères spécifiques [13].

**II.6.Comparaison entre la radiographie X et gamma :**

Le tableau suivant montre la comparaison (Tableau II.1).

**Tableau II.1:** Comparaison entre la radiographie X et gamma.

	<b>Rayons X</b>	<b>Rayons gamma</b>
Alimentation	Alimentation électrique indispensable à partir d'une ligne ou d'un générateur.	Pas d'alimentation électrique, mais certains conteneurs sont manœuvrés électroniquement.
Contrôle	Les appareils de mesures du tableau de commande doivent être vérifiés durant l'exposition; des ajustements mineurs doivent être effectués.	Pas de contrôle autre que ceux exigés par la sécurité.
Poids et dimensions.	Les appareils sont volumineux et relativement lourds	La source de rayons gamma avec son conteneur de protection peut être relativement légère. Exception faite toutefois pour les sources de Co60, surtout dans le cas d'examen de forte épaisseur (>100mm) lequel exige un conteneur de protection qui est lourd.
Manipulation.	Le temps de mise en place est considérable et celle-ci est même parfois difficile,	Le transport et la mise en place sont relativement simples excepté pour les grosses sources de Co60.
Protection contre le rayonnement.	Le danger existe seulement durant l'exposition mais le risque de radiation relativement fort pendant ce temps.	Le danger existe en permanence: les sources doivent être surveillées aussi pendant le transport, le stockage,.... etc

**II.7. Variation de l'intensité de radiation :**

L'objectif de la radiographie est de produire une image claire et précise des défauts d'une pièce. Ces images résultent des changements d'intensité du rayonnement après sa pénétration dans la pièce examinée.

De plus, les rayons X et les rayons gamma peuvent pénétrer des matériaux opaques à la lumière normale. Il faut cependant noter que l'intensité du faisceau émis est plus faible que celle du faisceau incident [12].

**II.8. Appareils à rayon X pour radiographie industrielle :**

Un appareil à rayons X est composé des éléments essentiels suivants : un tube à rayons X, un générateur haute tension, des circuits d'alimentation, et un coffret de commande.

**II.8.1. Tube à rayons X :**

Les tubes à rayons X sont constitués d'une ampoule de verre maintenue dans un vide poussé. L'ampoule contient une cathode, un filament et une contre-cathode (ou anode).

**a). Filament :**

Le filament est un fil (généralement du tungstène) enroulé dans une forme appropriée qui émet des électrons lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée. Lorsque le tube à vide est activé, un courant d'électrons circule du filament vers l'anticathode.

Le filament se trouve au centre d'un récipient conçu pour concentrer le flux d'électrons dans une zone confinée de l'anticathode. Ce conteneur est connecté à la cathode mais dispose d'une alimentation électrique différente.

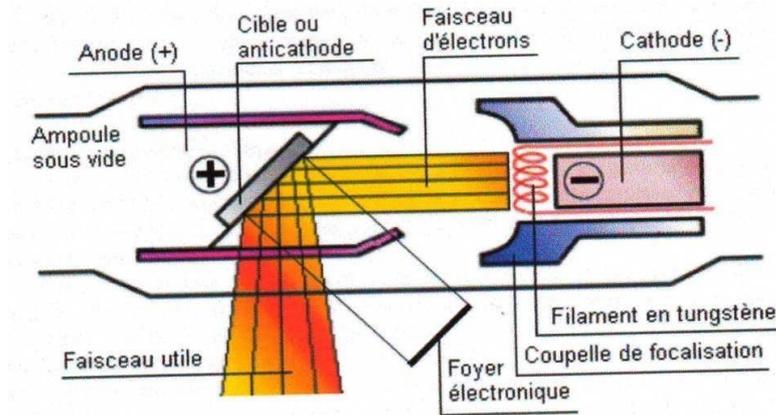
**b). Anticathode ou anode :**

L'anode est une masse de métal (généralement du cuivre) ayant une bonne conductivité thermique et l'anticathode est une pastille de forme appropriée (cible) faite d'un métal à point de fusion élevé (généralement du tungstène) incliné à un angle de 60° à 70° par rapport à la direction d'incidence des électrons accélérés. L'anode est reliée au pôle positif du circuit haut tension.

Seule une petite fraction (moins de 1%) de l'énergie émise est utilisée pour produire des rayons X, le reste étant converti en chaleur. Par conséquent, les équipements de production de rayons X nécessitent un système de refroidissement efficace pour évacuer la chaleur et préserver la durée de vie des tubes.

### c). Enceinte extérieure :

Les tubes sont placés dans une enveloppe métallique mise à la terre et remplie d'un liquide isolant (huile) ou d'un gaz isolant (fréon), et une gaine de plomb ou d'un autre matériau lourd recouvre l'enveloppe pour absorber les fuites de rayons X (Figure II.10).



**Figure II.10 :** Tube à rayant X.

### d).Avantages :

- **Documentation de contrôle conservable :** Les films radiographiques peuvent être produits, photographiés, examinés et analysés longtemps après la prise de la première image. Les ombres des défauts sont visibles, ce qui facilite leur identification.
- **Équipement robuste :** L'équipement est conçu pour être durable et fiable.
- **Autonome :** Aucun besoin d'alimentation électrique pour le contrôle des rayons gamma.
- **Imagerie panoramique :** La possibilité de réaliser des images panoramiques est offerte.
- **Numérisation avec traitement d'image :** Le traitement numérique des images permet une meilleure détection des défauts difficiles à identifier.

### e). Inconvénients :

- **Expertise requise :** L'interprétation des images nécessite un niveau élevé de compétence de la part de l'opérateur.
- **Protection du personnel :** Il est essentiel de mettre en place des dispositifs et des procédures de sécurité pour protéger le personnel.
- **Coût et sécurité :** Cette technique est extrêmement coûteuse et requiert des conditions de sécurité strictes.
- **Limitation de détection :** Il existe un risque de ne pas détecter les fissures alignées avec l'axe du faisceau.

### **II.9. Augmentation de la durée d'utilisation:**

Les essais non destructifs permettent :

- De localiser les zones soumises à des contraintes mécaniques.
- D'identifier les défauts résultant de la fatigue des matériaux.
- D'éviter les dysfonctionnements d'équipements critiques.
- De prévenir les ruptures d'équipements.
- De réduire les coûts de maintenance et de production [5].

### **II.10. Augmentation de la sécurité :**

Les essais non destructifs permettent d'éviter :

- Les accidents.
- Les pertes humaines.
- Les dommages matériels [5].

### **II.11. Augmentation de l'identification des matériaux :**

Les essais non destructifs permettent de classer les matériaux et de différencier :

- Les compositions chimiques.
- Les traitements thermiques.
- Les propriétés métallurgiques.
- Les propriétés physiques.

### **II.12. Conclusion:**

Comme il existe différents types de contrôle et de gestion, l'utilité d'un test ne peut être reconnue sans connaître les domaines d'application, les avantages et les inconvénients d'autres tests et sans distinguer leur importance et leur raison d'être en les comparant avec le test examiné [5].

## **Chapitre III**

### **Contrôle des joints soudés par radiographie**

#### **Automatisée**

### III.1.Définitions :

Les scanners pour pipelines sont spécialement conçus pour le contrôle non destructif (CND) des soudures bout à bout environnementales lors de la construction d'installations tubulaires telles que les oléoducs et les gazoducs.

Les scanners pour pipelines peuvent faire fonctionner divers générateurs de rayons X et équipements de radiographie gamma, permettant la radiographie interne panoramique monocouche (SWSI) de tuyaux d'un diamètre compris entre 10 et 48.

Il est fabriqué à partir de matériaux de haute qualité, présente une bonne surface, une bonne résistance à la corrosion, est facile à entretenir et a une longue durée de vie. Les circuits électroniques dotés de composants répondant à des spécifications militaires garantissent la fiabilité de l'appareil dans les environnements difficiles. Équipé de batteries plomb-acide scellées rechargeables à haut rendement.

Télécommande complète des modes de déplacement, de stationnement et d'exposition depuis l'extérieur du pipeline, à l'aide de « magnétopes » JME ou d'isotopes à faible radioactivité.

Les caractéristiques de sécurité comprennent des circuits de protection contre les déversements et un véhicule de récupération spécialisé avec verrouillage de la récupération et système de récupération automatique sans fil [16].



Figure III.1 : Crawler.

### III.2. Les éléments de crawler :

- 1-chargeur de batterie
- 2-contrôleur chargeur
- 3-support de générateur
- 4-batterie
- 5-corps de chenille (châssis)
- 6-contrôleur vidéo
- 7-cable de connexion
- 8-générateur de rayons X
- 9-les roues



Figure III.2 : les éléments de crawler

### III.3 Les films radiographiques:

Les films utilisés pour la radiographie X et gamma sont constitués d'une émulsion d'halogénure d'argent dans de la gélatine. L'émulsion est appliquée sur les deux faces d'un support souple et transparent pour produire un support sensible aux rayonnements. Lorsque l'émulsion est exposée aux rayons X ou gamma, des changements invisibles se produisent dans sa structure physique. Lorsque le film est ensuite traité avec une solution chimique appelée « révélateur », les particules d'halogénure d'argent sont transformées par le rayonnement en minuscules particules d'argent métalliques noires et amorphes. Cet argent, suspendu dans la gélatine de part et d'autre du support, forme l'image.

Les films radiographiques peuvent être divisés en films rapides et films lents en fonction de la taille des particules d'argent. Les films dont les grains d'argent sont plus gros sont des films rapides, tandis que les films dont les grains d'argent sont plus petits sont des films lents.

Le film doit être conservé dans une enveloppe jusqu'à ce qu'il doive être retiré, par exemple en le plaçant entre des feuilles de papier intensificateur. [16]

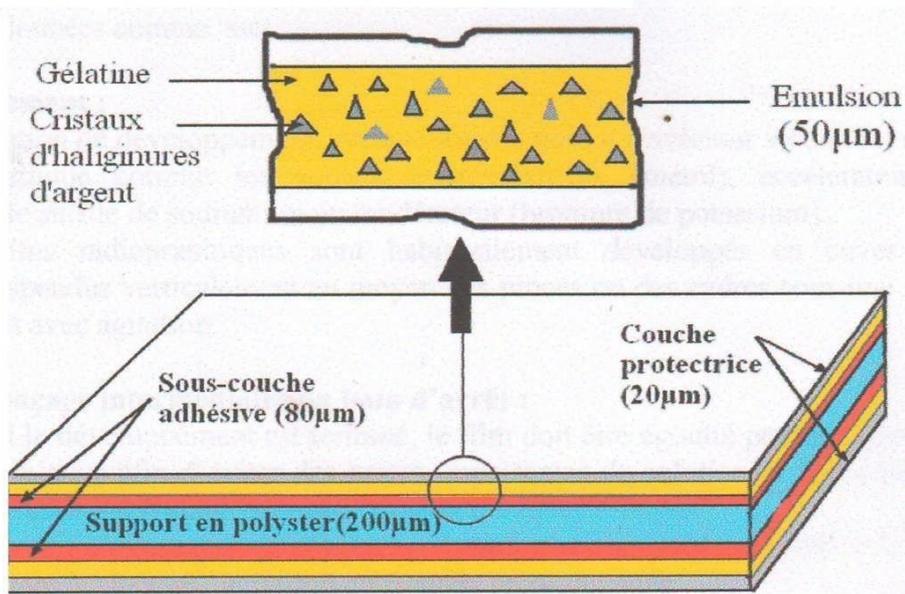


Figure III.3 : Structure de film radiographie.

### III.4. Les étapes d'étudies le joint de soudure et comment détecte les défauts :

#### III.4.1. Description de la technique utilisée :

Le contrôle par rayons X des échantillons de soudure est effectué en utilisant la méthode de soudage par contact externe à double paroi par exposition à une source de rayonnement gamma ou de rayons X. [16]

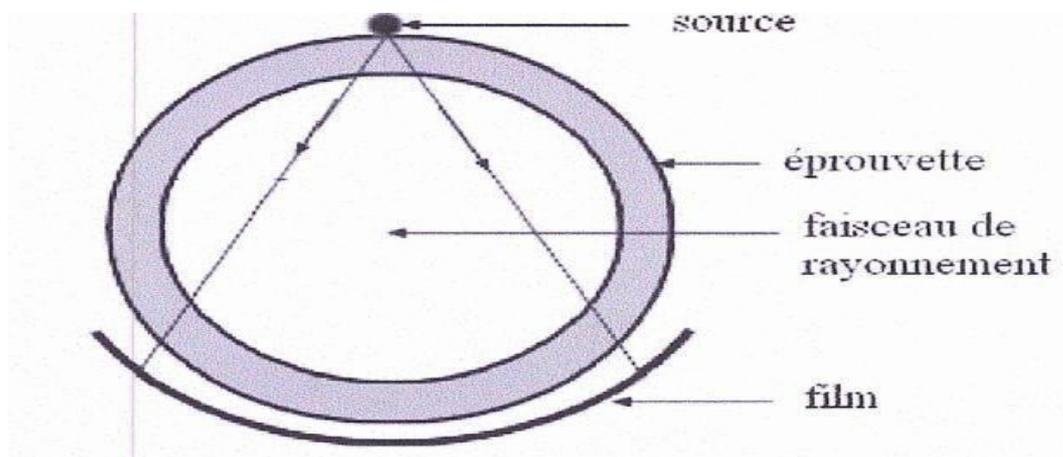


Figure III.4 : Exposition par contact à double paroi

**III.4.2. Préparation de l'échantillon pour l'examen :**

Avant toute radiographie, l'échantillon doit être préparé et prêt pour l'examen. Pour que l'examen soit effectué correctement, les procédures suivantes sont exécutées avant l'exposition.

