

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique.

Option: Construction Mécanique.

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de:

MASTER

Étude les défauts de soudage des pipelines

Présenté par :

- BENEDDEB Mostefa

Proposé et dirigé par :

- Pr. BOUMERZOUG Zakaria

Promotion : Juin 2012

Sommaire

Introduction général

Chapitre I : Soudage des pipelines.

I.1. Introduction	02
I.2. Procédés de soudage :	02
2.1. Soudage par pression	03
2.2. Soudage par fusion.....	03
2.2.1. Soudage à l'arc électrique	03
2.2.1.1. Généralités sur l'arc de soudage	03
2.2.1.2. Principe de soudage à l'arc électrique.....	04
2.2.2. Le soudage avec électrodes enrobées	05
2.2.2.1. Principe du procédé	05
2.2.2.2. Les électrodes	05
2.2.2.3. Protection de métal en fusion	06
2.2.2.4. Apport d'élément.....	06
2.2.2.5. Types d'électrodes	06
2.2.3. Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG.....	06
2.2.3.1. Principe et œuvre du procédé	07
2.2.3.2. Les gaz de protection en TIG	07
2.2.4. Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.....	08
2.2.4.1. Gaz de protection	08
2.2.4.2. La composition des fils dépend	08
II. Soudage des aciers à faible teneur en carbone	08
II.1. Introduction.....	08
II.2. Les différentes zones d'un assemblage soudé	09
2.1. Le métal de base	09
2.2. La zone fondue.....	09
2.3. La zone thermiquement affectée (Z.A.T)	09
2.4. Zone de liaison.....	09
III. Soudage des pipelines	10
III.1. Introduction	10

III.2. Le soudage des pipelines	10
2.1. Procédé à l'arc électrique à l'électrode enrobée.....	10
a) Soudage manuel	11
b) Soudage automatique	12
Chapitre II : Les défauts des soudages.	
I. FISSURES	15
1. Généralités.....	15
2. Orientation des fissures.....	15
3. Types de fissures.....	16
4. Fissures à Chaud (ou de Solidification)	20
5. Fissures à Froid (ou d'Hydrogène)	22
6. Fissures (ou Arrachements) Lamellaires potée.....	23
7. Fissures de Fluage « Reheat Cracking ».....	29
II. Manques de fusion.....	31
1. Localisations possibles des manques de fusion	31
2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	31
3. Manque de fusion entre passes.....	32
4. Manque de fusion à la racine de la soudure	33
III. Manque de pénétration	34
1. Localisations possibles des manques de pénétration	34
2. Manque de pénétration à la racine	34
3. Manque de pénétration dans la soudure	35
IV. Inclusion gazeuses	36
1. Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités	36
2. Porosités vermiculaires	36
3. Porosités de reprise	37
4. Porosités uniformes.....	38
V. Inclusion solides	39
1. Différents types d'inclusions solides	39
2. Inclusions de laitier	39
3. Inclusions de tungstène	40
4. Inclusions de cuivre	41
VI. Excès de matière	41
1. Généralité	41

2. Excès de pénétration	42
3. Surépaisseur	43
4. Recouvrements non fusionnés (Débordements)	44
VII. Dénivellement	45
1. Dénivellement	45
VIII. Cratère	45
1. Cratère	45
IX. Défauts de surface	46
1. Morsures/Caniveaux..	46
2. Effondrement à la racine..	47
3. Amorces d'arc..	49
4. Projections sur le métal de base..	49
5. Défaut d'aspect	50
X. Métal de base :(Inspection a défauts)	51
1. Inspection des matériaux..	51
2. Inspection de tubes	51
3. Inspection de tôles	52
4. Défauts de laminage	53
5. Imperfections du métal de base	53
6. Repliure	54
Chapitre III : Méthodes Expérimentales.	
I. Méthodes Expérimentales	58
I.1. Introduction	58
I.2. Présentation de l'entreprise COSIDER Biskra.....	58
I.3. La diversité de l'activité à travers les filiales.....	59
I.4. Procédé de soudage à COSIDER	60
I.5. Les étapes de soudage au niveau de COSIDER de Biskra	63
I.6. Prélèvement des échantillons :	67
II. Contrôle des cordons :	68
II.1. Contrôle visuel et dimensionnel :	68
1.1. Principe du contrôle :	68
1.2. Condition du contrôle visuel et dimensionnel :	68
1.3. Matériels de contrôle :	68
1.4. Forme et dimensions :	69

II.2. Contrôle magnétoscopique :	69
2.1. Principe du contrôle magnétoscopique :	69
2.2. Rappel de quelques notions de magnétisme.....	69
2.3. Méthodes d'aimantation.....	70
2.4. Produits détecteurs magnétiques :	72
2.5. Contrôle de la qualité de l'aimantation :	72
2.6. Mode d'examen :	73
2.7. Avantages du contrôle par magnétoscopie :	73
2.8. Inconvénients du contrôle par magnétoscopie :	73
3.1. Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique :	73
3.2. Les sources de rayonnements :	74
3.3. Les films radiographiques	76
3.4. La constitution d'une cassette de film radiographique	79
3.5. Les rayonnements parasites :	80
3.6. Le flou géométrique :	80
3.7. La projection elliptique :	80
3.8. Le tir au contact :	81
3.9. Le repérage des radiogrammes :	83
3.10. Avantages du contrôle par radiographie :	83
3.11. Inconvénients du contrôle par radiographie :	83
4.1. Principe du contrôle par ressuage :	84
4.2. Applications du contrôle par ressuage :	84
4.3. Méthode de mise en œuvre du ressuage :	84
4.4. Avantages du contrôle par ressuage :	85
4.5. Inconvénients du contrôle par ressuage :	85
Chapitre IV : Résultats et interprétations .	
I. Résultats et interprétations :	87
I.1. Introduction :	87
2. Types de défauts :	87
II. Détection des défauts par rayonnements :	91
1. Pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo) :	91
2. Un désalignement des pièces à souder (Offset ou Hi-Lo) et un remplissage insuffisant à la racine du joint :	91
3. Concavité excessive (insuffisamment rempli) :	92

4. Pénétration excessive (glaçon) :	92
5. Caniveau externe :	93
6. Caniveau interne à la racine :	93
7. Concavité interne à la racine :	94
8. Cratère à la racine localisé :	94
9. Pénétration incomplète ou manque de pénétration :	95
10. Inclusions de laitier en inter passe :	95
11. Inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer) :	96
12. Manque de fusion (sur les côtés des plaques) :	96
13. Manque de fusion entre les passes :	97
14. Porosités dispersées :	97
15. Nids de Porosités ou soufflures agglomérées :	98
16. Porosités ou soufflures enlignées la racine du joint :	98
17. Fissures transversales :	99
18. Fissures longitudinales :	99
19. Fissures longitudinales à la racine :	100
20. Inclusions de tungstène :	100
III. Les remèdes :	101
Conclusion générale	
Bibliographique.	

Liste des figures

Figure1 : Principe de soudage par pression.....	3
Figure2 : Principe de soudage à l'arc électrique.	4
Figure3 : L'électrode enrobée.....	5
Figure 4 : Electrodes de soudage.....	6
Figure 5 : Principe de soudage TIG.....	7
Figure 6 : Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	10
Figure 7 : Principe de soudage manuel.....	11
Figure 8 : Soudage des pipelines (type manuel).....	12
Figure 9 : Soudage des pipelines type automatique.....	13
Figure 10 a : La fissure longitudinale.....	16
Figure 10 b : La fissure transversale.....	16
Figure 11 : Les types de fissure.....	17
Figure 12 : Fissure de Gorge (Throat Cracks).....	17
Figure 13 : Fissure de Racine.....	18
Figure 14 : Fissure de Cratère.....	18
Figure 15 : Fissure au raccordement.....	19
Figure 16: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	20
Figure 17: Fissure à chaud (ou de solidification).	20
Figure 18 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.....	21
Figure 19 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	22
Figure 20: Arrachement lamellaire dans un joint en T.....	23
Figure 21 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.....	24
Figure 22 : Relation entre STRA et concentration en soufre pour tôle de 12.5 à 50mm d'épaisseur.....	25
Figure 23 a : Configuration du Joint la soudure à deux angles.....	26
Figure 23b : Configuration du Joint, les soudures à deux faces sont moins susceptibles.....	26
Figure 23c : Configuration du Joint, plus petites soudures d'angle à deux faces.....	26
Figure 23d : Configuration du Joint, la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible.....	27
Figure 24a : Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible.....	28
Figure 24b : Beurrage in-situ.....	28
Figure 25 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	29
Figure 26a : Soudage en position à plat–haut degré de raffinement de la ZAT.....	30
Figure 26b : Soudage en position verticale ou horizontale –faible degré de raffinement de la ZAT.....	30

Figure 27 : Localisations possibles des manques de fusion.....	31
Figure 28 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	31
Figure 29 : Manque de fusion entre passes.....	32
Figure 30 : Manque de fusion à la racine de la soudure.....	33
Figure 31a : Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure.....	34
Figure 31b : Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur de la soudure.....	34
Figure 32 abc & d : Manque de pénétration dans la soudure.	35
Figure33a : Apport (chaleur) arc trop faible.....	36
Figure33b : Diamètre électrode trop grand.....	36
Figure 34a : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.....	36
Figure 34b : Inclusions gazeuses porosités de reprise.....	37
Figure 34c : Inclusions gazeuses porosités uniformes.....	38
Figure 35a : Inclusions de laitier.	39
Figure 35b : Inclusions de tungstène.	40
Figure 35c : Inclusions de cuivre.	41
Figure36 : Excès de matière.	42
Figure37 : Excès de pénétration.	42
Figure38 : Convexité excessive & Surépaisseur excessive.....	43
Figure39 : Recouvrements non fusionnés (Débordements).....	44
Figure 40 : Dénivellement.....	45
Figure 41 : Cratère.....	46
Figure 42 : Défauts de surface (Morsures/Caniveaux).....	47
Figure 43a : Effondrement à la racine.	48
Figure 43b : Effondrement.	48
Figure 44 : Amorces d'arc.	49
Figure 45 : Projections sur le métal de base.....	50
Figure 46 : Défaut d'aspect.	51
Figure 47 : Métal de base (Inspection a défauts).	52
Figure 48 : Inspection de tôles.	52
Figure 49 : Défauts de laminage.	53
Figure 50 : Imperfections du métal de base.	53
Figure 51 : Repliure.	54
Figure 52 : Doublure de laminage.	54
Figure 53 : Dommages Mécaniques.....	55
Figure 54 : Pipelines au niveau de Cosider.....	60
Figure 55 : Poste de soudure à l'arc électrique.....	61
Figure 56 : Les baguettes de soudage.....	62
Figure 57 : Préparation d'un morceau de tube.....	63