**III.4.3. Préparation de la surface :**

La zone à examiner doit être exempte de toute irrégularité susceptible de gêner la mise en place du film ou d'en gêner l'interprétation.

Toute irrégularité sur l'échantillon doit être nettoyée et éliminée à l'aide d'une brosse métallique.

**III.4.4. Détermination de la position et de la taille de la soudure :**

Tout d'abord, choisir le point zéro comme point de départ et suivre la direction de lecture à partir de ce point.

La bande est encerclée en centimètres sur l'échantillon à côté de la source et dimensionnée de manière flexible avec la figure de plomb.

**III.4.5. Préparation et positionnement de la cassette :**

Le film et la soudure sont identifiés par le numéro de plomb de sorte que seul le film exposé est remplacé par le film suivant, un film étant remplacé par le suivant.

La cassette doit rester fermement fixée dans le tube à essai pendant l'exposition.

**III.4.6. Mesure de la radioactivité de la source d'Ir 192 :**

Les radiographes utilisent une règle à calcul pour déterminer les temps d'exposition afin d'obtenir une efficacité et une productivité élevées.

**III.4.7. Réalisation de l'exposition et règles de sécurité :**

Après la préparation des tubes à essai et le réglage des paramètres nécessaires, les tubes à essai contenant les sources radioactives et l'équipement sont placés dans une chambre d'exposition spéciale et l'exposition est réalisée en tenant compte des règles de sécurité suivantes.

**a) Zone de marquage :**

Cette zone est une zone de travail radiologique et comprend trois zones de diamètre croissant : Cette zone définit les limites à l'intérieur desquelles chaque personne peut se trouver en fonction des sources de rayonnement qu'elle peut transporter.

**b) Collimateur :**

Il a pour fonction de diriger le faisceau de rayonnement et de limiter sa propagation à l'intérieur de la zone de travail.

**c) Murs en béton :**

La chambre d'exposition est constituée de murs en béton d'un mètre d'épaisseur, ce qui réduit considérablement l'impact du rayonnement sur les radiographies qui doivent rester à l'extérieur de la chambre d'exposition pendant l'exposition.

**d) Commande à distance de l'équipement :**

Ce dispositif permet la commande à distance de l'équipement et consiste en un câble de 15 m de long, commandé par un bouton rotatif, qui permet le déplacement de l'isotope de la cage de l'équipement vers le collimateur. L'exposition doit être arrêtée après 90 secondes, ce qui correspond au temps d'exposition.

**e) Utilisation d'un radiomètre :**

Ce dispositif permet de vérifier l'étanchéité de la source et la présence de fuites de rayonnement.

**III.4.8. Chambre noire :**

Chambre noire : Il s'agit de la salle de traitement des films, qui abrite tous les équipements et outils nécessaires au traitement. La chambre noire est organisée de manière à garantir une efficacité, un confort et une propreté maximums :

- Elle doit être située à proximité de la zone où les images radiologiques sont prises.
- Elle doit être protégée des radiations pour assurer la sécurité du travail et la préservation des films stockés.
- Il doit être sec et protégé des fumées et des gaz.
- Il doit être équipé de systèmes de chauffage et de ventilation.
- Il doit être librement accessible pour être protégé de la lumière.
- Le film doit être équipé d'un éclairage spécial inerte pendant le transport et le traitement de fusion.
- Il doit être équipé d'accessoires tels que cassettes (ou pochettes), dispositifs de fixation (cages) et mégascopes pour la visualisation du film.

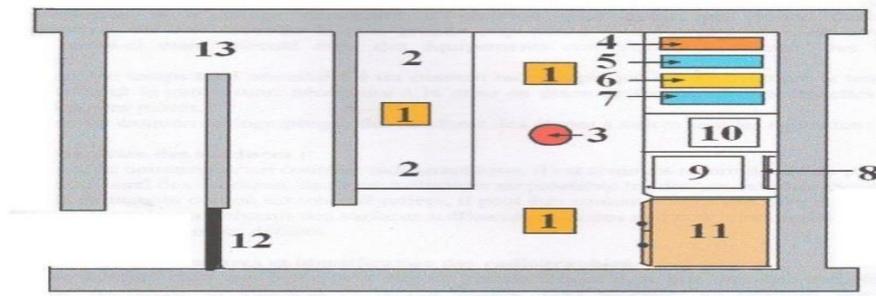


Figure III.5: Constitution d'une chambre noire

- |   |  |
|---|--|
| 1 : Eclairage inactinique.  | 7 : Râtelier pour égouttage des films. |
| 2 : Paillasse sèche (avec tiroirs pour Films, électrique. Ecrans, cassettes et accessoires) | 8 : Sécheuse                           |
| 3: Eclairage normal.  | 9 : Négatoscope.                       |
| 4. Bain de révélateur.  | 10 : Armoire d'archive                 |
| 5. Bain d'arrêt   | 11 : Panneau léger amovible.           |
| 6. Bain de fixage   | 12 : Sortie libre.                     |

**III.4.9. Processus de développement du film :**

Le film est développé manuellement en cinq étapes dans une chambre noire sous un éclairage inerte. [16]

**a) Bain de développement :**

Après avoir été fixé dans une cage, le film est placé dans un bain de 20 litres contenant une solution de bain mélangée à de l'eau et laissé à 19°C pendant 5 minutes.

**b) Bain d'arrêt :**

Après 5 minutes de développement, le film est placé dans le bain d'eau et l'action de la solution de développement est arrêtée par agitation pendant 2 minutes (le film doit être égoutté de la solution de développement).

**c) Bain de fixation :**

Plonger le film dans le bain de fixation pendant 10 minutes pour éliminer les particules d'argent non exposées et fixer l'image sur le film.

**d) Nettoyage :**

Le film est rincé à l'eau courante pour éliminer les composants chimiques qui ont adhéré au film dans le bain de fixation.

**e) Séchage :**

Après le nettoyage, le film est humide et doit être séché dans un séchoir électrique. On obtient ainsi un film prêt à être interprété.

**f) Évaluation de la qualité de l'image :**

La qualité de l'image des radiographies est un facteur très important pour la lecture et définit un film sur lequel des irrégularités dues à des défauts sont visibles.

**III.5.les défauts de soudure :****III.5.1.Introduction :**

Il existe divers types de défauts de soudure, ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre a pour objectif d'identifier et de décrire les défauts les plus courants, en tenant compte du métal utilisé ou du procédé de soudage employé. Nous commencerons par aborder les fissurations [11].

**III.5.2. Les fissures :****III.5.2.1. Généralités :**

Les fissures sont définies comme des discontinuités ressemblant à des fractures, caractérisées par une pointe et un rapport longueur/largeur important. Les fissures sont généralement causées par des concentrations de contraintes dues à la proximité d'entailles associées à d'autres discontinuités mécaniques ou configurations de joints. Les contraintes susceptibles de provoquer des fissures sont les contraintes résiduelles et les contraintes appliquées. Les contraintes résiduelles résultent des contraintes dues au processus de soudage et au retrait thermique de la soudure après solidification. Les fissures liées au soudage présentent très peu de déformation plastique, Si des fissures sont détectées pendant le soudage, elles doivent être complètement éliminées avant que le soudage puisse se poursuivre. Le soudage sur les fissures les élimine rarement.

**III.5.2.2.Direction des fissures :**

Une fissure peut être qualifiée de longitudinale ou de transversale, selon sa direction. Si la fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou d'une fissure de joint affectée par la chaleur dans le métal de base.

**III.5.2.3.Fissure longitudinale :**

Dans les petites soudures entre sections dures, généralement le résultat de vitesses de refroidissement élevées et de contraintes résiduelles. Dans le soudage à l'arc submergé, elle est généralement associée à des vitesses de soudage élevées ou peut être liée à des problèmes de porosité

prononcés sur la surface de la soudure.

La fissuration longitudinale dans la zone affectée thermiquement est généralement causée par de l'hydrogène dissous (Figure III.6).

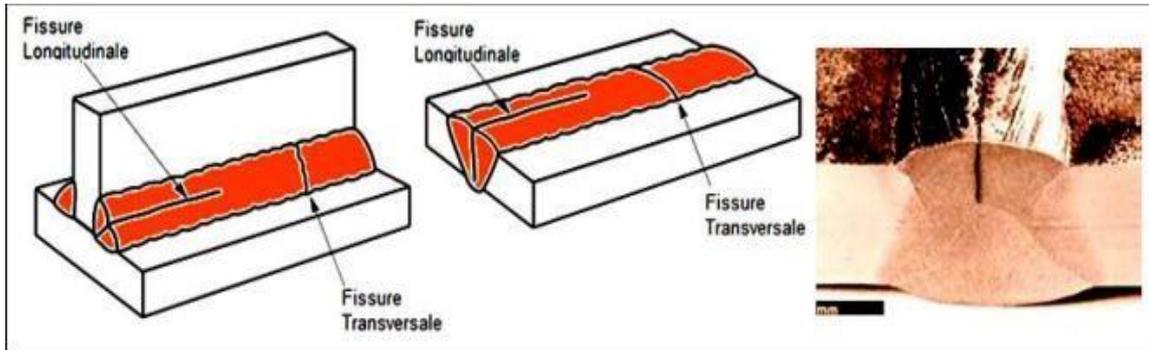


Figure III.6 : Fissure longitudinale

#### III.5.2.4. Les fissures transversales :

Perpendiculaire à l'axe de la soudure. Les fissures peuvent être de taille limitée et se situer entièrement dans le métal de la soudure ou se propager du métal de la soudure à la zone adjacente affectée par la chaleur, puis au métal de base.

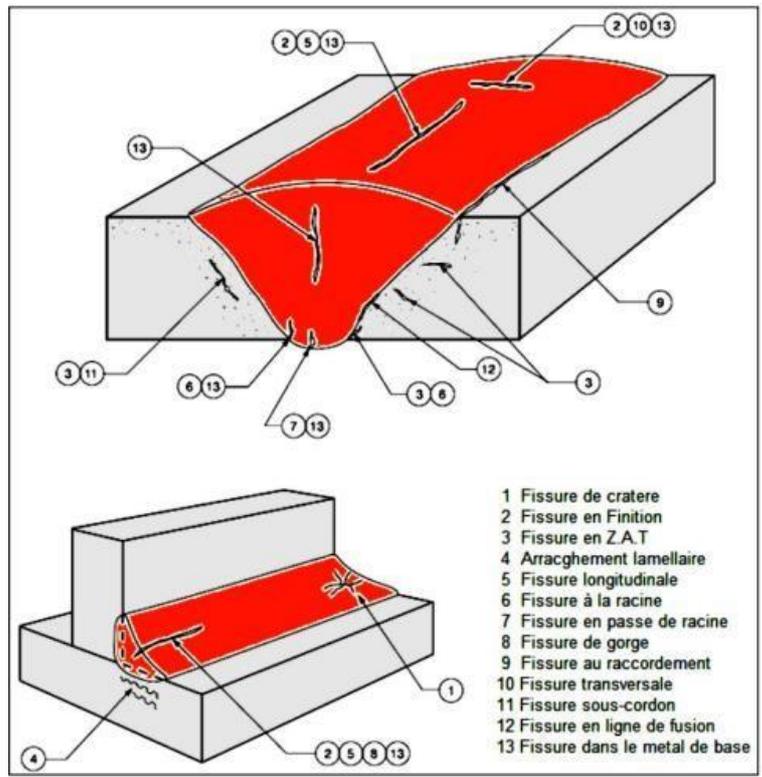
Dans certaines soudures, des fissures transversales peuvent se former dans la zone affectée thermiquement au lieu de la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de contraction longitudinales agissant sur le métal en fusion moins ductile. La fissuration à l'hydrogène du métal fondu peut être orientée transversalement (figure III.7).