Figure 58 : Fixation du morceau de tube.....	64
Figure 59 : Etat irrégulier de la surface transversale.....	64
Figure 60 : Polissage du contour du tube.....	64
Figure 61 : Limage deuxième tube.....	65
Figure 62: Préparation du chanfrain.....	65
Figure 63 : Types des chanfreins (chanfrein v, chanfrein x).....	65
Figure 64 : Positionnement des deux tubes à assembler.....	66
Figure 65 : La préfixation des deux tubes par deux points de soudure.....	66
Figure 66 : Début de soudage.....	66
Figure 67: Cordon de soudure.....	67
Figure 68 : Etat du cordon de soudure après brossage.....	67
Figure 69 : Prélèvement des échantillons.....	68
Figure 70 : Principe du contrôle magnétoscopique.....	69
Figure71 : Contrôle par circuit magnétique fermé.....	70
Figure 72 : Autre méthode de contrôle de par circuit magnétique fermé.	71
Figure 73 : Autre méthode de contrôle de par circuit magnétique fermé.....	71
Figure 74 : Méthode de contrôle de par circuit magnétique ouvert.....	71
Figure 75 : Contrôle par passage direct de courant électrique.....	72
Figure 76 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique	74
Figure 79 : Le tube à rayons X.....	75
Figure 80 : Le radio-élément.....	76
Figure 81 : Structure d'un film radiographique.....	77
Figure 82 : Développement manuel d'un film radiographique.....	78
Figure 83 : La cassette simple film.....	79
Figure 84 : La cassette double films.....	79
Figure 85 : Le flou géométrique.....	80
Figure 86 : La projection elliptique.....	81
Figure 87 : Le tir au contact.....	81
Figure 88 : indicateurs de qualité d'image (IQI).....	82
Figure 89 : Le repérage des radiogrammes	83
Figure 90 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux, Fissure, Amorces d'arc).....	87
Figure 91 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux)....	88
Figure 92 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère et Fissure).....	88
Figure 93 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux, et Fissure).....	89
Figure 94 : Cordon de soudure avec les défauts (fissure).....	89
Figure 95 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusion et cratère).....	90
Figure 96 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère).....	90
Figure 97 : L'image radiographique pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo)...	91

Figure 98 : L'image radiographique d'un désalignement des pièces à souder.....	91
Figure 99 : L'image radiographique concavité excessive (insuffisamment rempli)...	92
Figure 100 : L'image radiographique pénétration excessive (glaçon).....	92
Figure 101 : L'image radiographique caniveau externe.....	93
Figure 102 : L'image radiographique caniveau interne à la racine.....	93
Figure 103 : L'image radiographique concavité interne à la racine.....	94
Figure 104 : L'image radiographique cratère à la racine localisé.....	94
Figure 105 : L'image radiographique pénétration incomplète ou manque de pénétration.....	95
Figure 106 : L'image radiographique inclusions de laitier en inter passe.	95
Figure 107 : L'image radiographique inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer).	96
Figure 108 : L'image radiographique manque de fusion (sur les côtés des plaques).	96
Figure 109 : L'image radiographique manque de fusion entre les passes.....	97
Figure 110 : L'image radiographique porosité dispersée.	97
Figure 111 : L'image radiographique nid de porosité ou soufflure agglomérée.	98
Figure 112 : L'image radiographique porosité ou soufflure enlignée la racine du joint.	98
Figure 113 : L'image radiographique fissure transversale.	99
Figure 114 : L'image radiographique fissure longitudinale.	99
Figure 115 : L'image radiographique fissure longitudinale à la racine.	100
Figure 116 : L'image radiographique inclusion de tungstène.	100
Figure 117 : Traitement d'un cordon de soudure par chauffage.....	101
Figure 118 : L'image du cordon de soudure.....	101
Figure 119 : Enlèvement de la matière du cordon de soudure.....	102

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de poste de soudage.....	60
Tableau 2 : de caractéristiques fonctions mécaniques et chimiques des baguettes de soudage.....	62
Tableau 3 : les différents types de radio-éléments δ	76
Tableau 4 : classification des films et coefficient de sensibilité	77
Tableau 5 : condition de traitement manuel d'un film	78
Tableau 6 : montre bien la méthode de mise en œuvre du ressuage.....	84

Introduction générale

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

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Le but de ce mémoire de master est d'étudier les défauts dans un cordon de soudure des pipelines au niveau de Cosider de Biskra où ce travail a été réalisé.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage.
- Le deuxième chapitre est réservé aux défauts de soudage des pipelines.
- Le troisième chapitre contient une présentation de l'unité Cosider de Biskra et la technique de soudage et les techniques de contrôle des soudures.
- Le quatrième chapitre est consacré aux résultats et interprétations des défauts observés dans les cordons de soudures et leurs remèdes.

I.1. Introduction :

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service ⁽¹⁾.

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base ⁽²⁾.

I.2. Procédés de soudage :

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

- Le type d'énergie mise en œuvre ;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser ⁽³⁾.

❖ Procédés de soudage de pièces métalliques

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

- Soudage par explosion.
- Soudage par impulsion magnétique.

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

2.1. Soudage par pression :

Le soudage par pression (Fig.1.), regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure en général sans métal d'apport, par application d'une pression suffisante pour obtenir une déformation plastique des zones à souder, un chauffage localisé permet la liaison atomique de la zone de soudage ⁽¹⁾.

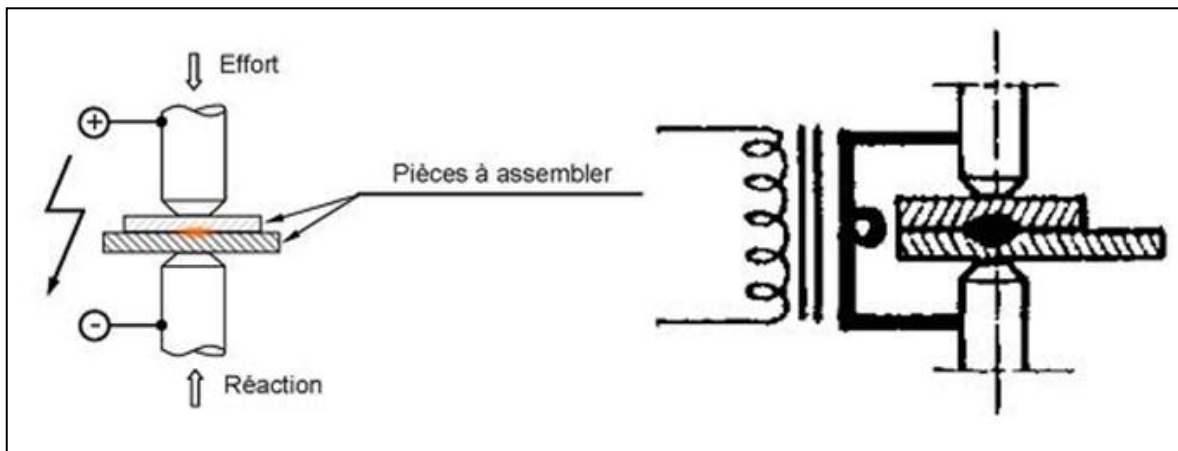


Figure1 : Principe de soudage par pression.

2.2. Soudage par fusion :

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie électriques ou chimiques...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Soudage à l'arc électrique ;
- Soudage à l'arc sous gaz de protection ;
- Soudage par jet de plasma ;
- Soudage sous flux ⁽³⁾.

2.2.1. Soudage à l'arc électrique :

2.2.1.1. Généralités sur l'arc de soudage :

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisée par une densité de courant élevée et par une faible différence de potentiel. Par une décharge électrique on entend

le passage du courant électrique à travers un milieu gazeux. Il ya plusieurs formes ou types de décharges électrique : en arc, à lueur, par étincelles, décharge orageuse (éclair) et autre elles par leurs durée, tension, intensité de courant et autres paramètres⁽⁴⁾.

2.2.1.2. Principe de soudage à l'arc électrique :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. Electrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder (Fig.2.).

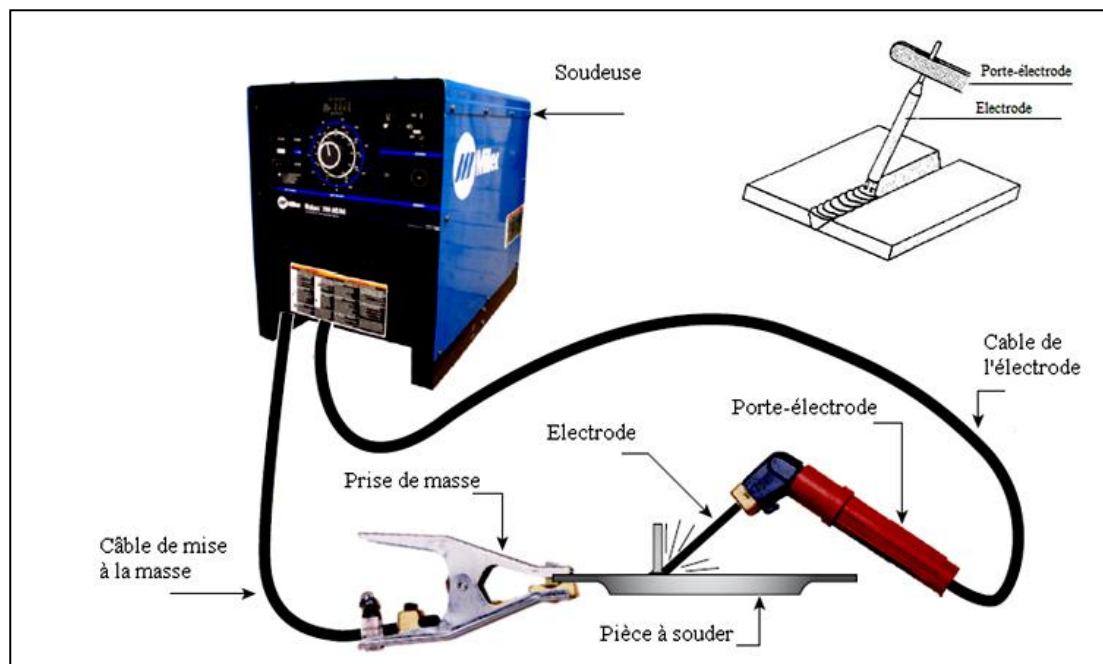


Figure2 : Principe de soudage à l'arc électrique.

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

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

- Les effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est à l'arc court entre une électrode formant ainsi l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion ;
- Les phénomènes de transport de matière qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, formant un dépôt se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique

recherchée. Il est à noter que pour le cas des électrodes réfractaires il n'y a pas de transfert entre l'électrode et la pièce.

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

- Le soudage avec électrode enrobées ;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG ;
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG ;
- Le soudage automatique sous flux⁽³⁾.

2.2.2. Le soudage avec électrodes enrobées :

2.2.2.1. Principe du procédé :

Un arc électrique établi entre une électrode et les bords des pièces à assembler, provoque leur fusion et crée un bain de métal liquide reçoit les goutte de métal de l'électrode (Fig.3.). L'arc résulte du passage d'un courant électrique intense à travers une atmosphère de gaz ou de vapeur, normalement non-conductrice. Les électrons circulent de la cathode (pôle négatif) vers l'anode (pôle positif) que constituent l'extrémité de l'électrode et l'impact de l'arc sur la pièce : la polarité est choisie ionisée ne représente qu'une faible part d'énergie calorifique mais irradie surtout des rayonnements électromagnétique (lumière visible, ultra violetes, ...).

La tâche anodique et surtout la tâche cathodique, où se présentent les ions positifs, fournissent ensemble l'essentiel de la chaleur. La tâche anodique, bombardée par les électrons est par contre à une température plus haute (3500°C) que celle de la tâche cathodique (2400°C). Cette situation est permanente en courant continu ; elle s'inverse à chaque alternance en courant alternatif. Le réamorçage s'obtient dans la mesure où l'anode, devenue cathode, reste suffisamment chaude pour devenir émettrice⁽⁵⁾.

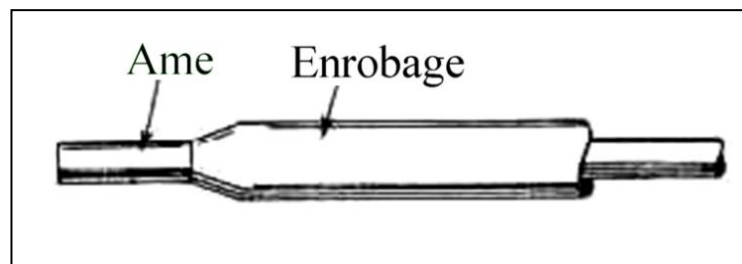


Figure3 : L'électrode enrobée.

2.2.2.2. Les électrodes :

Les électrodes de soudages sont constituées par :

- Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant est dont fusion forme le métal déposé ;

- Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :
 - Stabilité électrique de l'arc ;
 - Protection du métal en fusion ;
 - Apport d'éléments dans le métal déposé⁽⁵⁾.

2.2.2.3. Protection de métal en fusion :

L'atmosphère créée lors de la fusion de l'enrobage isole le métal liquide de l'oxygène et de l'azote de l'air. Chaque goutte de métal est entourée d'une protection de laitier qui viendra ensuite surnager sur le bain de fusion en formant aussi le départ des gaz occlus⁽⁵⁾.

2.2.2.4. Apport d'élément :

Au cours de la fusion, certains constituants plus volatils ont tendance à disparaître, comme le manganèse, l'enrobage compense alors ces pertes. De surcroît, l'enrobage fournit des constituants nouveaux (molybdène, nickel...). Le laitier modifie également la tension superficielle du métal liquide, donnant au cordon une forme plus ou moins concave⁽⁵⁾.

2.2.2.5. Types d'électrodes :

Les électrodes se définissent par le diamètre de l'âme et la nature chimique de l'enrobage.

Les diamètres normalisés sont : (1,25-1,6-3,15-4-5-6)mm

Les enrobages les plus utilisés sont :

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



Figure 4 : Electrodes de soudage.

2.2.3. Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG :

Le TIG produit des assemblages d'un aspect irréprochable, qui dans bien des cas, ne nécessitent aucune reprise ultérieure. De plus, autre aspect non négligeable, ce procédé s'applique à des matériaux aussi divers que les aciers au d'aluminium et de cuivre⁽⁶⁾.

2.2.3.1. Principe et œuvre du procédé :

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène InertGas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) gas tungstène arc welding) (Fig.5).

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires⁽⁷⁾.

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

Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène⁽⁸⁾.

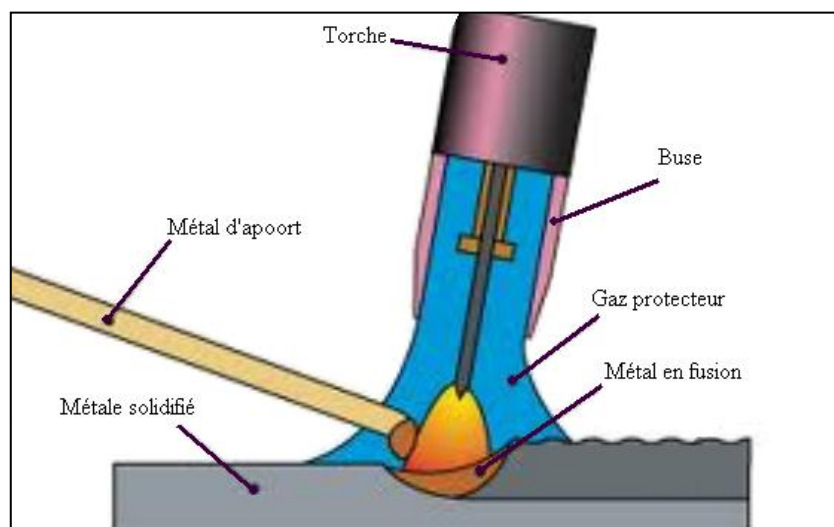


Figure 5 : Principe de soudage TIG.

2.2.3.2. Les gaz de protection en TIG :

Les gaz inertes utilisés sont soit de l'argon, soit de l'hélium soit des mélanges argon-hélium. L'argon, de qualité commerciale « soudage », est le gaz le plus utilisé car il convient à presque tout les cas d'application.

L'hélium, plus couteux que l'argon, est utilisé lorsque l'on peut tirer profit du fait qu'il permet de plus grandes vitesses de soudage et une pénétration plus profonde. Quand aux

mélanges (généralement à 25%, 50% ou 70% hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix⁽⁹⁾.

2.2.4. Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG

L'arc est protégé entre un fil consommable et les bords de la pièce à souder. Le fil en fusion et le bain de soudure est protégé de l'oxydation de l'air par un flux de gaz inerte (le procédé se dénomme alors M.I.G= métal inerte gaz) ou actif (procédé M.A.G= métal active gas). Le déroulement du fil à vitesse constant permet d'alimenter en métal d'apport le bain de fusion⁽⁵⁾.

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

- le générateur de courant continu ;
- une source de gaz protecteur ;
- un système de refroidissement de troche ;
- la torche ou pistolet⁽⁵⁾.

2.2.4.1. Gaz de protection :

On distingue les gaz inertes et les gaz actifs.

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

2.2.4.2. La composition des fils dépend :

- La nature des matériaux à souder ;
- Des pertes d'éléments pendant le soudage⁽⁵⁾.

II. Soudage des aciers à faible teneur en carbone :

II.1. Introduction

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Les techniques de soudage sont en pleine évolution. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés⁽⁸⁾.

II.2. Les différentes zones d'un assemblage soudé :

2.1. Le métal de base :

Il constitue le métal des pièces à assembler. Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques. L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensible aux changements de phases par précipitations ⁽¹⁰⁾.

2.2. La zone fondue:

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport. Le métal qui constitue la soudure est appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé (Fig.6.)⁽¹⁰⁾.

2.3. La zone thermiquement effectuée (Z.A.T)

Partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiées à un degré quelconque par la chaleur du soudage. Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique ⁽¹⁰⁾.

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

- 1- zone de surchauffe.
- 2- zone austénitique.
- 3- zone partiellement austénitisée ⁽¹⁰⁾.

2.4. Zone de liaison

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la effectuée thermiquement (Z.A.T). En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui été fondu et s'est solidifié et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage (Fig.6.) ⁽¹⁰⁾.

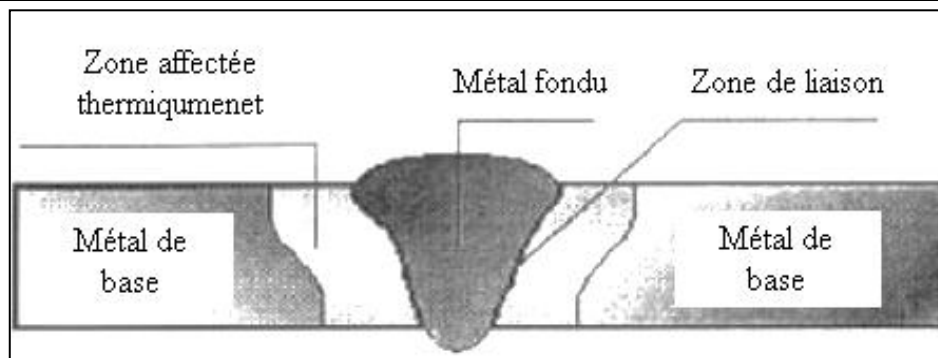


Figure 6 : Les différentes zones d'un assemblage soudé.

III. Soudage des pipelines :

III.1. Introduction :

Souder des pipelines consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler. Cela implique qu'il n'y a pas de matières non métalliques interposées entre les éléments réunis. Cette technique d'assemblage est différente du rivetage, de l'agrafage ou du collage.

Cette soudure doit être homogène, de sorte que les pipelines sont en l'état final à l'emploi.

III.2. Le soudage des pipelines :

Dans l'industrie de COSIDER les assemblages de canalisation de transport de gaz sont préférentiellement effectués par :

2.1. Procédé à l'arc électrique à l'électrode enrobée :

On utilise actuellement le procédé de soudage à l'arc électrique. Les électrodes utilisées se différencient par leurs particularités technologiques, le type et l'épaisseur de l'enrobage, la composition chimique de l'âme et de l'enrobage, le caractère de laitiers, les propriétés mécaniques du métal du cordon et le moyen d'adhérence de l'enrobage à l'âme de l'électrode. La matière composant l'enrobage assure trois fonctions : métallurgique, électrique et physique. En construction des pipelines, on utilise plus particulièrement les électrodes à enrobage cellulosique pour la soudure dite : méthode descendante. Elles permettent d'obtenir une bonne pénétration. Les électrodes à enrobage rutile se distinguent par leur aptitude à réaliser des soudures par la technique montante sur des tubes de petits diamètres. Enfin les électrodes basiques présentent de meilleures qualités mécaniques et notamment la résilience.

On note qu'il existe plusieurs types de soudage des pipelines :

a) Soudage manuel :

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées permet d'assembler ou de recharger des éléments ou des pièces métalliques au moyen de cordons de soudure (Fig.7 et 8.). Il s'agit du type de soudage le plus répandu.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc électrique jaillissant entre les pièces à souder et une électrode fusible fournissant le métal d'apport.

La soudure à l'arc électrique est une soudure de type autogène, pour l'assemblage de pièces en acier. Les assemblages ainsi obtenus sont très résistants puisque l'acier est mis en fusion et les deux éléments soudés ne forment plus qu'une seule masse en acier après soudage.

Les applications de ce procédé sont particulièrement nombreuses. La mobilité des appareils et la grande diversité des types d'électrodes permettent d'effectuer des travaux sur un certain nombre de métaux et de leurs alliages comme les aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables, les fontes et dans certaines conditions, l'aluminium, le cuivre et le nickel. Tous les types d'assemblage (bord à bord, d'angle...) et toutes les positions de soudage (à plat, en corniche...) sont possibles.

Il y a mise en fusion des pièces à souder et du métal d'apport.

Pour obtenir cette fusion il faut une température très élevée supérieure à 3000°C. Celle-ci est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode constituée de métal d'apport) en créant un «arc électrique» qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois de la lumière et une chaleur intenses ⁽¹¹⁾.

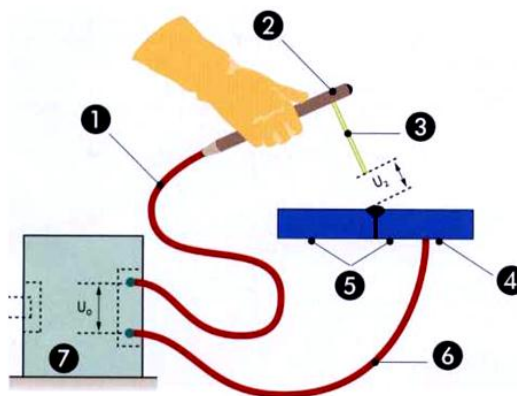


Figure 7 : Principe de soudage manuel.

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| 1. Conducteur de soudage. | 2. Porte-électrode isolé. |
| 3. Electrode enrobée consommable. | 4. Connecteur de pièce. |
| 5. Pièces à assembler. | 6. Connecteur de retour. |
| 7. Générateur de courant de soudage. | |



Figure 8 : Soudage des pipelines (type manuel).

b) Soudage automatique :

➤ Introduction :

Robot de soudure TIG-MIG :

Ce robot de soudure, dédié au soudage TIG (aciers et inox) et au soudage MIG (aciers, inox et alu), nous permet de nous positionner et d'être performants en rapport qualité-prix sur des séries de pièces répétitives (Fig.9.). On note que certaines soudures sont difficiles à réaliser sans robot.

- **Exemple:** le robot nous permet de réaliser des soudures hélicoïdales sur des tubes inox d'épaisseur 1 mm et de longueur 4,20 mètres.

Cette technologie met en œuvre les 6 axes du robot + l'axe externe du positionneur (axe intégré au robot qui tourne le tube en même temps que le bras du robot se déploie longitudinalement) avec des écarts autorisés à l'axe de soudure inférieurs à 0,2 mm pour assurer des soudures de qualité « radio ».

Dès lors qu'un soudeur qualifié a programmé le robot pour souder une pièce positionnée de façon très précise dans un outillage de maintien, le robot de soudure TIG-MIG reproduira automatiquement le même chemin (avec une tolérance extrême inférieure à 0,02 mm) en utilisant les paramètres programmés de soudage (intensité, vitesse d'avance, vitesse de fil, etc.).