Figure III.7 : La fissure transversale

**III.5.2.5. Types des fissures :**

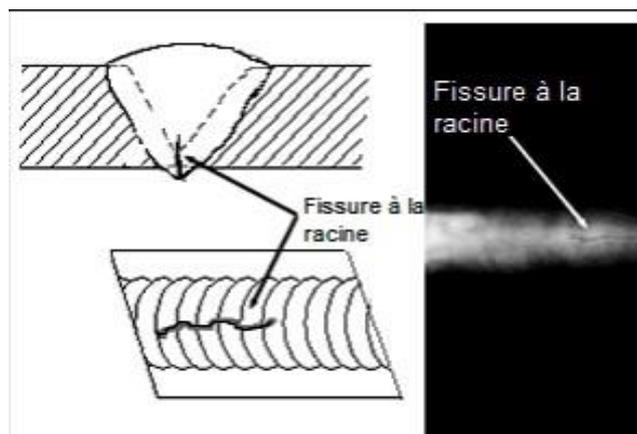
La figure (III.8) résume les fissures trouvées dans la plupart des cas :



**Figure III.8 :** Les types des fissures

**III.5.2.6. Fissures de Gorge (Throat Cracks):**

Une fissure longitudinale le long de la pente d'une soudure d'angle (figure III.9). Il s'agit généralement de fissures à chaud, mais pas nécessairement.



**Figure III.9:** Fissure de Gorge (Throat Cracks)

### III.5.2.7. Fissures de Racine:

Il s'agit d'une fissure longitudinale qui se produit à la racine ou à la surface de la soudure (figure III.10). Il existe des fissures chaudes et des fissures froides .



**Figure III.10:** Fissure de Racine

### III.5.2.8. Fissures de Cratère:

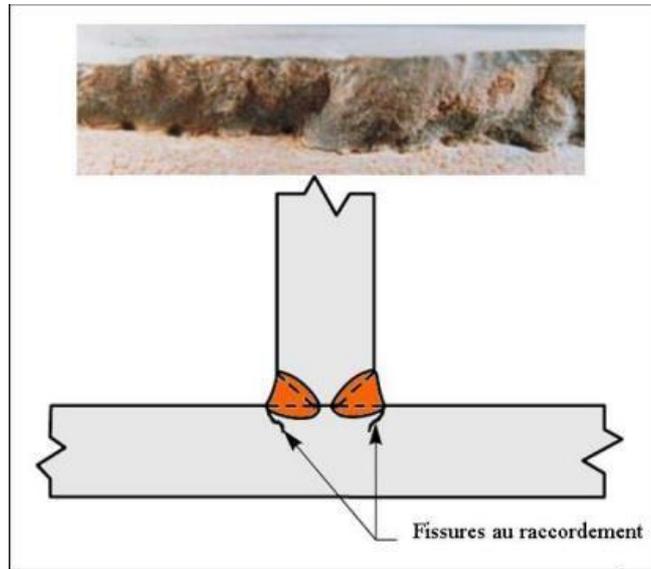
Se produit dans les cratères formés au bord du cordon de soudure lorsque la soudure se termine mal (l'arc est trop rapide). Parfois également appelées fissures en étoile. Les fissures en cratère sont généralement des fissures chaudes formant un réseau en étoile. Elles sont plus fréquentes dans les matériaux ayant un coefficient de dilatation thermique élevé, tels que les aciers inoxydables austénitiques et l'aluminium. Toutefois, la formation de fissures peut être minimisée ou évitée en convexant légèrement le bourrelet avant le retrait de l'arc (figure III.11). Les fissures longitudinales peuvent résulter de fissures en cratère.



**Figure III.11 :** Fissure de Cratère

**III.5.2.9. Les fissures dans les connexions :**

Il s'agit généralement de fissures à froid. Les fissures commencent et se propagent à partir du bord de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures de joint se produisent presque perpendiculairement à la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat de contraintes de retrait thermique dans la zone affectée par la chaleur (figure III.12). Certaines fissures de joint peuvent résulter de processus de soudage.



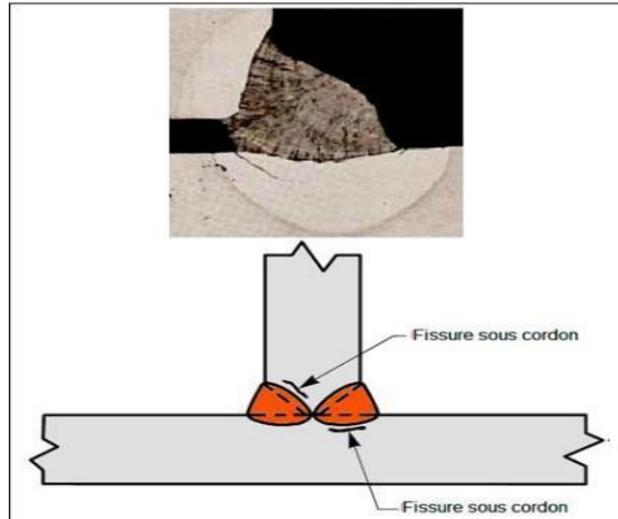
**Figure III.12:** Fissure au raccordement

**III.5.2.10. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) :**

Ces deux termes sont utilisés de manière interchangeable. En général, il s'agit de fissures froides dans la zone affectée thermiquement du métal de base. Les fissures de codage peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents en même temps :

- l'hydrogène
- Microstructure relativement peu ductile
- Contraintes résiduelles élevées

Ces fissures peuvent être longitudinales ou transversales. Ces fissures sont situées dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables visuellement. Elles se produisent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également apparaître dans les soudures bout à bout (Fig. 13).

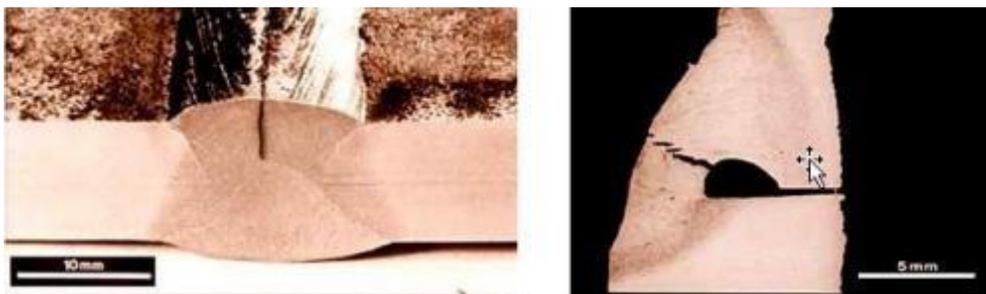


**Figure III .13 :** Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)

**III.5.2.11. Fissures à chaud (ou de solidification) :**

**a).Définition :**

Une fissure, généralement formée au centre de la section transversale d'une soudure (d'angle ou bout à bout), qui s'ouvre à la surface et peut se propager dans le sens longitudinal. Elle se produit lorsque le métal précipité se solidifie à haute température (figure III.14).



**Figure III.14:** Fissure à chaud (ou de solidification)

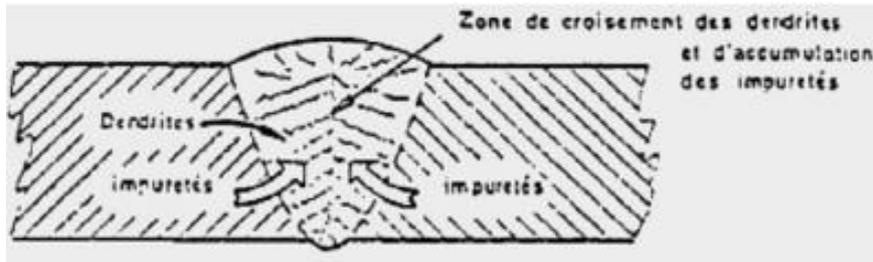
**b).Causes possibles :**

Retrait latéral excessif, en particulier dans les cordons dont le rapport profondeur/largeur est supérieur à 2 (rapport typique dans les procédés de soudage à haute densité de courant tels que le soudage à l'arc submergé et le soudage MAG).

- Si la teneur en carbone, en phosphore et en soufre du métal de base est trop élevée, une fissuration inter dendritique peut se produire à la suite de la dilution entre MB et MD, car les impuretés restent au point de solidification finale et les dendrites issues de cette solidification s'agrègent dans des directions différentes. Il convient de noter que le degré de migration des impuretés augmente avec

la température. Il s'agit d'un effet indésirable du préchauffage.

- Pour les soudures d'angle, l'écart entre les joints est trop important.
- Soudures d'angle avec des évidements importants : elles peuvent ne pas être assez solides pour résister aux contraintes normales de retrait.
- Transformation allotropique : C'est le nom donné au changement de structure cristalline qui se produit lorsque l'acier est chauffé et refroidi (Figure.15).



**Figure III.15 :** Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

**c).Méthodes de détection :**

- Pour les fissures superficielles : examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- Pour les fissures internes : examen par ultrasons ou par rayons X.

**d).Méthode de réparation :**

Enlever la partie défectueuse de la soudure à 5 mm au-delà du bord visible de la fissure et réparer par soudage.

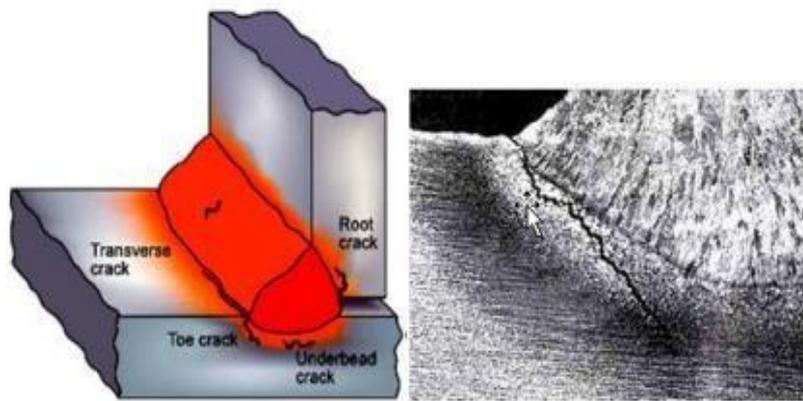
**e).Mesures préventives :**

- Régler les paramètres de soudage de manière à ce que le rapport profondeur/largeur soit de 1:1.
- Limiter la teneur en P et S du métal de base à 0,05 % pour les deux éléments.
- Limiter la distance entre les joints.
- Ajuster le régime thermique pour éviter un retrait transversal important.

**III.5.2.12 Fissuration à froid (fissuration par l'hydrogène):**

**a).Définition :**

Fissures causées par des contraintes appliquées au métal à une température proche de la température ambiante. Ces fissures sont toujours situées dans la zone de transition de la structure durcie et peuvent déboucher dans la soudure. La diffusion de l'hydrogène est toujours un facteur contributif. Ces fissures peuvent n'apparaître que plusieurs heures après le soudage (figure III.16).



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

**b).Cause possible :**

L'hydrogène se diffuse du métal de base dans la zone affectée thermiquement et se fissure en raison de la structure de trempe.

Ces pores d'hydrogène sont soumis à une pression élevée et constituent donc la base de la fissuration. L'hydrogène peut provenir de l'humidité dans ou sur le produit soudé et de contaminants tels que la peinture, l'huile et les oxydes. Le potentiel de fissuration augmente avec l'équivalent carbone et l'épaisseur.

Des vides importants, un régime thermique faible et un préchauffage insuffisant sont également des facteurs.

**c).Méthodes de détection :**

- Fissures superficielles : contrôle visuel, magnétique ou par ressuage.
- Fissures internes : examen aux ultrasons ou aux rayons X.

**d).Méthode de réparation :**

Méthode de réparation : La partie défectueuse de la soudure doit être enlevée à 5 mm au-delà du bord visible de la fissure et réparée par soudage. Chaque réparation doit être effectuée avec un préchauffage et un apport de chaleur corrects pendant le soudage afin d'éviter de nouvelles fissures.

**e).Mesures préventives :**

- Utiliser des produits de soudage à faible teneur en hydrogène. S'assurer que l'électrode est complètement sèche avant le soudage (en particulier les électrodes à enrobage basique).
- En cas de préchauffage, chauffer l'ensemble de la soudure à la température requise.
- Pour les aciers ayant des propriétés de durcissement dans la zone affectée thermiquement, suivre attentivement la procédure approuvée.

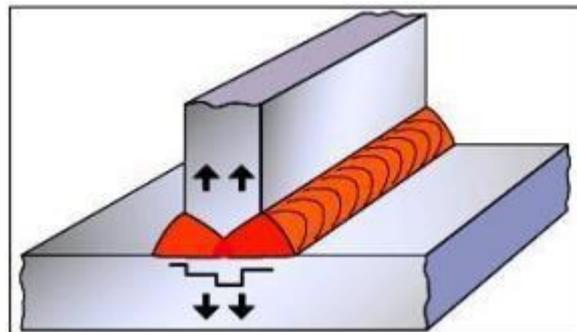
**III.5.2.13. Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire) :****a). Introduction :**

Le retrait de l'écaïlle (ou fissuration de l'écaïlle) peut se produire sous les soudures, en particulier dans les tôles laminées présentant une faible ductilité dans le sens de l'épaisseur.

Cette section décrit les caractéristiques, les principales causes et les bonnes pratiques pour minimiser le risque de déchirure de l'écaïlle.