➤ **Avantage:**

- ✓ Taux de dépôt élevé.
- ✓ Meilleures propriétés mécaniques et chimiques de la soudure.
- ✓ Fatigue moindre du soudeur.
- ✓ Temps de formation du soudeur réduit.
- ✓ Soudage de joints longs possible.
- ✓ Soudage dans toutes les positions.
- ✓ Économie de temps.
- ✓ Facteur de marche atteignant généralement 100 %.

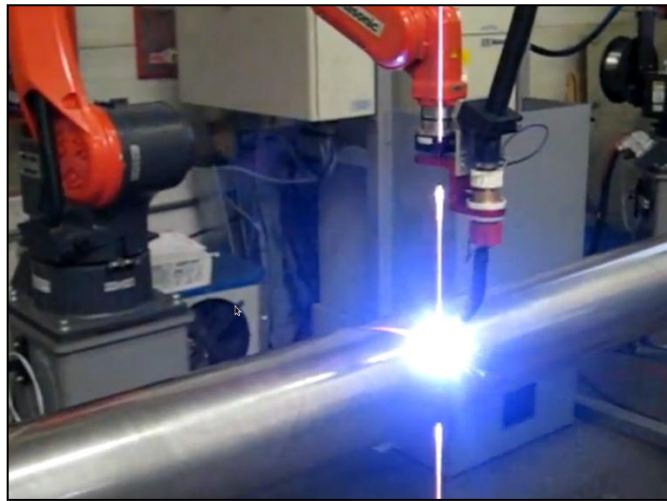


Figure 9 : Soudage des pipelines type automatique.

Les défauts des soudages :

Introduction :

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

I. Les fissures :

1. Généralités :

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

2. Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur⁽¹²⁾.

2.1 Les fissures longitudinales : dans les petites soudures entre fortes sections sont souvent le résultat des taux de refroidissement et de contraintes résiduelles élevées. En soudage à l'arc submergé, elles sont généralement associées à des vitesses de soudage élevées ou peuvent être liées à des problèmes de porosités non apparentes à la surface de la soudure⁽¹²⁾.

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous (Fig.10.a.).

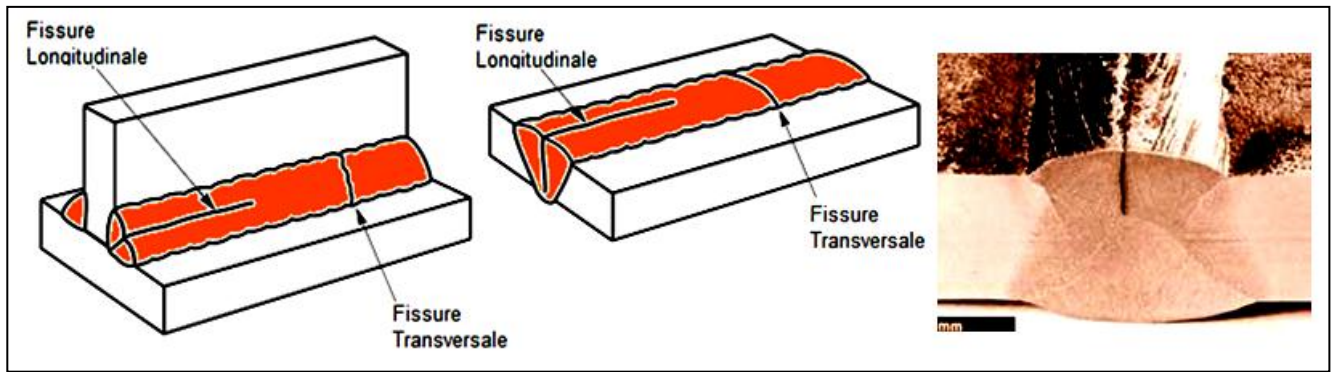


Figure 10 a : La fissure longitudinale.

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

Dans certains assemblages soudés, les fissures transversales se forment dans la zone affectée par la chaleur et non pas dans la soudure. Les fissures transversales sont généralement le résultat de contraintes de retrait longitudinal agissant sur le métal fondu de faible ductilité. La fissuration par hydrogène du métal fondu peut être orientée dans le sens transversal (Fig.10.b.).



Figure 10 b : La fissure transversale.

3. Types des fissures :

La figure 11 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

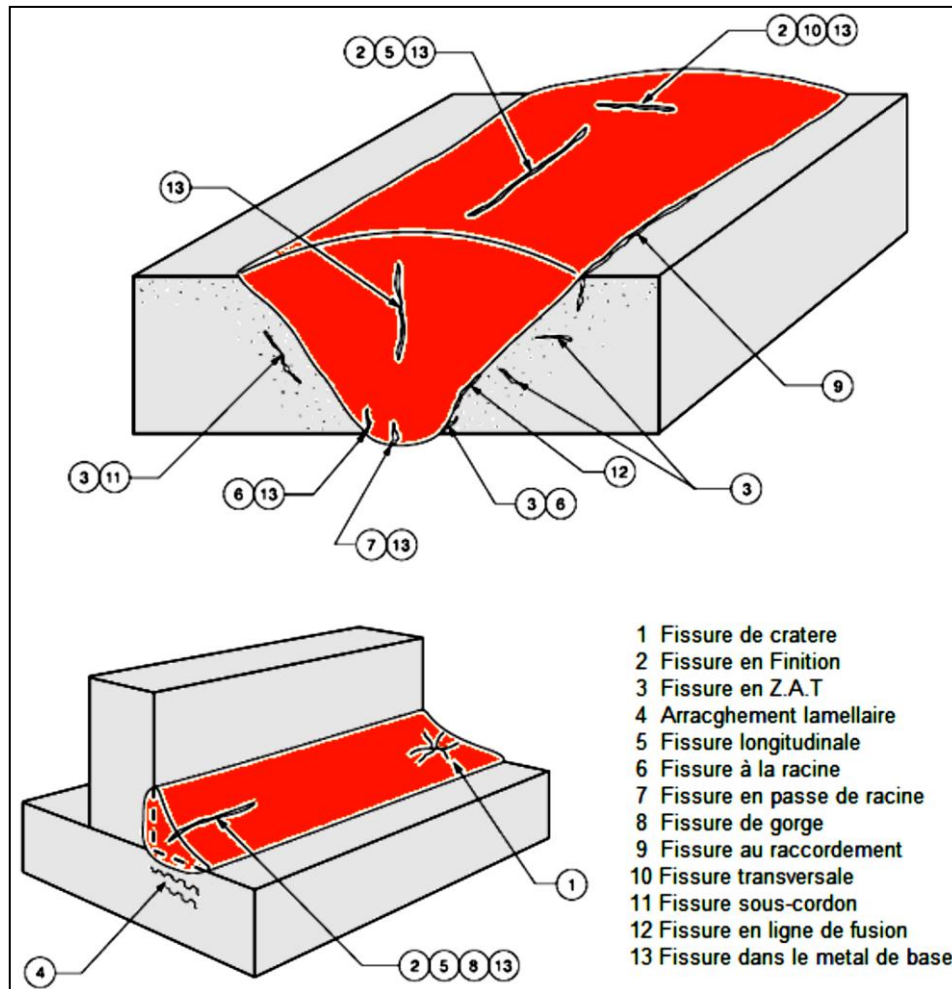


Figure 11 : Les types de fissure.

3.1. Fissures de Gorge (Throat Cracks): ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Fig.12.). Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud⁽¹²⁾.

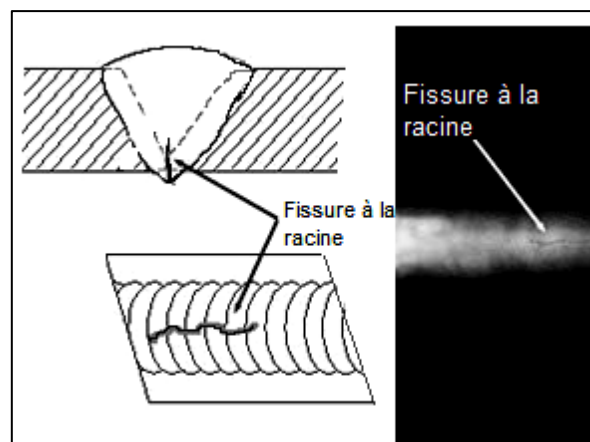


Figure 12 : Fissure de Gorge (Throat Cracks).

3.2. Fissures de Racine: Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Fig.13.). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

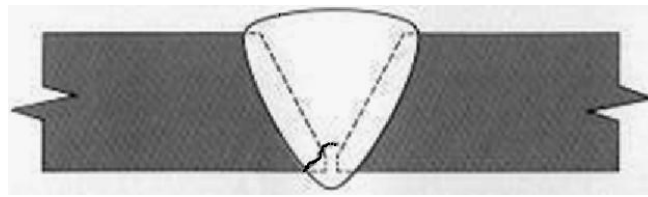


Figure 13 : Fissure de Racine.

3.3. Fissures de Cratère: Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (Fig.14.). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère⁽¹²⁾.



Figure 14 : Fissure de Cratère.

3.4. Fissures au raccordement: Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement (Fig.15.). Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage⁽¹²⁾.

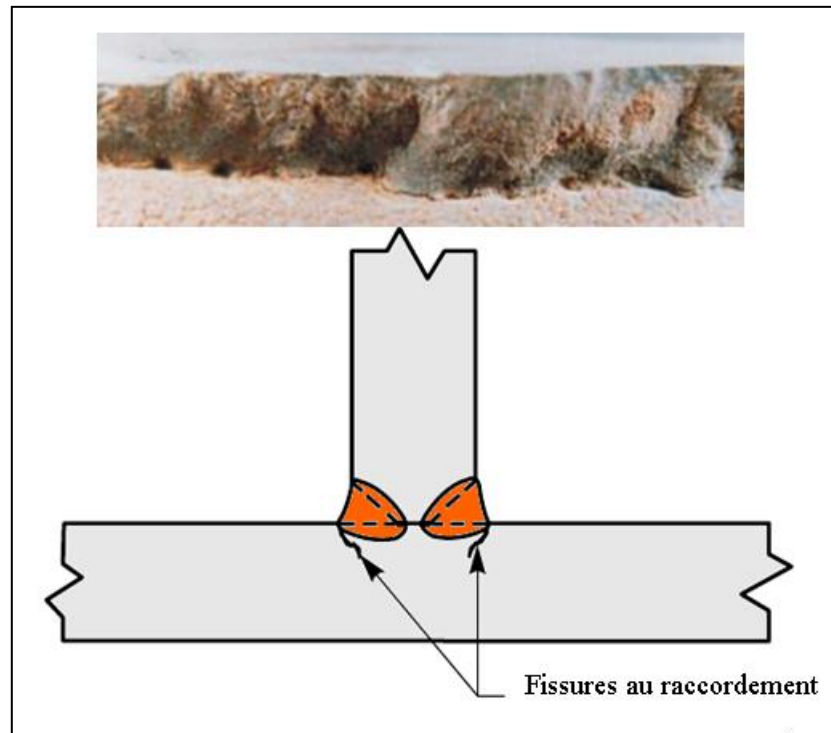


Figure 15 : Fissure au raccordement.

3.5. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) : Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Les fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément:

- (1) Hydrogène.
- (2) Une microstructure de ductilité relativement faible.
- (3) De fortes contraintes résiduelles⁽¹³⁾.

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Fig.16.).

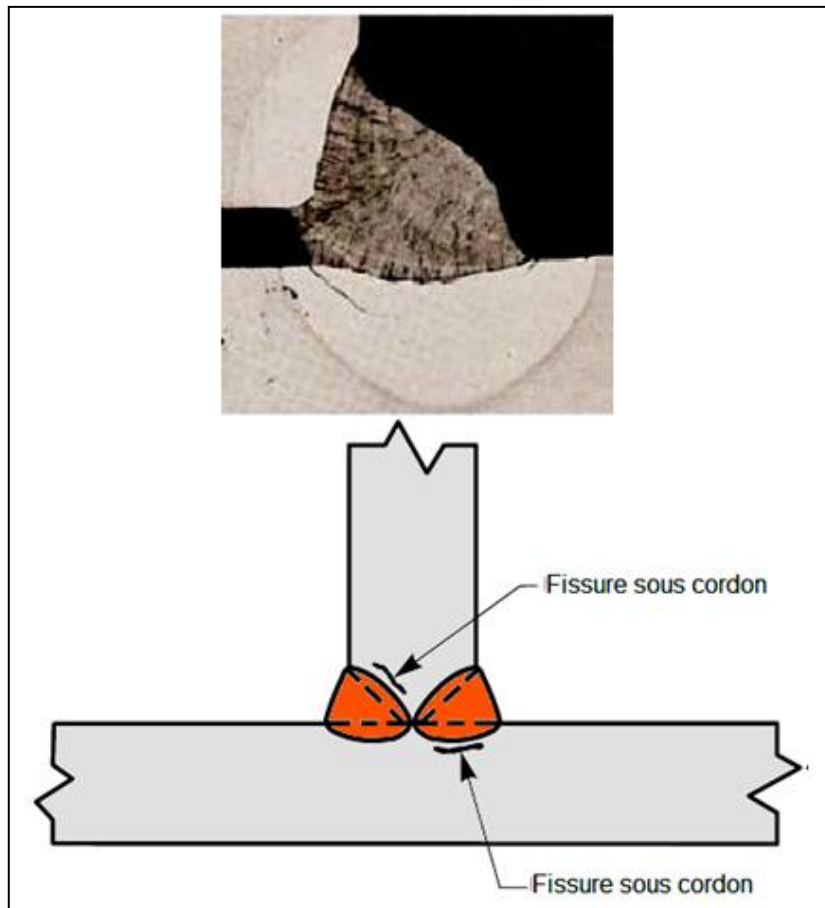


Figure 16: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

4. Fissure à chaud (ou de solidification) :

4.1. Définition :

C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Fig.17.).

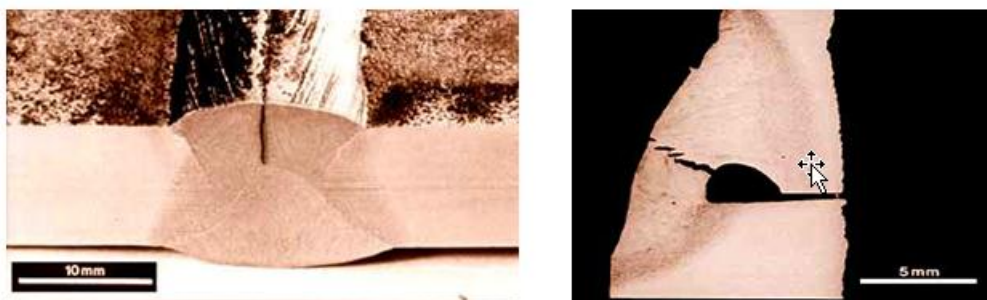


Figure 17: Fissure à chaud (ou de solidification).

4.2. Causes possibles :

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

- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Fig.18.). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.

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

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

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

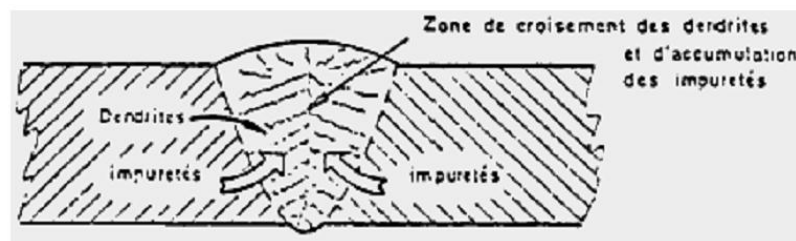


Figure 18 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

4.3. Méthodes de détection :

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

4.4. Méthode de réparation :

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

4.5. Mesures préventives :

- Adapter les paramètres de soudage afin de s'approcher d'un rapport profondeur-largeur 1/1.
- Teneur en P et S dans le métal de base à limiter à 0,05 % pour les deux éléments.

- Limiter l'écartement des assemblages.
- Adapter le régime thermique afin d'éviter un retrait transversal important.

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

5.1. Définition :

Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage (Fig.19.)⁽¹³⁾.

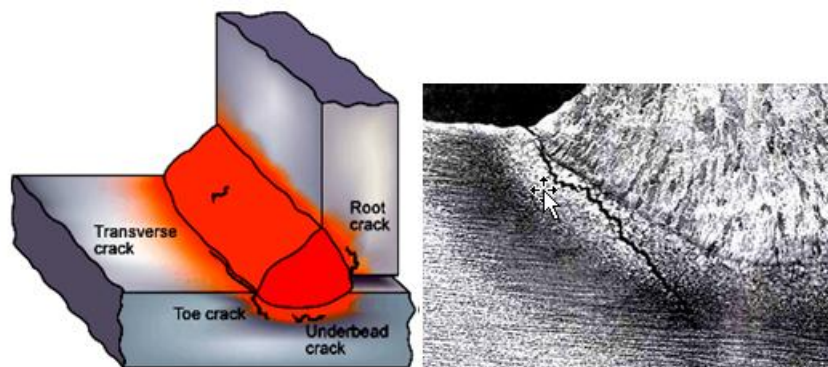


Figure 19 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

5.2. Causes possibles :

La diffusion de l'hydrogène du métal de base vers la zone affectée thermiquement qui a une structure de trempe et qui est donc fissurant.

Ces porosités d'hydrogène ont une pression élevée et peuvent donc être à la base d'une fissure. L'hydrogène peut venir de l'humidité dans ou sur les produits de soudage ou d'autres produits contaminants tels que la peinture, l'huile ou des oxydes.

La probabilité de fissuration se voit en plus augmentée avec la hausse du carbone équivalent et de l'épaisseur.

De grands écartements, un régime thermique faible ou manque de préchauffe peuvent également être des éléments.

5.3. Méthodes de détection :

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

5.4. Méthode de réparation :

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

5.5. Mesures préventives :

- Utiliser des produits de soudage à basse teneur d'hydrogène. Suffisamment sécher les électrodes avant soudage surtout celles avec enrobage basique.
- S'il y a préchauffage, chauffer l'entièreté de la section à la température voulue.
- Suivre consciencieusement la procédure qualifiée pour des aciers à caractère trempant dans la zone affectée thermiquement.

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

6.1. Introduction :

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

Nous décrirons ici, les traits caractéristiques, les principales causes, ainsi que les bonnes pratiques pour minimiser le risque d'arrachement lamellaire⁽¹²⁾.

6.2. Identification :

Aspect Visuel :

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

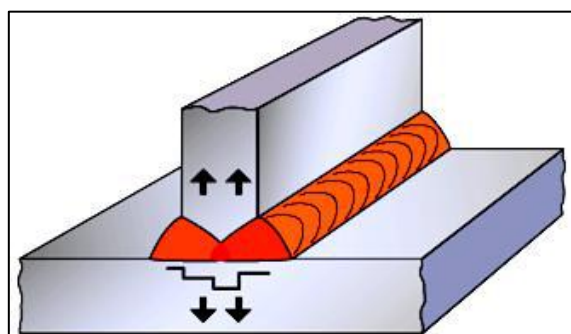


Figure 20: Arrachement lamellaire dans un joint en T.

6.3. Surface de Rupture :

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

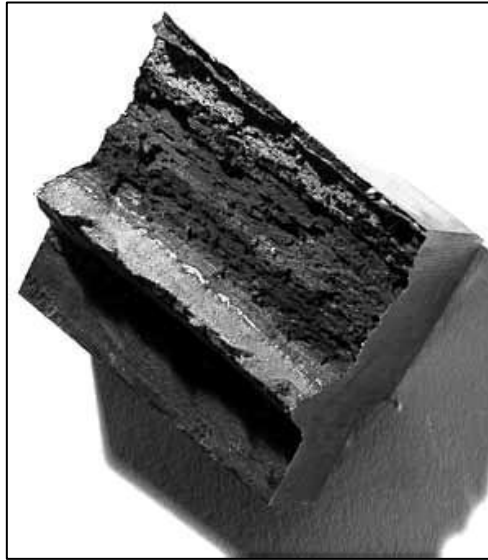


Figure 21 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.

6.4. Les causes :

Il est généralement reconnu qu'il y a trois conditions qui doivent être présentes pour que l'arrachement lamellaire se produise:

- Tension dans le sens de l'épaisseur: les tensions de soudage doivent agir dans la direction la plus courte de la tôle (il à travers l'épaisseur de la tôle)
- Orientation de la soudure : la zone de fusion sera parallèle au plan des inclusions
- Susceptibilité du matériau : la tôle doit avoir une faible ductilité dans le sens de l'épaisseur

Donc, le risque d'arrachement lamellaire sera plus grand si les tensions générées par soudage agissent dans le sens de l'épaisseur. Le risque augmentera aussi avec l'augmentation du niveau d'hydrogène du métal déposé.

6.5. Facteurs à considérer pour réduire le risque d'arrachement :

Le choix du matériau, de la configuration du joint, du procédé de soudage, des consommables, ainsi que le préchauffage, et le beurrage peuvent aider à réduire le risque d'arrachement⁽¹²⁾.

➤ Matériau :

L'arrachement n'est rencontré que dans les tôles laminées en acier et pas dans les produits moulés ou forgés. Il n'y a pas de nuance d'acier qui est plus encline à l'arrachement lamellaire, mais les aciers avec une faible ductilité en épaisseur (STRA–Short Transverse Réduction in

Area) seront susceptibles. En règle générale, les aciers avec STRA supérieur à 20 % sont essentiellement résistants à l'arrachement, alors que les aciers de 10 à 15 % de STRA devraient être utilisés uniquement dans les joints légèrement soumis à contraintes (Fig.22.).

Les aciers de haute résistance présentent un grand risque spécialement lors que l'épaisseur est supérieure à 25mm.

Les aciers traités à l'aluminium avec un faible taux de soufre (<0,005%) présentent un faible risque.

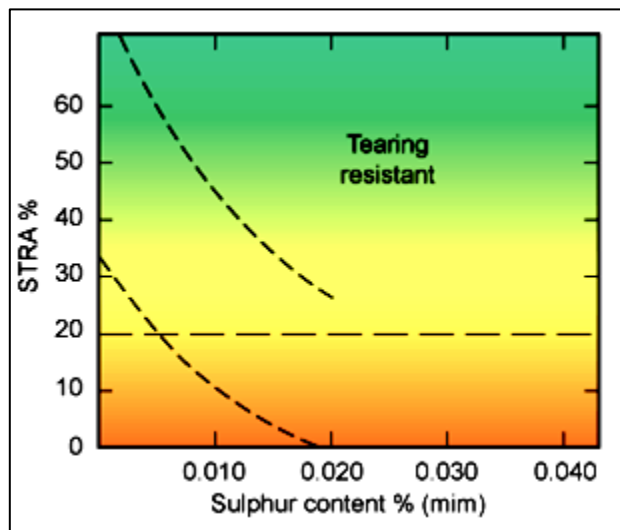


Figure 22 : Relation entre STRA et concentration en soufre pour tôle de 12.5 à 50 mm d'épaisseur.

Les fournisseurs d'acier peuvent fournir des tôles qui ont été testées dans le sens de l'épaisseur avec valeur garantie de STRA supérieure à 20%.