**b). Identification :**

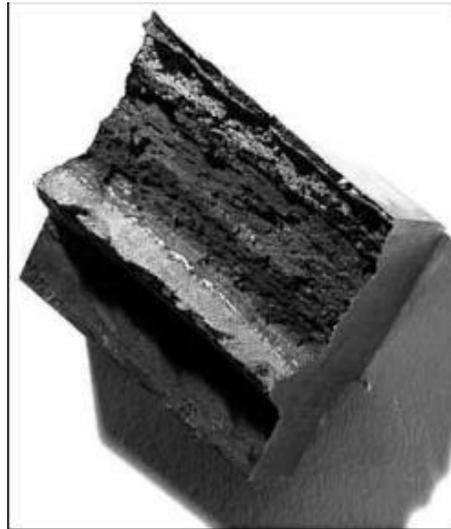
La principale caractéristique des retraits lamellaires est qu'ils se produisent dans les soudures en T et les soudures d'angle et sont situés dans le métal de base parallèlement à la ligne de fusion de la soudure et à la surface de la tôle d'acier (figure 20). Des fissures peuvent apparaître au bord de la pénétration de la soudure, mais elles sont toujours associées à des concentrations de contraintes élevées.



**Figure III.17.** Arrachement lamellaire dans un joint en T

**c). Surface de Rupture :**

La surface de rupture a un aspect fibreux, semblable à du bois, avec de longues sections parallèles indiquant que le métal est moins ductile dans le sens de l'épaisseur (figure III.18).



**Figure III.18 :** Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire

**d).Exposé des motifs :**

On considère généralement que les trois conditions suivantes sont nécessaires pour que les lamelles soient retirées

Tension dans le sens de l'épaisseur : La tension de soudage doit se déplacer dans la direction la plus courte de la tôle (le long de l'épaisseur de la tôle).

Direction de la soudure : La zone de fusion est parallèle au plan des inclusions. La ductilité de la tôle dans le sens de l'épaisseur doit être faible.

Par conséquent, si les contraintes générées par la soudure se déplacent dans le sens de l'épaisseur, le risque de fissuration des lamelles augmente. Ce risque augmente avec des niveaux élevés d'hydrogène dans le métal en fusion.

**e).Facteurs à prendre en compte pour réduire le risque d'arrachement :**

La sélection des matériaux, la configuration des joints, les procédés de soudage, les consommables, le préchauffage, la lubrification, etc. peuvent contribuer à réduire le risque d'arrachement.

L'arrachement des lamelles se produit dans les joints soumis à de fortes contraintes dans le sens de l'épaisseur (par exemple, les joints en T et les joints cruciformes) ; dans les joints en T et les joints cruciformes, les soudures entièrement fusionnées sont particulièrement vulnérables.

Les structures cruciformes dans lesquelles la tôle vulnérable ne peut pas être déformée pendant le soudage augmentent également de manière significative le risque de retrait.

Dans les assemblages bout à bout, le risque de retrait est négligeable car les contraintes de

soudage n'agissent pas dans l'épaisseur de la tôle.

Étant donné que la déformation angulaire augmente les contraintes à la racine et/ou au bord de la soudure, le retrait peut se produire dans les joints à section épaisse soumis à des contraintes de flexion élevées.

**e).Détection et réparation :**

En présence d'ouvertures superficielles, le retrait des lamelles peut être facilement détecté par inspection visuelle, contrôle par ressuage et contrôle par poudre magnétique.

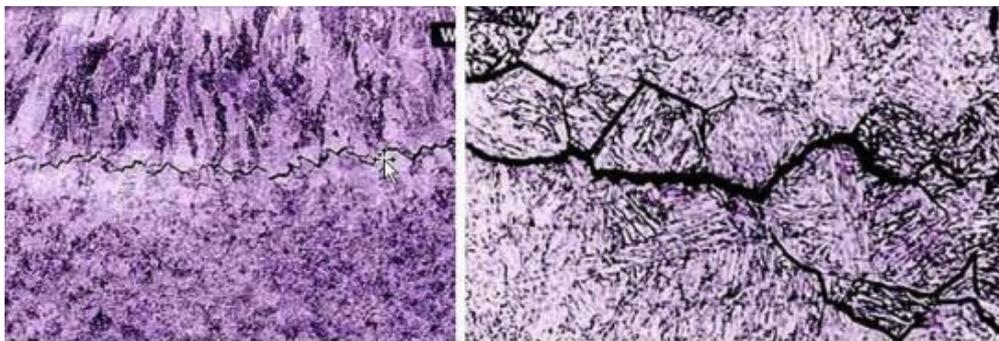
Le contrôle par ultrasons est nécessaire pour les fissures internes, mais il peut être difficile de distinguer les rétrécissements de lamelles des bandes d'inclusion.

En fonction de l'orientation des protubérances, celles-ci ne peuvent généralement pas être détectées par l'inspection aux rayons X.

**III.5.2.14. Fissures de réchauffages (Reheat cracking) :**

**a). Définition :**

La fissuration survenant dans les aciers Va ou Mo dont la teneur est suffisamment élevée pour provoquer une trempe significative dans la zone affectée thermiquement, suivie d'une ductilité de fluage basée sur les joints de grains de cette zone affectée thermiquement, se traduit par une fissuration en service à des températures élevées (Figure III.19)



**Figure .III.19.** Fissures de réchauffages (Reheat cracking)

**b).Causes possibles :**

Les facteurs contributifs incluent :

- Impuretés dans l'acier.
- Effets d'entaille.
- Manque de pénétration.
- Manque de fusion à la racine de la soudure.

**c).Méthodes de détection :**

- À la surface : Examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- À l'intérieur : Examen par ultrasons.

**d). Méthode de réparation :**

Traiter thermiquement la soudure pour restaurer la ductilité de la zone affectée thermiquement, puis retirer la fissure jusqu'à 5 mm de la pointe de la fissure. Un préchauffage suffisant doit être effectué avant la réparation, puis un traitement thermique supplémentaire doit être réalisé.

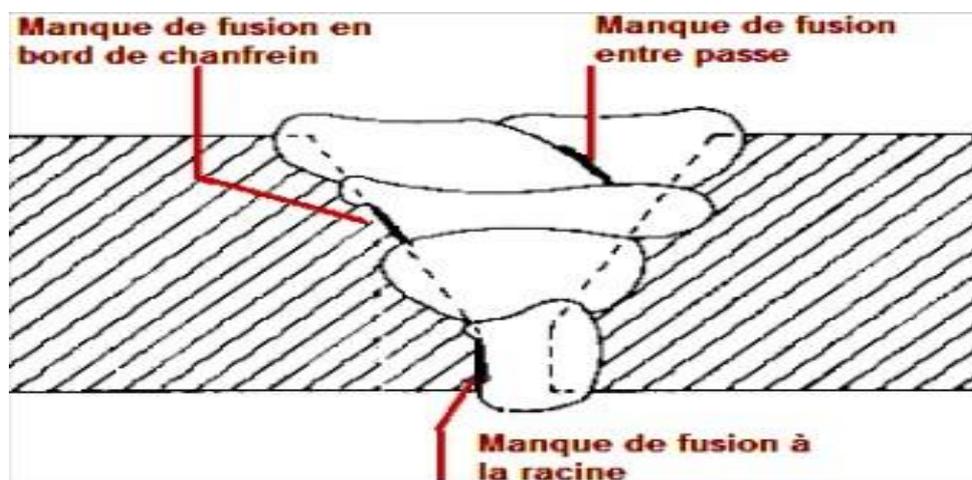
**e).Mesures préventives :**

- Éliminer toute entaille avant le traitement thermique.
- Effectuer un traitement de détente entre les différentes passes.
- Sélectionner soigneusement le matériau, ainsi que la procédure et la technique de soudage appropriées.

**III.5.3. Manque de fusion :****III.5.3.1.Localisations possibles des manques de fusion :**

Des manques de fusion peuvent apparaître (Fig. III.20) :

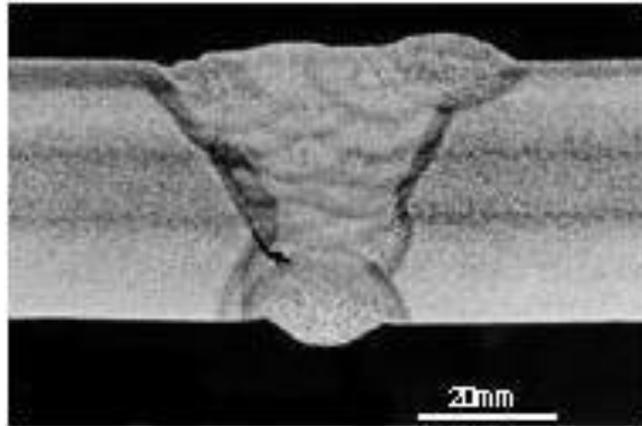
- Au niveau du flanc de la soudure, entre le métal de base et le métal déposé.
- Entre les passes de soudage.
- À la racine de la soudure, entre le métal de base et le métal déposé.



**Figure III.20 :** Localisations possibles des manques de fusion

**III.5.3.2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure :****a). Définition :**

Manque de cohésion moléculaire entre l'additif et le métal de base dans la soudure (Figure III.21).



**Figure III.21 :** Manque de fusion dans le flanc de la soudure

**b). Causes possibles :**

- Énergie de l'arc trop faible.
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Mauvais angle de l'électrode.
- Métal d'apport s'écoulant devant l'arc en raison de la position de soudage.
- Inductance trop élevée en soudage MAG.
- Bords à souder mal nettoyés.

**c). Méthode de détection :**

Principalement par examen aux ultrasons (difficilement détectable par radiographie).

**d). Méthodes de réparation :**

Éliminer la partie défectueuse et ressouder.

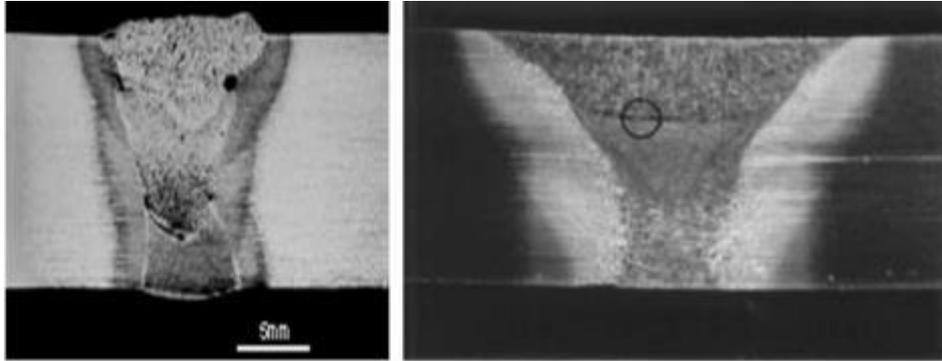
**e). Mesures préventives :**

- Qualifier la procédure pour vérifier la fusion.
- Si nécessaire, modifier l'angle d'inclinaison de l'électrode ou la position de soudage.
- Nettoyer soigneusement les bords à souder.
- Réduire une inductance excessive en soudage MAG, même si cela augmente les projections sur le métal de base.

**III.5.3.3. Manque de fusion entre passes :**

**a). Définition :**

Manque de cohésion moléculaire entre les passes dans une soudure multi-passes (Fig. III.22).



**Figure III.22:** Manque de fusion entre passes

**b). Causes possibles :**

Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure.

**c). Méthodes de détection :**

Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure.

**d). Méthodes de réparation :**

Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure.

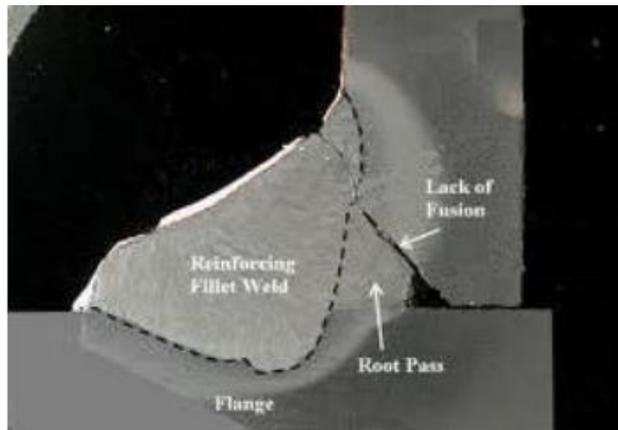
**e). Mesures préventives :**

Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure.

**III.5.3.4. Manque de fusion à la racine de la soudure :**

**a). Définition :**

Absence de fusion moléculaire entre le matériau fondu et le métal de base au niveau de la base de la soudure. Ce défaut est généralement accompagné d'une fusion insuffisante (figure III.23).



**Figure III.23 :** Manque de fusion à la racine de la soudure

**b).Causes possibles :**

- Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure.
- Autres causes spécifiques :
  - Écartement trop faible.
  - Méplat trop important lors de la préparation.
  - Diamètre de l'électrode trop important dans le soudage à l'arc électrique.

**c).Méthodes de détection :**

Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure. Si la soudure peut être contrôlée à l'envers, utiliser l'examen visuel, magnétique ou par ressuage.

**d).Méthodes de réparation :**

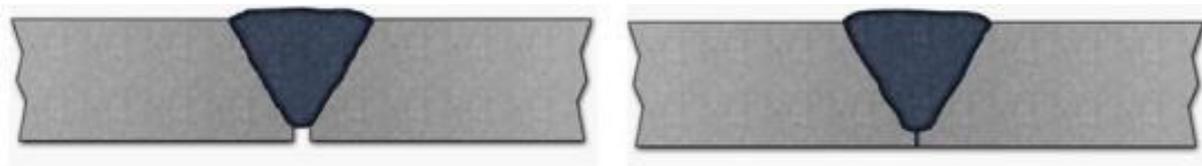
- Si la reprise à l'envers est possible : éliminer le défaut par meulage et effectuer une reprise à l'envers.
- Si la reprise à l'envers est impossible : retirer toute la soudure et ressouder.

**e).Mesures préventives :**

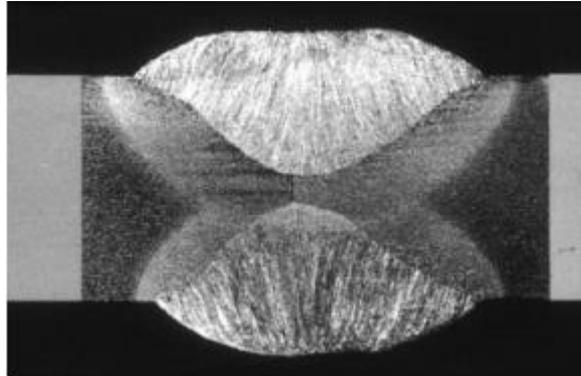
Identiques à celles du manque de fusion dans le flanc de la soudure, avec une attention particulière à la préparation (écartement, méplat, etc.).

**III.5.4.Manque de pénétration :****III.5.4.1.Localisations possibles des manques de pénétration :**

Le manque de pénétration peut être localisé (Figure 24a et Figure 24b).

**a). A la racine de la soudure (soudure en « V ») :**

**Figure III.24a :** Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure.

**b). A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X ») :****Figure III.24b :** Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur de la soudure.**III.5.4.2. Manque de pénétration à la racine :****a). Définition :**

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

**b). Causes possibles :**

- Écartement trop faible.
- Méplat trop grand.
- Soudage vertical descendant alors que le vertical montant est spécifié pour une pénétration complète.
- Apport calorifique insuffisant.
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Diamètre de l'électrode inapproprié dans le soudage électrique manuel.
- Inductance excessive dans le soudage MAG.
- Laitier coulant devant le bain de soudage.

**c). Méthodes de détection :**

- Défaut débouchant en surface : Examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- Défaut interne : Examen par ultrasons ou radiographie.

**d). Méthodes de réparation :**

- Éliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et réparer par soudage.

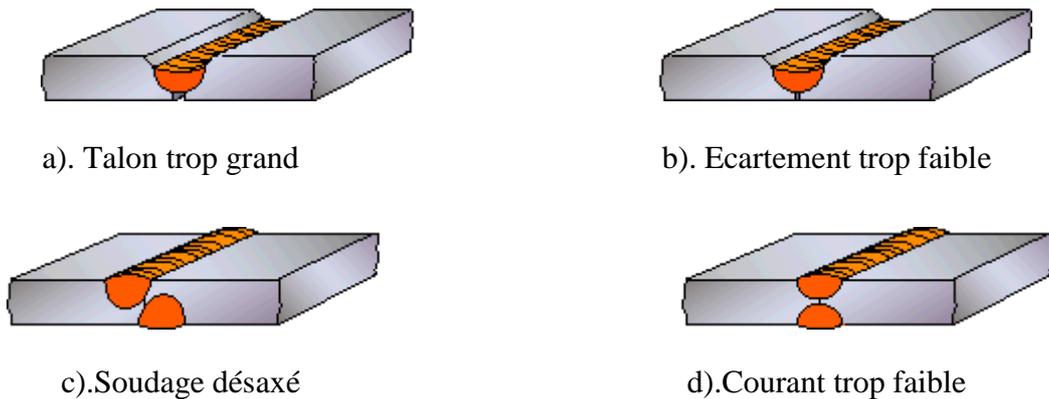
**e).Mesures préventives :**

- Adapter la préparation de soudage (écartement, méplat, etc.).
- Ajuster les paramètres de soudage (vitesse, régime thermique, etc.).
- Réduire la fluidité du laitier.
- Diminuer l'inductance pour le soudage MAG.

**III.5.4.3. Manque de pénétration dans la soudure :**

**a). Définition :**

Le métal d'apport n'atteint pas le milieu du chanfrein en X (Figure III.25 a b c d).



**Figure III.25:** Manque de pénétration dans la soudure

**b).Causes possibles :**

Identiques à celles du manque de pénétration à la racine.

**c).Méthodes de détection :**

Examen par ultrasons ou radiographie.

**d).Méthodes de réparation :**

Éliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et effectuer une réparation par soudage.

**e).Mesures préventives :**

- Identiques à celles du manque de pénétration à la racine.
- Une mesure spécifique consiste à réaliser un examen magnétique ou un ressuage après gougeage pour vérifier la qualité du gougeage (Fig. III.26a b).

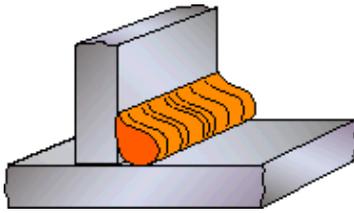


Figure III.26a : Apport arc trop faible

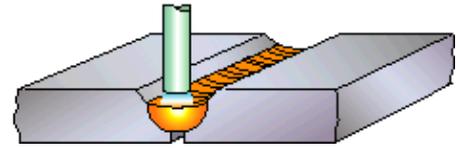


Figure III.26b : Diamètre électrode trop grand

### III.5.5. Inclusion gazeuses :

#### III.5.5.1. Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités :

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous trois formes :

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

#### III.5.5.2. Porosités vermiculaires :

##### a). Définition :

Longues cavités formées par les gaz piégés lors de la solidification du cordon (souvent en forme d'arête de poisson caractéristique, selon l'ordre de coagulation des dendrites) (figure III.27).

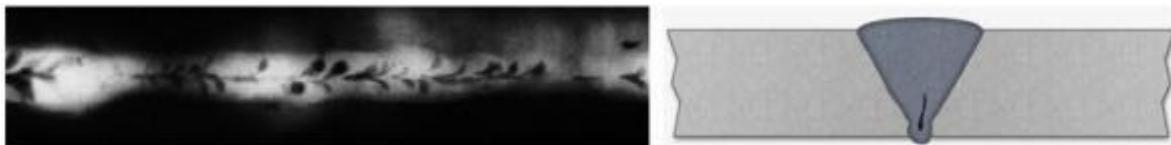


Figure .III.27 : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.

##### b). Causes possibles :

- Contamination de la surface à souder.
- Ouvertures, telles que celles entre une tôle verticale et une tôle horizontale assemblées par une double soudure d'angle.
- Doublures dans les tôles, si elles débouchent en surface.

##### c). Méthodes de détection :

- À la surface : Examen visuel.
- À l'intérieur : Radiographie et ultrasons.

**d).Méthodes de réparation :**

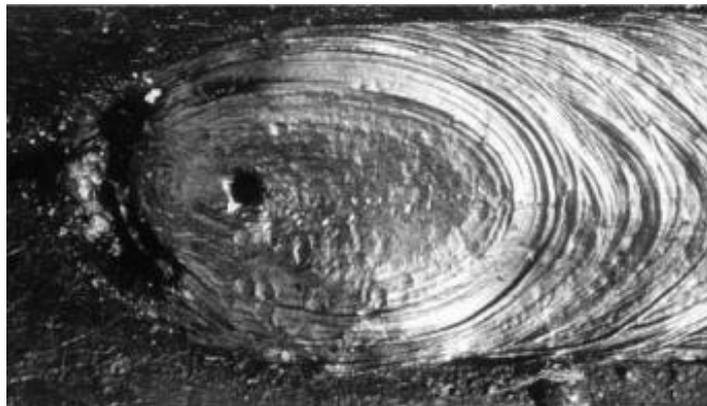
- Éliminer la zone défectueuse et ressouder. Si nécessaire, enlever la doublure par meulage.

**e).Mesures préventives :**

- Nettoyer les bords à souder avant le soudage.
- Identifier et éliminer les doublures dans les bords à souder (par examen magnétique ou par ressuage), ou les boucher par soudage.
- Éviter les préparations de soudage qui peuvent entraîner la formation de cavités.

**III.5.5.3. Porosités de reprise :****a). Définition :**

En soudage électrique manuel ou automatique, la porosité est limitée à une petite partie du cordon, qui apparaît au moment de l'amorçage de la passe (Fig. III.28).



**Figure.III.28 :** Inclusions gazeuses porosités de reprise

**b).Causes possibles :**

- Délai dans l'activation des réactions de protection lors de l'amorçage d'une passe.
- Mauvaise amorce de l'arc par le soudeur lors du soudage manuel

**c).Méthodes de détection :**

- À la surface : Examen visuel.
- À l'intérieur : Radiographie ou ultrasons

**d).Méthodes de réparation :**

- Éliminer le défaut et effectuer la réparation en accordant une attention particulière aux manipulations lors de la reprise.

**e). Mesures préventives :**

- Formation spécifique du soudeur sur les techniques de reprise en soudage manuel.
- Éventuellement, éliminer les imperfections par meulage à chaque début de passe avant d'ajouter les passes suivantes.

**III.5.5.4. Porosités uniformes :****a). Définition :**

Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon (Fig.III.29).



**Figure III.29 :** Inclusions gazeuses porosités uniformes

**b). Causes possibles :**

- Électrodes ou baguettes de soudage corrodées.
- Présence d'air dans le gaz de protection.
- Huile ou hydrocarbures (par exemple, suite au nettoyage).
- Débit insuffisant des gaz de protection.
- Fuites d'eau dans les 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 exemple, lors du soudage de tuyauteries en plein air).

**c). Méthodes de détection :**

- À la surface : Examen visuel, magnétique ou par ressuage.
- À l'intérieur : Radiographie ou ultrasons.

**d). Mesures préventives :**

- Sécher les électrodes et le métal de base.
- Dégraisser les bords à souder.
- Protéger l'arc contre les courants d'air.
- Éviter d'utiliser des électrodes ou des baguettes corrodées.
- Vérifier et réparer les fuites d'eau.
- Ajouter des éléments désoxydants aux électrodes et aux baguettes.

**III.5.6. Inclusion solides :****III.5.6.1. Différents types d'inclusions solides :**

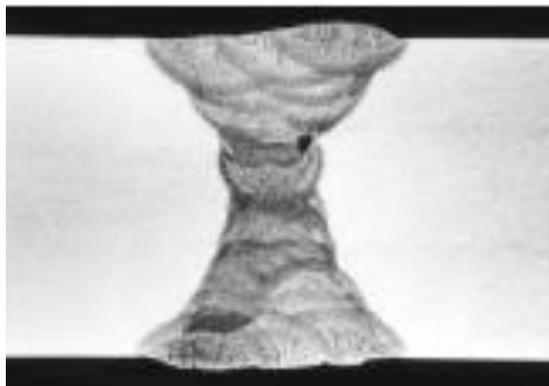
Les inclusions solides peuvent se présenter sous trois types différents :

- Laitier
- Tungstène
- Cuivre

**III.5.6.2. Inclusions de laitier :****a). Définition :**

Les inclusions de laitier, enfermées dans le cordon de soudure (Fig. III.30), peuvent présenter deux aspects :

- Aspect linéaire : Les inclusions sont regroupées parallèlement à l'axe du cordon.
- Aspect quelconque : Les inclusions sont dispersées de manière isolée.



**Figure III.30 :** Inclusions de laitier

**b).Causes possibles :**

- Manque de contrôle sur le laitier (par exemple, le laitier qui coule devant le bain de fusion en raison de la position de soudage).
- Insuffisance d'élimination du laitier entre les passes d'une soudure multi-passes.

**c).Méthodes de détection :**

- Ultrasons et radiographie.

**d).Méthodes de réparation :**

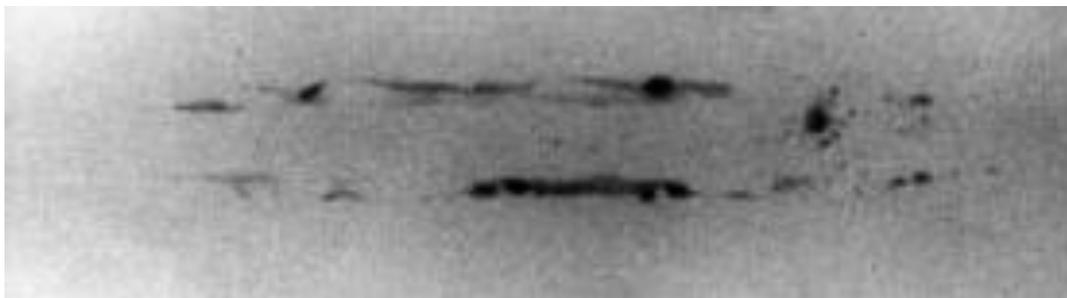
- Éliminer la zone défectueuse par meulage et réparer.