➤ Configuration du Joint :

L'arrachement lamellaire se manifeste dans les joints qui produisent de grandes tensions à travers l'épaisseur, (Ex joints en T ou en coin). Dans les joints en T ou cruciformes, les soudures à pleine pénétration seront particulièrement susceptibles⁽¹³⁾.

Les structures cruciformes dans les quelles la tôle susceptible ne peut se déformer durant le soudage augmenteront aussi grandement le risque d'arrachement.

Dans les joints bout-à-bout, comme les contraintes de soudage n'agissent pas à travers l'épaisseur de la tôle, il y a peu de risque d'arrachement.

Comme la déformation angulaire peut augmenter la tension dans la racine de soudure et/ou les extrémités de celle-ci, l'arrachement peut se produire dans les joints de sections épaisses où les tensions de pliage sont élevées.

Plusieurs exemples de bonnes pratiques dans la conception de joints soudés sont illustrés en (Fig.23.) (abc&d).

(Fig.23a.) - Comme l'arrachement a plus de chance de se produire dans le soudure bout-a-bout en T de pleine pénétration, utiliser, dans la mesure du possible, deux soudures d'angle.

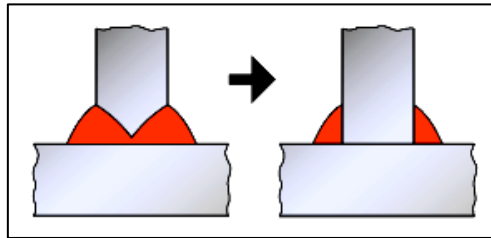


Figure 23 a : Configuration du Joint la soudure à deux angles.

(Fig.23b.)- Les soudures à deux faces sont moins susceptibles que les grandes soudures à une seule face et le soudage alterné pour réduire le stress, diminuera encore le risque d'arrachement spécialement dans la pénétration.

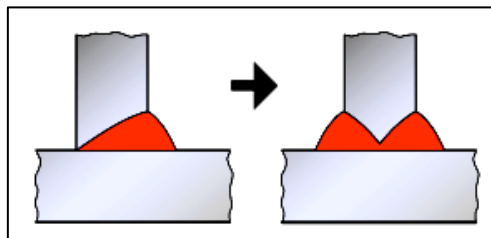


Figure 23b : Configuration du Joint, les soudures à deux faces sont moins susceptibles.

(Fig.23c.)- Les soudures d'angle épaisses à une seule face devraient être remplacées par de plus petites soudures d'angle à deux faces.

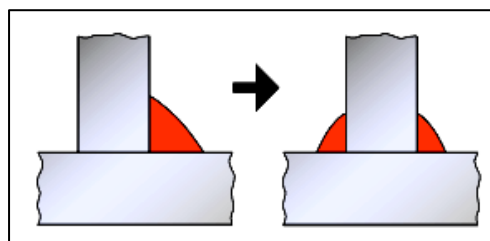


Figure 23c : Configuration du Joint, plus petites soudures d'angle à deux faces.

(Fig.23d.)-Revoir la configuration du joint, de manière à ce que la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible, sera particulièrement efficace dans la réduction du risque d'arrachement.

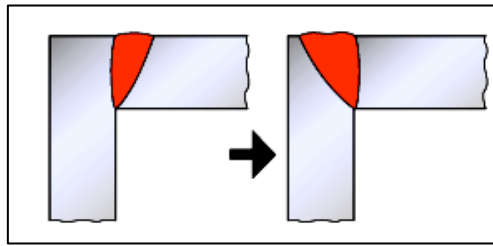


Figure 23d : Configuration du Joint, la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible.

➤ **Dimensions de la soudure :**

L'arrachement lamellaire a plus de chance de se produire dans les soudures épaisses quand le côté d'une soudure d'angle ou en T est supérieur à 20mm. Comme la contrainte contribue au problème, une tôle de section plus mince qui est moins susceptible à l'arrachement peut être quand même à risque dans les situations de contraintes élevées.

➤ **Procédé de soudage :**

Comme le matériau et la configuration du joint sont les causes premières d'arrachement, le choix du procédé de soudage a une influence relativement faible sur le risque. Toute fois, les procédés à grand apport de chaleur, qui génèrent de faibles tensions à travers une plus large ZAT et une pénétration plus profonde, peuvent être bénéfiques.

Etant donné que l'hydrogène du métal déposé augmentera le risque d'arrachement, un procédé à bas hydrogène devrait être utilisé lors du soudage des aciers susceptibles.

➤ **Consommable :**

Lors que possible, le choix d'un consommable de faible résistance peut réduire le risque par diminution de la tension dans le métal de soudure. Un plus petit diamètre de l'électrode qui peut être utilisé pour produire un plus petit flanc, sera utilisé pour prévenir la fissuration. Un consommable à faible hydrogène réduira le risque par diminution du niveau d'hydrogène diffusé par le métal de soudure. Les consommables doivent être choisis selon les recommandations du fabricant.

➤ **Préchauffage :**

Le préchauffage aura un effet bénéfique en réduisant le niveau d'hydrogène diffusé dans le métal de soudure. Ce pendant, il doit être noté que dans un joint retenu, un préchauffage excessif

peut avoir un effet nocif en augmentant le niveau de contrainte produit par la concentration à travers la soudure durant le refroidissement.

Le préchauffage devrait, alors, être utilisé pour réduire le niveau d'hydrogène mais il devrait être appliqué de manière à ne pas augmenter la quantité de contraction à travers la soudure.

➤ **Beurrage :**

Beurrer la surface de la tôle susceptible avec un métal de soudure de faible résistance a été largement utilisé. Comme indiqué, par exemple, dans les (Fig.24.a&b.) ci-dessous pour une soudure en T avec pleine pénétration, la surface de la tôle peut être chanfreinée de façon à ce que la couche de beurrage s'étende 15 à 25mm au-delà de chaque extrémité de la soudure et avoir une épaisseur de 5 à 10mm.

Le beurrage in-situ (a&b.), lorsque le métal de soudure de faible résistance est déposé en premier sur la tôle susceptible avant de remplir le joint, a aussi été utilisé avec réussite. Cependant, avant d'adopter cette technique, les calculs de conception doivent être réalisés avec soin pour s'assurer que la résistance globale du joint sera acceptable.

a) Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible :

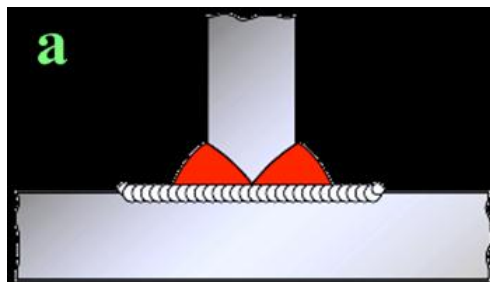


Figure 24a : Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible.

b) Beurrage in situ :

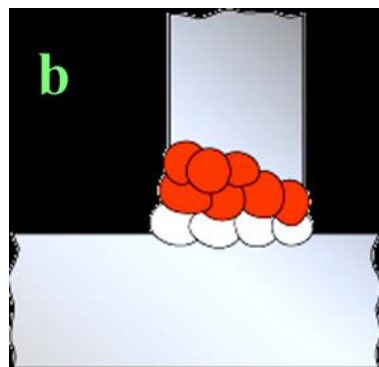


Figure 24b : Beurrage in-situ.

➤ Normes d'Acceptation :

Comme les arrachements lamellaires sont des imperfections linéaires, qui ont des bords très abrupts, ils ne sont pas permis pour les soudures de qualité par la majorité des codes et normes de construction.

6.6. Détection et réparation :

S'ils sont débouchant en surface, les arrachements lamellaires peuvent être facilement détectés par examen visuel, par ressuage, ou par magnétoscopie.

Les fissures internes nécessitent les techniques d'examen par ultrasons mais ils peut ya voir un problème de distinction entre les arrachements lamellaires et les bandes d'inclusions.

L'orientation des arrachements les rend, pour la plus part du temps, impossibles à déceler par radiographie.

7. Fissures de réchauffages (Reheat cracking) :

7.1. Définition :

Forme de fissure qui apparaît dans des aciers au Va ou Mo qui, dans le cas d'une teneur suffisamment élevée, provoquent une trempe importante dans la zone affectée thermiquement et par la suite une ductilité au fluage basée aux joints des grains dans cette zone affectée thermiquement, d'où apparition de fissures lors du fonctionnement à température élevée (Fig.25.).

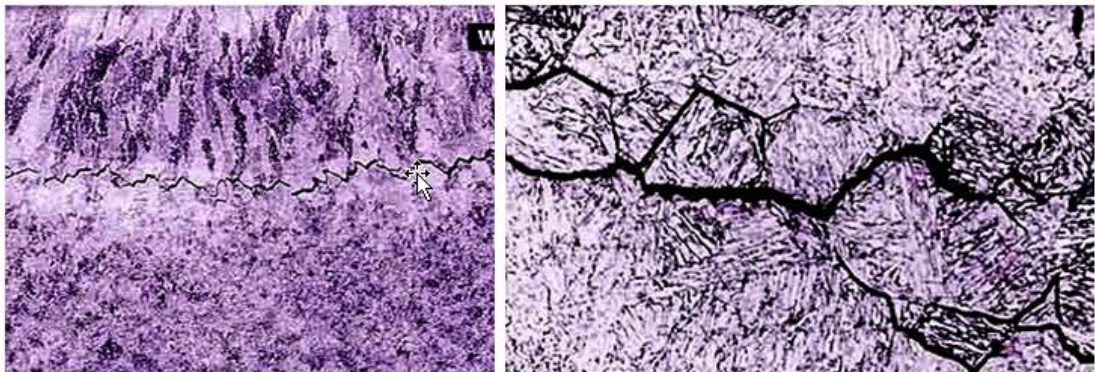


Figure 25 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).

7.2. Causes possibles :

Des facteurs contribuant sont :

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

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

7.3. Méthodes de réparation :

Traitement thermique de la zone de soudage afin de restaurer la ductilité de la zone influencée thermiquement, suivi par l'élimination du défaut jusqu'à 5mm au-delà de l'extrémité de la fissure. Préchauffage suffisant avant la réparation; elle-même étant suivie par un nouveau traitement thermique (Fig.26ab.).

7.4. Mesures préventives :

- Elimination de toute entaille avant traitement thermique.
- Traitement de détente entre les différentes passes.
- Choix du matériau-Procédure et technique de soudage.

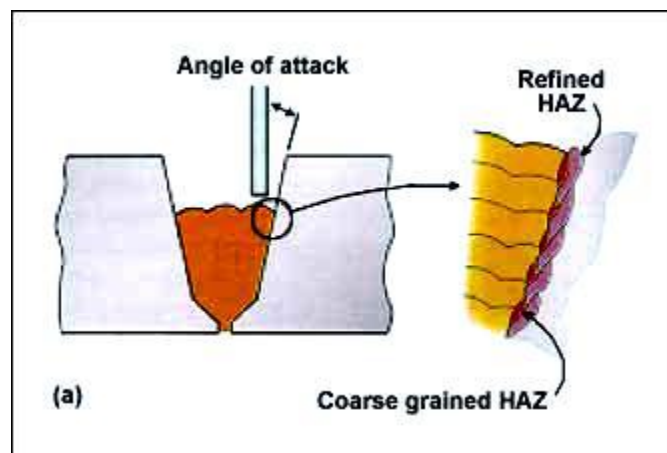


Figure 26a : Soudage en position à plat – haut degré de raffinement de la ZAT.