**e).Mesures préventives :**

- Adapter éventuellement la position de soudage pour mieux contrôler le bain de fusion.
- Éliminer suffisamment le laitier entre les passes.

**III.5.6.3. Inclusions de tungstène :****a). Définition :**

La partie fondue de l'électrode de tungstène utilisée dans le procédé TIG (figure III.31).



**Figure III.31 :** Inclusions de tungstène

**b).Causes possibles :**

- Électrode 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.

**c).Méthodes de détection :**

- Radiographie, où les inclusions de tungstène apparaissent comme des taches très blanches sur le film en raison de leur forte absorption des rayonnements.

**d).Méthodes de réparation :**

- Éliminer le défaut par meulage et ressouder.

**e).Mesures préventives :**

- Ne pas utiliser des électrodes trop pointues.
- Limiter l'intensité du courant.
- Augmenter le débit du gaz de protection.
- Éviter de couper trop rapidement l'alimentation en gaz de protection.

**III.5.6.4. Inclusions de cuivre :****a). Définition :**

Une contamination accidentelle du bain de fusion par du cuivre peut entraîner des fissures dans la soudure (figure III.32).



**Figure III.32 : Inclusions de cuivre**

**b).Causes possibles :**

- Fusion des points de contact lors du soudage MIG due à un arc instable.
- Perte de refroidissement à l'eau, entraînant la fusion de certaines parties de la torche.

**c).Méthodes de détection :**

- Contamination : Non décelable par des moyens CND.
- Inclusion importante : Radiographie.
- Si les inclusions entraînent des fissures, se référer au chapitre sur les fissures.

**d).Méthodes de réparation :**

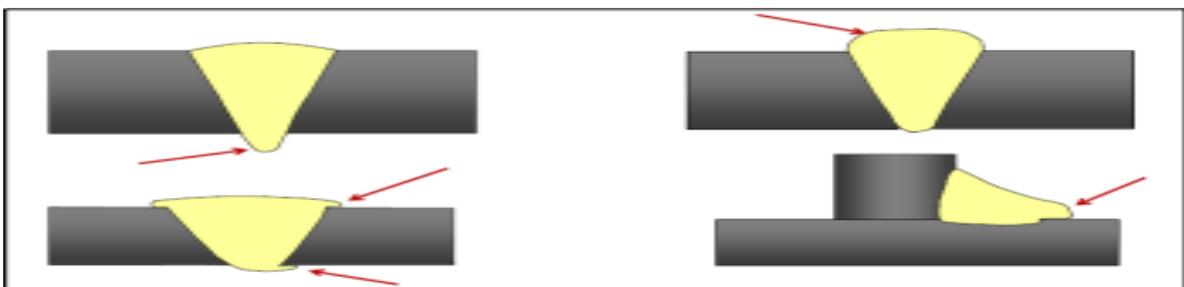
- Éliminer la zone complète par meulage, en élargissant légèrement au-delà, car l'étendue de la contamination est difficile à évaluer.

**e).Mesures préventives :**

- Stabiliser l'arc lors du soudage MIG.
- Minimiser les pertes de refroidissement de la torche.
- Éliminer toute source de contamination possible.

**III.5.7. Excès de matière :****III.5.7.1. Généralité :**

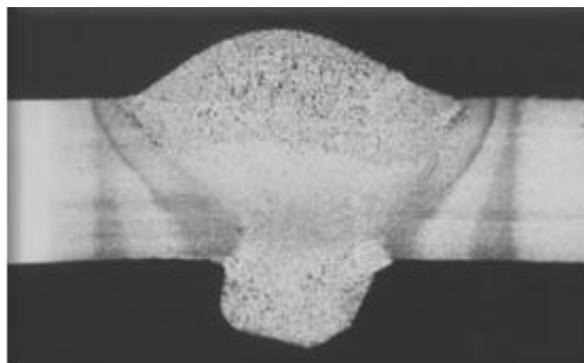
L'excès de matériau peut être présent à la base du bourrelet (excès de pénétration) ou à la surface (excès d'épaisseur), avec parfois un chevauchement de métal de base non fusionné (figure III.33).



**Figure.III.33** : Excès de matière

**III.5.7.2 Excès de pénétration :****a). Définition :**

Pénétration excessive du métal d'apport à la racine du cordon (Fig .III.34).



**Figure.III.34** : Excès de pénétration

**b).Causes possibles :**

- Écartement trop important.
- Jeu entre l'anneau-support et le métal de base lors du soudage sur anneau-support.
- Apport énergétique trop élevé.
- Vitesse de soudage trop faible.
- Manque d'expérience du soudeur.

**c).Méthodes de détection :**

- Contrôle visuel.
- Radiographie, si la racine est inaccessible (par exemple, pour les soudures de tuyauteries).

**d).Méthodes de réparation :**

- Éliminer l'excès par voie mécanique.

**e).Mesures préventives :**

- Réduire l'écartement.
- Limiter le jeu lors de l'utilisation d'anneaux supports.
- Adapter la vitesse de soudage et l'apport énergétique.

**III.6.Etablissement du rapport:**

Lorsqu'un rapport d'examen est rédigé à partir des images radiographiques, il doit être concis tout en offrant une compréhension claire des résultats obtenus, sans que le lecteur ait besoin de consulter les radiographies. Un rapport d'examen doit contenir au minimum les informations suivantes :

- Nom de la société chargée de l'examen.
- Matériau (nuance).
- Traitement thermique appliqué.
- Géométrie de la soudure.
- Épaisseur du matériau.
- Procédé de soudage utilisé.
- Spécification de l'examen, y compris les critères d'acceptation.
- Technique radiographique employée, la classe et la sensibilité de l'IQI (Indicateur de Qualité d'Image) selon la norme.
- Dispositions d'examen (source-film).
- Système de marquage utilisé.

- Schéma du positionnement, type et dimensions du foyer, ainsi que l'identification de l'équipement utilisé.
- Systèmes de films, écrans et filtres.
- Tension du tube et intensité ou activité de la source utilisée.
- Temps d'exposition et distance source-film.
- Technique de traitement : manuel ou automatique.
- Type et position de l'indicateur de qualité d'image.
- Résultats du contrôle.
- Écarts éventuels par rapport à la norme utilisée.
- Nom, certification et signature de la (ou des) personne(s) responsable(s).
- Dates de l'exposition et du rapport d'examen.

### **III.7.Conclusion partielle :**

La fissuration est généralement causée par des tensions internes excessives dans le cordon de soudure ou dans la zone chauffée pendant le soudage (zone affectée thermiquement, ZAT). Les fissures peuvent se manifester immédiatement après le soudage (fissuration à chaud) ou plusieurs heures, voire des jours plus tard (fissuration à froid). Les causes courantes de fissuration incluent un refroidissement trop rapide, l'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, ou une préparation insuffisante des joints.

En plus des fissures, divers autres défauts de soudure peuvent survenir, notamment :

- Défauts Dimensionnels : Mauvaise dimension du cordon en largeur ou en épaisseur.
- Défauts de Géométrie du Cordon : Erreurs dans la forme ou le profil du cordon de soudure.
- Défauts de Pénétration : Insuffisance de fusion entre le métal de base et le métal d'apport.
- Soufflures : Présence de gaz piégés qui créent des vides ou des bulles.
- Inclusions : Présence de particules étrangères comme du laitier ou du tungstène.
- Caniveaux : Dépressions ou creux le long du cordon de soudure.
- Retassures : Déformations dues au refroidissement inégal.
- Projections : Éclats de métal projetés hors du cordon de soudure.
- Défauts de Fusion : Mauvaise fusion entre les passes ou entre le métal de base et le métal d'apport.

Ces défauts peuvent être causés par divers facteurs tels que la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. De nombreux défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage,

Permettant ainsi d'assurer la qualité du cordon et de réduire les risques de défaillance structurale.

**Chapitre IV**  
**Étude expérimentale**

## IV.1 Introduction :

Le transport par pipelines existe depuis le début du siècle dernier et est reconnu comme le moyen de transport le plus sûr et le plus économique. Les pipelines sont de plus en plus développés en raison de l'augmentation continue de la demande mondiale d'énergie et de l'émergence de nouveaux marchés de consommation d'hydrocarbures. La section d'un pipeline étant une structure mécaniquement soudée, la soudabilité de l'acier du tube influe sur les coûts de construction et la fiabilité de la conduite. Des centaines de kilomètres sont soudés sur les sites de construction des pipelines. Par conséquent, toute modification importante de la composition de l'acier ou des dimensions des conduites nécessite de nouvelles mesures techniques et d'ingénierie, ainsi que d'importantes mesures de précaution pour obtenir des joints soudés fiables. Outre la soudabilité locale et métallurgique, d'autres aspects tels que le procédé de soudage et l'environnement dans lequel il est utilisé doivent également être pris en compte lors de la recherche de nouveaux matériaux d'acier pour les conduites en acier. Les défauts dans les joints soudés sont la deuxième cause la plus fréquente de défaillance des conduites après la corrosion. Le soudage est donc une étape très importante et décisive dans la production et la construction des conduites en usine. Le développement d'un réseau mondial de pipelines pour le transport d'hydrocarbures doit suivre le rythme de la croissance de la demande énergétique mondiale. La principale préoccupation des constructeurs doit être d'identifier les assemblages soudés qui peuvent transférer les contraintes avec un maximum de sécurité et qui permettent de réaliser le soudage au moindre coût. D'autre part, il faut tenir compte de l'augmentation de l'adhérence des métaux due à l'augmentation de la taille des tuyaux, de l'utilisation de nouveaux matériaux en acier avec des compositions chimiques de plus en plus complexes et des conditions difficiles pour le soudage des assemblages de tuyaux sur le site. Le développement des technologies et des techniques de soudage doit répondre à l'évolution des propriétés mécaniques des aciers pour tuyaux et des dimensions des tuyaux afin de satisfaire les besoins des fabricants et les exigences des utilisateurs. Les travaux de construction du gazoduc sont réalisés par le groupe Cosider. [13]

## IV.2. Présentation de l'entreprise COSIDER Biskra :

Cosider a été fondée le 1er janvier 1979 en tant que société d'économie mixte par la Société nationale sidérurgique (SNS) et le groupe danois Christiani et Nielsen. En 1982, elle est devenue une filiale à 100 % de la SNS, suite au rachat par cette dernière des actions de son partenaire danois. Avec la transformation en société par actions, conformément à la loi de 1989 sur l'autonomie financière des entreprises publiques, Cosider a su saisir diverses opportunités, lui permettant, contrairement à ses concurrents, de s'engager dans des activités au-delà du bâtiment et des travaux publics.

Aujourd'hui, Cosider est le plus grand groupe algérien dans le secteur du BTPH (Bâtiment, Travaux Publics, et Hydraulique), avec un capital social de 4,335,000,000 de dinars, un chiffre d'affaires de 22,550 millions de dinars en 2004, et un effectif total de 14,228 employés, toutes catégories confondues. Parmi ses réalisations notables, Cosider compte le plus grand nombre de barrages hydrauliques construits en Algérie, ainsi qu'un palmarès impressionnant dans la pose de pipelines.

### IV.3. La diversité de l'activité à travers les filiales:

Le groupe COSIDER, société détenue à 100 % par neuf filiales, est présent dans de nombreux secteurs d'activité. Par l'intermédiaire de sa filiale COSIDER Travaux Publics, il s'occupe d'ouvrages souterrains, d'ouvrages offshore, de routes, d'autoroutes, d'aéroports et d'ouvrages d'art. Une deuxième filiale, COSIDER Construction, intervient dans les ouvrages d'art pour le bâtiment, le génie civil industriel et les stations d'épuration. La filiale pipeline construit des pipelines, des conduites hydrauliques et divers équipements hydrauliques. Une quatrième filiale s'occupe de la production, de la transformation et de la vente de matériaux de carrière, y compris les agrégats pour le béton ; une cinquième filiale, Alrem, est spécialisée dans l'entretien et la rénovation d'équipements auxiliaires et la vente de pièces détachées. Alsim s'occupe de la rénovation d'équipements, principalement des chaudières, et de la production de cadres métalliques et de moules pour l'industrie de la construction. Cometal est active dans le commerce de produits sidérurgiques, Cocider Promotion dans la conception, la construction et la vente de logements et Agral dans l'aménagement du territoire et l'industrie agro- alimentaire [14].



**Figure IV.1 :** Pipelines au niveau de Cosider



**Figure IV.2:** Tronçons finie à Bouira

#### IV.4. Procédé de soudage à COSIDER :

Les poteaux d'assainissement COSIDER c01 utilisent généralement le soudage à l'arc électrique (soudage manuel) et le soudage MIG automatique [15].

- Soudage manuel avec des machines à souder à l'arc (Fig IV.3).



**Figure IV.3 :** Poste de soudure à l'arc électrique

- Le soudage automatique par pipe welder (Fig IV.4).



**Figure IV.4 :** Pipe welder

- Méthodes de soudage interne des tuyaux (Fig IV.5).



**Figure IV.5:** Operation de soudage automatique

- Entre de clamsseur pour le soudage intérieur de pipe (Fig IV.6).



**Figure IV.6:** Clamsseur

## IV.5. Les étapes de radiographie :

### IV.5.1. Déterminer le point de départ :

Définir le point de départ ou le point zéro (Fig IV.7).



Figure IV.7 : Point zéro

### IV.5.2. Le ruban gradué :

Fixez le ruban gradué sur le tube de manière à ce que les chiffres soient dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Fig IV.8).



Figure IV.8 : Ruban gradué

### IV.5.3. Le film radiographique :

Insérer une fiche d'information comprenant les éléments suivants :

- **Fils de mesure de sensibilité de film** : Il s'agit généralement d'un indicateur de qualité d'image (IQI) utilisé pour évaluer la sensibilité du film radiographique. Ces fils sont placés

sur le film pour déterminer la capacité du film à détecter des défauts de tailles spécifiques dans le matériau soudé.

- **Nom du film** : Cela fait référence à la marque ou au type spécifique de film radiographique utilisé pour capturer l'image des soudures. Chaque type de film peut avoir des caractéristiques différentes en termes de sensibilité, de contraste et de résolution.
- **Nom de la section de canalisation** : Il s'agit de la désignation ou de l'identification de la section spécifique de canalisation ou de tuyauterie qui a été inspectée. Cela permet de lier les résultats du contrôle à une partie spécifique du système de canalisation.
- **Date d'utilisation du film** : Cette date indique quand le film a été utilisé pour réaliser l'inspection. Cela peut être important pour des raisons de traçabilité et pour vérifier que le film a été utilisé dans les conditions appropriées, en fonction de sa durée de vie et de son stockage.



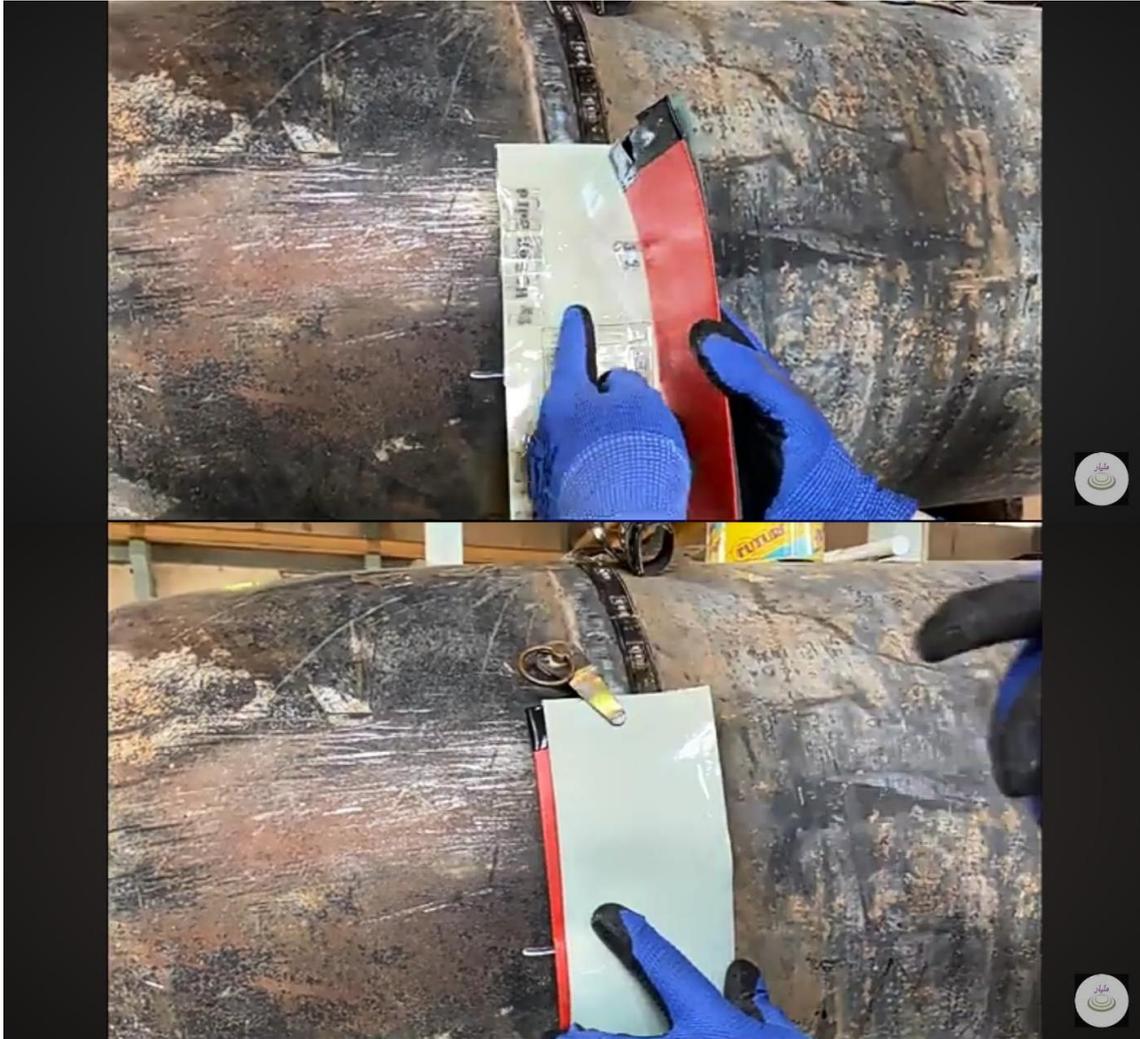
Figure IV.9 : Film radiographique



Figure IV.10 : Fiche d'information

**IV.5.4. La fixation de film :**

Le film est maintenu en place par deux clips dont le diamètre est égal à la moitié de celui du tuyau (Fig IV 11.12).



**Figure IV.11.12 : fixation de film**

### IV.5.5. Générateur de rayons x :

On l'installe devant le film (Figure IV.13).



Figure IV.13 : Générateur de rayons x

### IV.5.6. Contrôleur vidéo :

A ce stade, entrez la distance entre le générateur de rayons X et le tube afin que le centre vidéo puisse régler la date automatiquement et cliquez sur Démarrer l'opération (Figure IV.14.).



Figure IV.14 : Contrôleur de vidéo

## IV.6. Les étapes sur laboratoire :

### IV.6.1. Développements des films : (Fig IV.15).

- Bain de révélateur
- Bain d'arrêt
- Bain de fixage
- Nettoyage



**Figure IV.15 :** Développement des films

**a). Séchage :** Nous séchons le film (Figure IV.16).



**Figure IV.16 :** Séchage

**b). négatoscope :**

Contrôle des films sur le négatoscope (Figure IV.17).



**Figure IV.17 : Négatoscope**

**c).Relèves des indications :**

- N° de défaut
- Type défaut Dimension de (diam – long)
- Position de défaut

Les figures suivants montre les défauts (Figures IV.18.19.20.21.22.23.24.25).