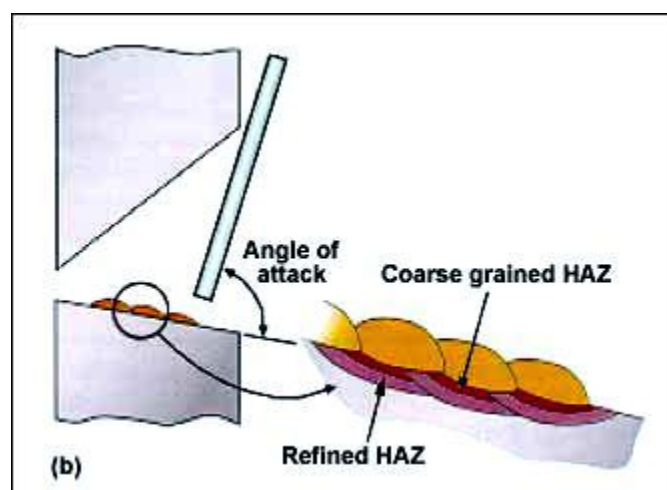


Figure 26b : Soudage en position verticale ou horizontale – faible degré de raffinement de la ZAT.

II. Manque de fusion :

1. Localisations possibles des manques de fusion :

Des manques de fusion peuvent apparaître (Fig.27) :

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

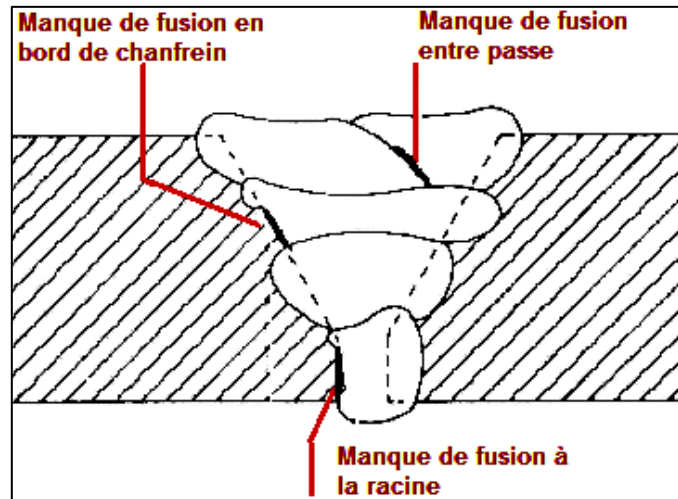


Figure 27 : Localisations possibles des manques de fusion.

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

2.1. Définition :

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (Fig.28.).

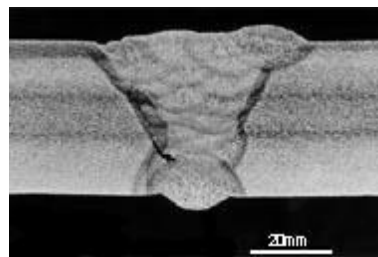


Figure 28 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

2.2. Causes possibles :

- Energie de l'arc trop faible.
- Vitesse de soudage trop élevée.
- Mauvais angle de l'électrode.
- Métal d'apport qui coule devant l'arc à la suite de la position de soudage.

- Inductance trop importante en soudage MAG.
- Bords à souder mal nettoyés.

2.3. Méthodes de détection :

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

2.4. Méthodes de réparation :

- Eliminer la partie défectueuse et ressouder.

2.5. Mesures préventives :

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

3. Manque de fusion entre passes :

3.1. Définition :

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Fig.29.).

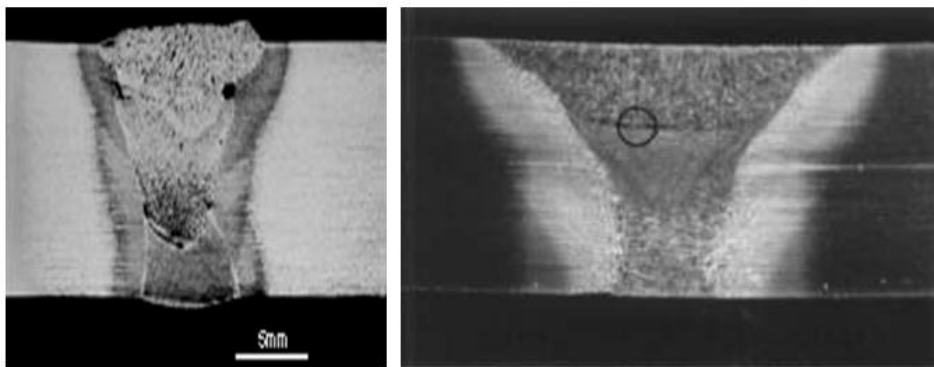


Figure 29 : Manque de fusion entre passes.

3.2. Causes possibles :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.3. Méthodes de détection :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.4. Méthodes de réparation :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

3.5. Mesures préventives :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

4. Manque de fusion à la racine de la soudure :

4.1. Définition :

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration (Fig.30).

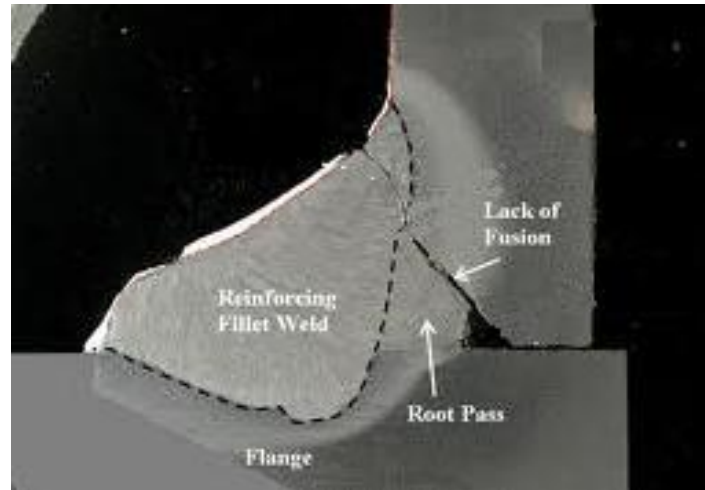


Figure 30 : Manque de fusion à la racine de la soudure :

4.2. Causes possibles :

Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure Autres causes spécifiques:

- Ecartement trop faible.
- Méplat trop important lors de la préparation.
- Diamètre de l'électrode trop important dans le soudage à l'arc électrique.

4.3. Méthodes de détection :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure Si la soudure peut être contrôlée à revers: examen visuel, magnétique ou par ressuage.

4.4. Méthodes de réparation :

- Si la reprise à revers est possible: éliminer le défaut par meulage et reprendre à revers
- Si la reprise à revers est impossible: éliminer toute la soudure et ressouder.

4.5. Mesures préventives :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure et surtout spécialement soigner préparation (écartement, méplat,...).

III. Manque de pénétration :

1. Localisations possibles des manques de pénétration :

Le manque de pénétration peut être localisé (Fig.31 ab.):

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

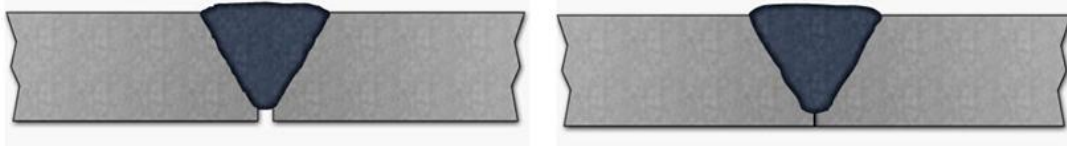


Figure 31a : Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure.

1.2. A l'intérieur de la soudure (soudure avec reprise à revers « X ») (Fig.31b.) :

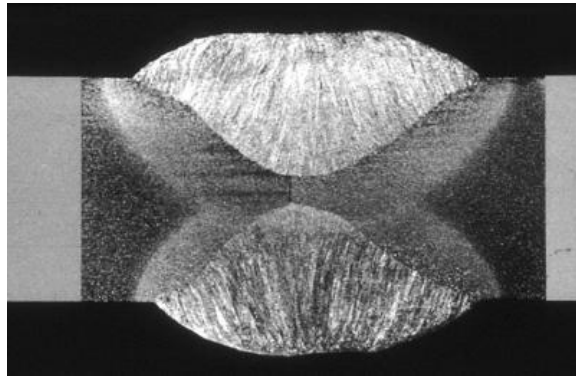


Figure 31b : Localisations possibles des manques de pénétration à l'intérieur de la soudure.

2. Manque de pénétration à la racine :

2.1. Définition :

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

2.2. Causes possibles :

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

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

2.3. Méthodes de détection :

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

2.4. Méthodes de réparation :

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

2.5. Mesures préventives :

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

3. Manque de pénétration dans la soudure :

3.1. Définition :

Le métal d'apport n'atteint pas le milieu du chanfrein en X (Fig.32abc&d.).



a). Talon trop grand



b). Ecartement trop faible



c). Soudage désaxé



d). Courant trop faible

Figure 32 abc & d : Manque de pénétration dans la soudure.

3.2. Causes possibles :

- Idem Manque de pénétration à la racine.

3.3. Méthodes de détection :

- Examen par ultrasons ou radiographie.

3.4. Méthodes de réparation :

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

3.5. Mesures préventives :

- Idem Manque de pénétration à la racine.
- Une mesure spécifique est de faire un examen magnétique ou un ressuage après gougeage afin de contrôler la qualité du gougeage (Fig.33ab.).

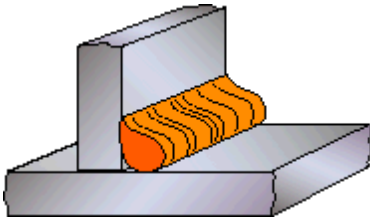


Figure33a : Apport (chaleur) arc trop faible.

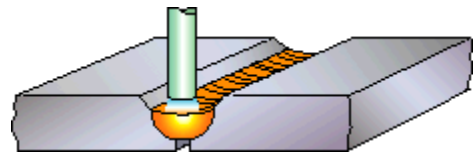


Figure33b : Diamètre électrode trop grand.

IV. Inclusion gazeuses :

1. Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités :

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes (Fig.34.ab&c.) :

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

2. Porosités vermiculaires :

2.1. Définition :

Cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon. Elles peuvent se présenter isolées ou groupées (elles ont souvent une forme caractéristique d'arête de poisson suivant les séquences de solidification des dendrites) (Fig.34a.).

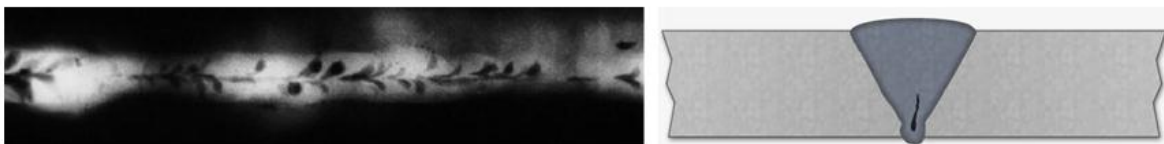


Figure 34a : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.

2.2. Causes possibles :

- Contamination de la surface à souder.

- Ouvertures, telles que l'ouverture entre une tôle verticale et horizontale qui sont assemblées par une double soudure d'angle.
- Doublures dans les tôles, si elles débouchent en surface.

2.3. Méthodes de détection :

- A la surface : examen visuel
- A l'intérieur : radiographie et ultrasons

2.4. Méthodes de réparation :

-Eliminer la zone défectueuse et ressouder (éventuellement éliminer la doublure par meulage).

2.5. Mesures préventives :

- Nettoyage des bords à souder avant soudage
- Recherche de doublures dans les bords à souder (examen magnétique ou ressuage) et les éliminer ou boucher par soudage
- Eviter des préparations de soudage qui causent des cavités.

3. Porosités de reprise :

3.1. Définition :

Porosités limitées à une petite partie du cordon et qui apparaissent lors d'un soudage électrique manuel ou automatique lors de l'amorce d'une passe (Fig.34b.)⁽¹⁴⁾.