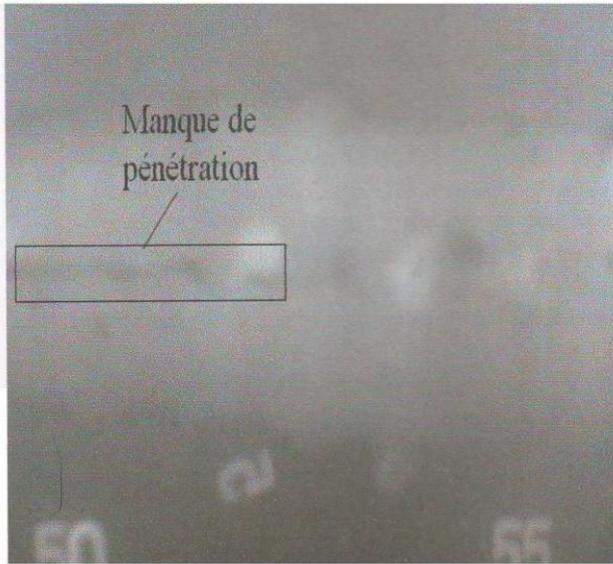


Figure IV.18 : Manque de pénétration

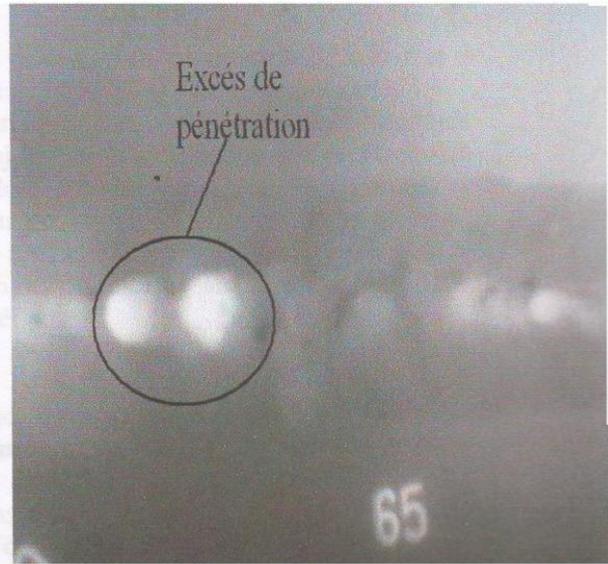


Figure IV.19 : Excès de pénétration

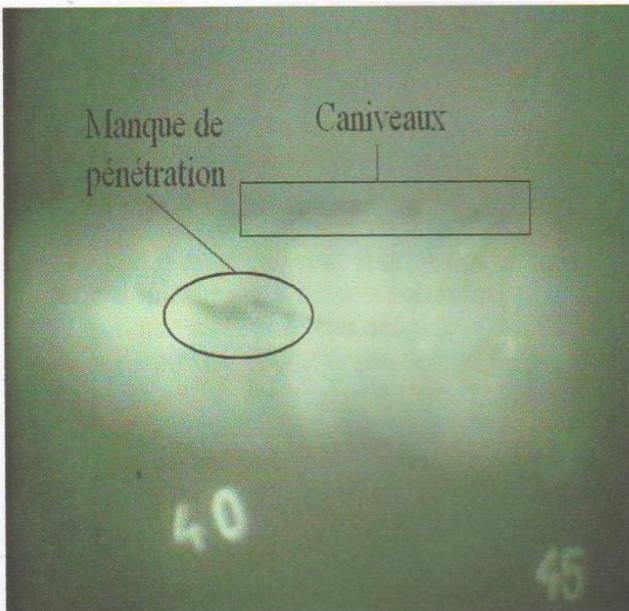


Figure IV.20 : Caniveaux

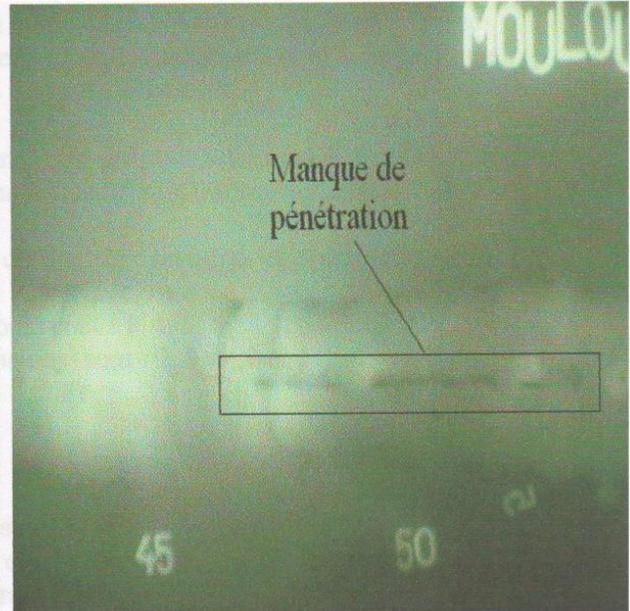


Figure IV.21 : Manque de pénétration

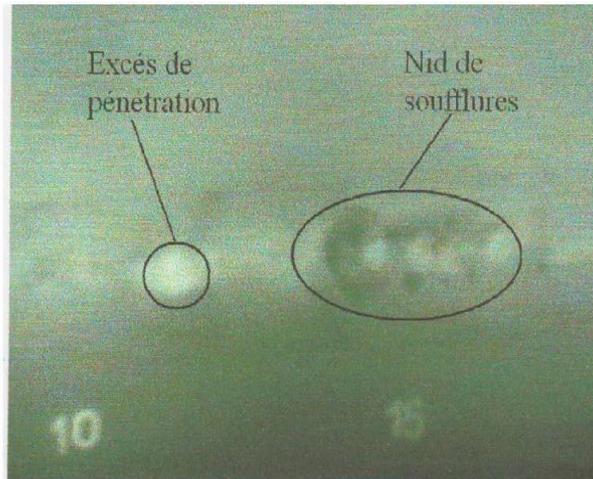


Figure IV.22 : Nid de soufflure

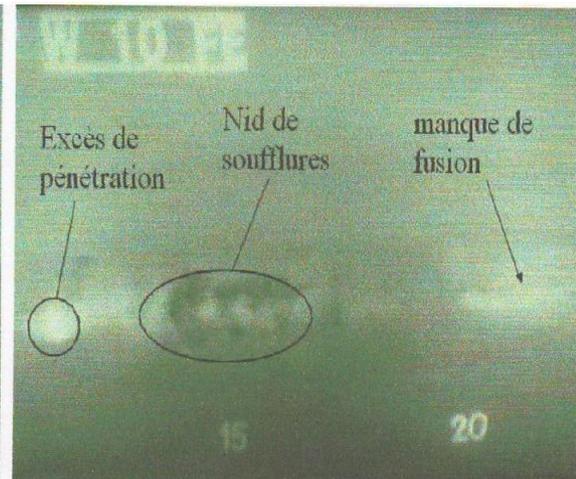


Figure IV.23 : manque de fusion

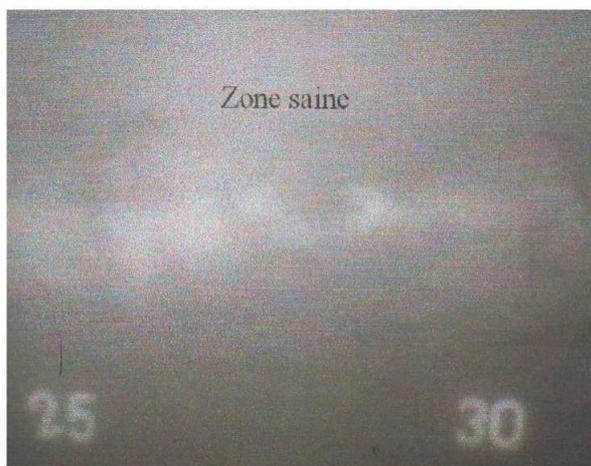


Figure IV.24 : Zone saine

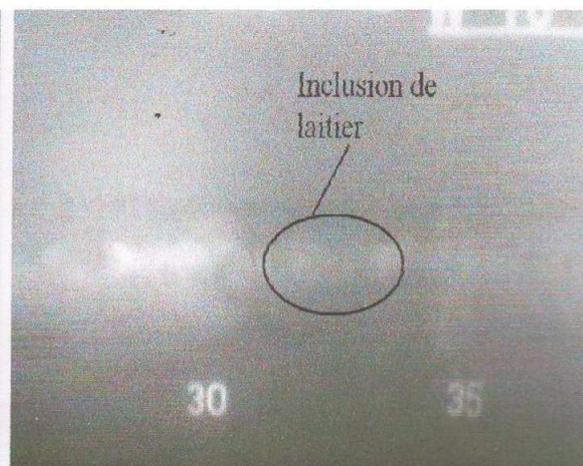


Figure IV.25 : Inclusion de laitier

### IV.7. Interpretation des résultats :

Figure IV.18 :

- Ressources insuffisantes.
- Méthode de réparation : enlever le métal d'apport sur les surfaces les plus accessibles et réparer par soudage.

Figure IV.19 :

- Pénétration excessive.
- Méthode de réparation : éliminer l'excès mécaniquement.

Figure IV.20 :

- Rainures.
- Méthode de réparation : souder la zone concernée. Attention à ne pas trop souder.

Figure IV.22 :

- Fentes de trous d'air.
- Méthode de réparation : les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Un trou d'air ouvert est appelé une fosse.

Figure IV.23 :

- Erreur de fusion.
- Méthode de réparation : retirer la pièce défectueuse et la ressouder.

Figure IV.24 :

- Partie sonore
- Méthode de réparation : retirer les pièces défectueuses et les ressouder.

Figure IV.25 :

- Scories scellées.
- Méthode de réparation : réparer la pièce défectueuse par meulage.

## IV.8. Analyse et discussion des résultats :

L'inspection par rayons X permet de détecter et de localiser un grand nombre de défauts de différents types. Elle peut également déterminer le type de défaut à partir de la forme de ladifférence d'obscurité et déduire sa taille à partir de sa position par rapport aux bandes numérotées.

Les défauts détectés sur les films radiographiques de soudures peuvent en effet être classés en deux grandes catégories

### IV.8.1. Défauts de forme linéaire :

- **Manque de pénétration** : Se produit lorsque le métal d'apport n'a pas complètement pénétré dans la racine du joint. Ces défauts peuvent être critiques, car ils affectent la résistance de la soudure. Longueur typique : 30 à 50 mm.
- **Manque de fusion** : Il s'agit d'un défaut où le métal d'apport ne fusionne pas correctement avec le métal de base, souvent dû à un mauvais réglage des paramètres de soudage ou une préparation inadéquate des bords. Longueur typique : 30mm.

- **Caniveaux** : Ce sont des sillons creusés le long des bords de la soudure, généralement causés par un excès de chaleur ou un mauvais contrôle de l'arc. Longueur typique : 20 à 30 mm.

#### IV.8.2. Défauts de forme volumique :

- **Soufflures** : Dépôts de matière étrangère, comme de la poussière ou des résidus, présents dans la soudure. Longueur typique : 20 à 30 mm.
- **Excès de pénétration ou gouttes** : Excès de métal qui pénètre à l'intérieur du joint ou accumulation de métal fondu en gouttes à l'intérieur du cordon. Longueur typique : 10 à 20 mm.
- **Inclusions de laitier** : Particules solides (comme du laitier) emprisonnées dans la soudure lors d'un soudage multi-passes. Longueur typique : 30 à 40 mm.

#### IV.8.3. Impact sur l'assemblage soudé :

Ces défauts peuvent compromettre l'intégrité de la soudure en affaiblissant la liaison entre les pièces métalliques. La taille, la fréquence et la répartition de ces défauts influencent la nocivité et le risque pour la soudure finale. Par exemple, un manque de pénétration ou de fusion peut affaiblir la résistance mécanique globale, tandis que des inclusions de laitier peuvent créer des points de concentration de contrainte qui favorisent la fissuration sous tension.

Les défauts linéaires sont toujours considérés comme inacceptables, indépendamment de leur emplacement dans le joint soudé, en raison de leur impact significatif sur l'intégrité structurelle. En classant ces défauts selon leur degré de nocivité, voici les observations faites

#### IV.8.4. Premier degré de risque : Défauts linéaires

- **Manque de pénétration** : Défaut de 30 à 50 mm de longueur. C'est le défaut le plus critique car il empêche la fusion complète entre les deux parties du métal, compromettant ainsi la solidité du joint.
- **Manque de fusion** (défaut 5) : Défaut de 30 mm de longueur. Ce défaut se produit lorsque le métal d'apport ne fusionne pas avec le métal de base, formant une zone de séparation susceptible de provoquer des fissures.
- **Caniveaux** : Défauts de 20 à 30 mm de longueur. Ils affaiblissent la surface du joint soudé en créant des creux le long du cordon de soudure, ce qui augmente les risques de rupture sous charge.

### IV.8.5. Deuxième degré de risque : Défauts volumiques

- **Soufflures** (défauts 2 et 4) : Ces défauts volumiques, souvent regroupés en "nid de soufflures", représentent des concentrations de gaz emprisonnés dans la soudure. Bien qu'elles soient moins critiques que les défauts linéaires, leur présence abondante dans une zone peut réduire la résistance mécanique du joint.
- **Inclusions de laitier** (défauts 1 et 6) : Ces inclusions solides dans le cordon de soudure peuvent affaiblir le joint en créant des zones de concentration de contraintes, favorisant ainsi les fissures ou la rupture sous charge.

### IV.8.6. Troisième degré de risque : Défauts de forme

- **Excès de pénétration** : Bien que ces défauts n'influent pas directement sur la résistance du joint soudé, ils peuvent affecter l'apparence du cordon et nécessitent souvent une correction. Ils sont classés dans un degré de risque moins élevé.

### IV.8.7. Réparation des défauts :

La réparation des défauts importants, tels que définis par les normes en vigueur, est généralement simple à réaliser grâce à l'analyse précise de la position, des dimensions et de la nature des défauts. Le processus de réparation consiste généralement à :

1. **Meuler** la zone défectueuse.
2. **Remplir** la zone par un nouveau passage de soudure.
3. Effectuer un **nouveau contrôle** radiographique pour vérifier l'élimination du défaut.

### IV.9. Conclusion :

Le contrôle radiographique a permis d'obtenir des résultats fiables pour la qualification des joints soudés. Il donne une vue détaillée des différents défauts existants, permettant ainsi une évaluation précise et la prise de décisions appropriées pour assurer la qualité et la sécurité des soudures.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

### Conclusion générale :

Dans un contexte industriel, la relation entre les contrôles non destructifs (CND) et les assemblages soudés est effectivement une relation symbiotique. Les CND permettent de détecter les défauts qui apparaissent inévitablement dans les soudures, tandis que la variété des procédés de soudage et des types d'assemblage exige une adaptation continue des techniques de contrôle.

#### a). Importance du contrôle des soudures

Les procédés comme le soudage manuel à l'arc sont souvent moins efficaces pour les assemblages tubulaires, notamment pour les pipelines d'importance économique. Cela s'explique par la qualité parfois insuffisante des soudures, le temps important requis pour leur exécution, et la nécessité d'une main-d'œuvre hautement qualifiée. Des procédés comme le soudage semi-automatique (MIG) ou le soudage au TIG sont recommandés car ils assurent une meilleure qualité de soudure avec une efficacité accrue [16].

#### b). Préparation avant le contrôle radiographique

Avant de procéder à un contrôle radiographique, il est essentiel de :

- S'assurer du bon état de surface du matériau à contrôler.
- Vérifier les caractéristiques des appareils de contrôle (comme la source de rayonnement et les films utilisés).
- Choisir une **norme d'acceptation** et d'évaluation appropriée.

Le rayonnement gamma est souvent utilisé pour le contrôle radiographique. La qualité des films, le choix des meilleures techniques d'exposition, et le calcul précis du temps d'exposition jouent un rôle crucial pour assurer la clarté et la précision des résultats.

#### c). Processus de contrôle radiographique

Le processus de développement des films est également un élément clé du contrôle. Le traitement chimique des films doit être effectué dans des conditions contrôlées de température et d'éclairage, avec une visualisation à une luminance suffisante pour permettre une interprétation précise. Cela permet de révéler les défauts volumiques avec une haute définition. Les défauts volumiques se traduisent par une différence de noircissement sur le film, ce qui les rend faciles à détecter.

Cependant, les défauts linéaires (tels que les manques de pénétration ou de fusion) sont plus difficiles à détecter, surtout si leur orientation par rapport aux rayons n'est pas optimale. Cela demande une expertise supplémentaire lors de l'interprétation.

## Conclusion générale

### d). Avantages du contrôle radiographique

- Le contrôle radiographique offre l'avantage de pouvoir archiver les résultats de manière permanente. Ces résultats peuvent être révisés ou discutés plus tard si nécessaire.
- Il est particulièrement efficace pour le contrôle des longues canalisations, car il permet une inspection rapide sur de grandes distances.
- Pour des contrôles locaux, le contrôle par ultrasons est souvent plus adapté, car il permet de cibler des zones spécifiques avec une haute précision.

# Référence Bibliographiques

- [1] S.BENSAADA.D.FEIIACHL. « TECHNOLOGIE ».Office de publication universitaires.2e Edition.01-2009
- [2] Collection terme et définition utilisés en soudage et techniques connexes, publications de la soudure autogène, 1996
- [3] R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.
- [4] V.RYBARCOV, « le soudage et le coupage des métaux».2e EDITION.1983.EDITION MIR.MOSCOU
- [5] Site Internet :  
[http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+soudage.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base+de+soudage+et+de+scru](http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+soudage.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base+de+soudage+et+de+scru&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a)  
Fichier pratique de scruté  
ED83 3E Edition. Septembre 2009.
- [6] SAF-AIR LIQUIDE, Procédés TIG. et plasma, Ed.1-SUY 542/20/2000.
- [7] Guide de soudage, Soudage l'arc sous gaz de protection TIG ,MIG ,MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
- [8] R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOUT1995
- [9] VARIANTE DE BROCEE TIG PAR MPULSION, Soudage électrique à l'électroderéfractaire ; publications Centre de Soudage de Cheraga
- [10] H.GRANJON. «Bases métallurgiques de soudage » 2 ème édition. publications desoudage et de ses applications Paris .1995.

[11] Documents (PDF) défauts de soudage des pipelines Yamani Institute of Technology.

[12] Documents Yamani Institute of Technology

[13] Documents Technique COSIDER Biskra 2012.

[14] Document de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012

[15] Catalogue de poste soudeuse de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012.

[16] Documents Technique .C.N.D. COSIDER. Biskra 2012.