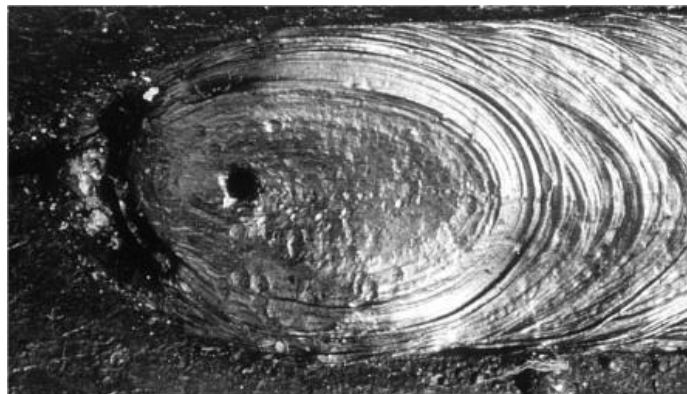


Figure 34b : Inclusions gazeuses porosités de reprise.

3.2. Causes possibles :

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

3.3. Méthodes de détection :

- A la surface: examen visuel
- A l'intérieur: radiographie ou ultrasons.

3.4. Méthodes de réparation :

-Eliminer le défaut et réparer avec attention spéciale pour les manipulations lors de la reprise.

3.5. Mesures préventives :

- Formation spécifique du soudeur en ce qui concerne la reprise dans le soudage manuel.
- Eventuellement élimination par meulage de chaque début de passe, avant de mettre les passes suivantes.

4. Porosités uniformes :**4.1. Définition :**

Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon (Fig.34c.).



Figure 34c : Inclusions gazeuses porosités uniformes.

4.2. Causes possibles :

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

4.3. Méthodes de détection :

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

4.4. Méthodes de réparation :

- Réparation de toute la soudure.

4.5. Mesures préventives :

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

V. Inclusion solides :

1. Différents types d'inclusions solides :

Des inclusions solides peuvent être de trois types différents (Fig.35.ab&c.):

- Laitier.
- Tungstène.
- Cuivre.

2. Inclusions de laitier :

2.1. Définition :

Du laitier qui a été enfermé dans le cordon de soudure (Fig.35a.). Ces inclusions peuvent avoir deux aspects:

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

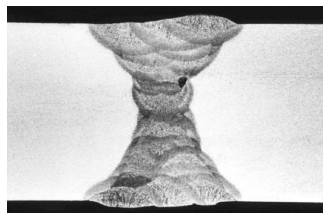


Figure 35a : Inclusions de laitier.

2.2. Causes possibles :

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

2.3. Méthodes de détection :

- Ultrasons et radiographie.

2.4. Méthodes de réparation :

- Éliminer la zone défectueuse par meulage et réparer.

2.5. Mesures préventives :

- Eventuellement adapter la position de soudage pour mieux contrôler le bain de fusion.
- Éliminer suffisamment le laitier entre passes.

3. Inclusions de tungstène :**3.1. Définition :**

Parties fusionnées de l'électrode en tungstène qui est utilisée dans le procédé TIG (US= GTAW) (Fig.35b.).

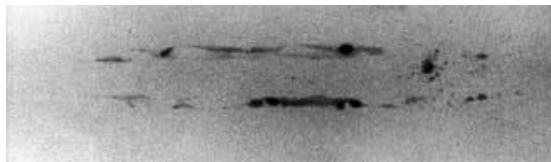


Figure 35b : Inclusions de tungstène.

3.2. Causes possibles :

- Electrode trop pointue.
- Intensité de courant trop élevée.
- Débit de gaz de protection trop faible.
- Coupure trop rapide du gaz de protection à la fin du soudage.

3.3. Méthodes de détection :

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

3.4. Méthodes de réparation :

- Éliminer le défaut par meulage et ressouder.

3.5. Mesures préventives :

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

- Ne pas couper trop vite l'alimentation en gaz de protection.

4. Inclusions de cuivre :

4.1. Définition :

Une inclusion accidentelle de cuivre dans le bain de fusion qui peut provoquer des fissures dans la zone de soudage (Fig.35c.).



Figure 35c : Inclusions de cuivre.

4.2. Causes possibles :

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

4.3. Méthodes de détection :

- Contamination : Non décelable par des moyens CND.
- Inclusion importante: Radiographie.
- Dans le cas où ces inclusions provoqueraient des fissures se référer au chapitre fissures.

4.4. Méthodes de réparation :

- Eliminer la zone complète par meulage et même un peu au-delà, car l'étendue de la contamination est très difficile à évaluer.

4.5. Mesures préventives :

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

VI. Excès de matière :

1. Généralité :

Un excès de matière peut se présenter la racine du cordon (excès de pénétration) ou à la surface (surépaisseur) éventuellement accompagné de recouvrements du métal de base non fusionnés (Fig.36.).

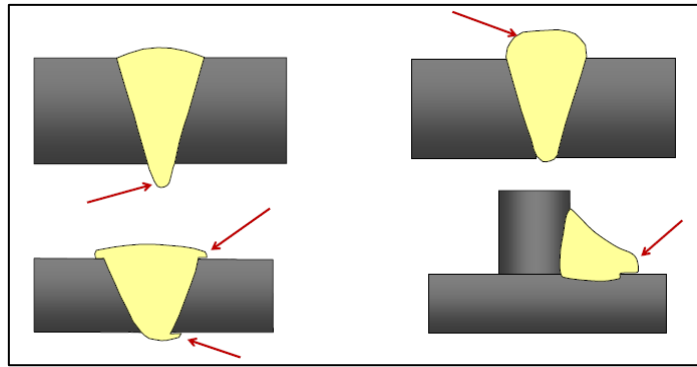


Figure36 : Excès de matière.

2. Excès de pénétration :

2.1. Définition :

Pénétration excessive du métal d'apport à la racine du cordon (Fig.37.).

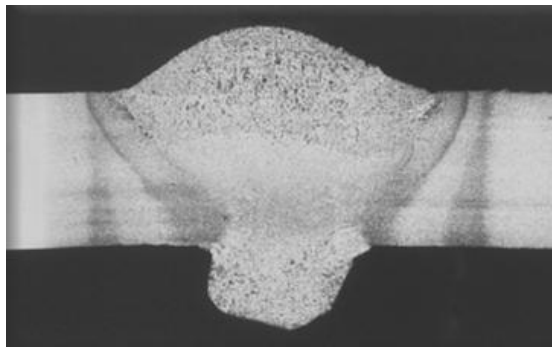


Figure37 : Excès de pénétration.

2.2. Causes possibles :

- Ecartement trop important.
- Jeu entre l'anneau-support et le métal de base lors du soudage sur anneau-support.
- Apport énergétique trop important.
- Vitesse de soudage trop faible.
- Manque d'expérience du soudeur⁽¹⁴⁾.

2.3. Méthodes de détection :

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

2.4. Méthodes de réparation :

- Éliminer l'excès par voie mécanique.

2.5. Mesures préventives :

- Diminuer l'écartement.
- Lors d'utilisation d'anneau supports, limiter le jeu.
- Adapter la vitesse de soudage et l'apport énergétique.

3. Surépaisseur :

3.1. Définition :

Un apport excessif de métal qui cause, de la convexité dans les soudures d'angle, et des épaisseurs supérieures à celles du métal de base pour les soudures bout à bout (Fig.38.).

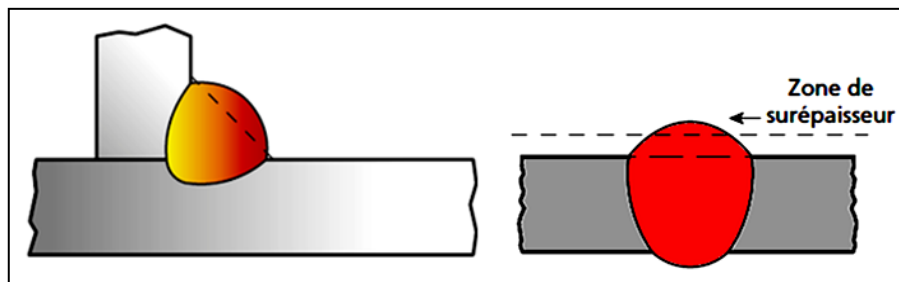


Figure38 : Convexité excessive & Surépaisseur excessive.

3.2. Causes possibles :

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

3.3. Méthodes de détection :

- Examen visuel avec un calibre de soudage.

3.4. Méthodes de réparation :

- Elimination mécanique (seulement si la surépaisseur dépasse une certaine limite).

3.5. Mesures préventives :

- Diminuer l'énergie de l'arc.
- Contrôler le choix des diamètres des électrodes à l'aide d'un coupon soudé.
- Améliorer l'expérience du soudeur.

4. Recouvrements non fusionnés (Débordements) :

4.1. Définition :

L'écoulement d'un excès de métal d'apport sur la surface du métal de base, soit à la racine de la soudure, soit à la surface supérieure sans fusion avec ce métal de base (Fig.39.).

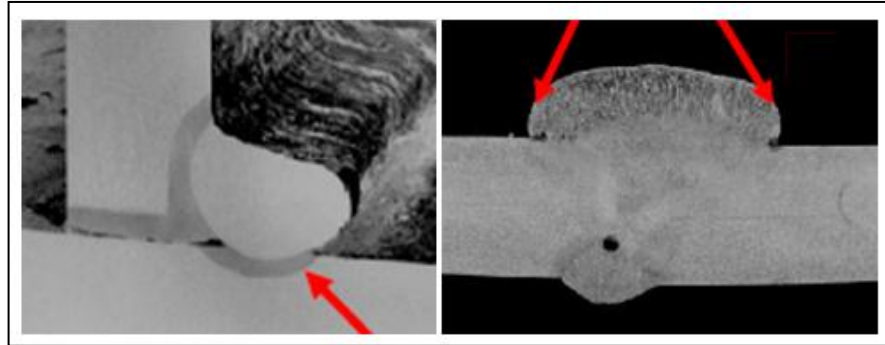


Figure39 : Recouvrements non fusionnés (Débordements).

4.2. Causes possibles :

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

4.3. Méthodes de détection :

- Examen visuel complété d'un examen par ressuage,

4.4. Méthodes de réparation :

- Couper jusqu'au métal sain et éventuellement ressouder.

4.5. Mesures préventives :

- Modifier la position de soudage.
- Modifier les paramètres énergétiques.
- Modifier la vitesse de soudage.

VII. Dénivellement :

1. Dénivellement :

1.1. Définition :

Un alignement incorrect des bords à souder dans une soudure bout à bout. Ceci mène à des contraintes locales qui peuvent surtout être nocives en sollicitations cycliques (fatigue) (Fig.40.).

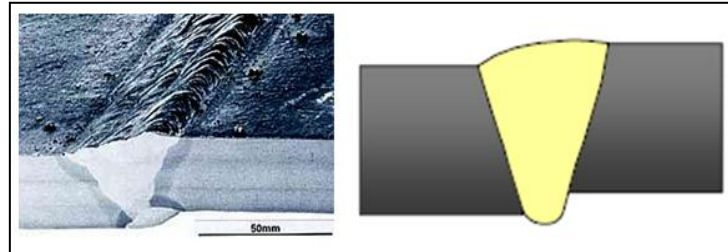


Figure 40 : Dénivellement.

1.2. Causes possibles :

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

1.3. Méthodes de détection :

Inspection visuelle avec calibre de soudage avant soudage.

1.4. Méthodes de réparation :

-Seulement réparer si le défaut constaté dépasse les limites indiquées dans le code de construction.

1.5. Mesures préventives :

-Contrôle approfondi de l'alignement avant soudage et maintien de cet alignement pendant le soudage.

VIII. Cratère :

1. Cratère :

1.1. Définition :

Une dépression de retrait a la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée (Fig.41.).

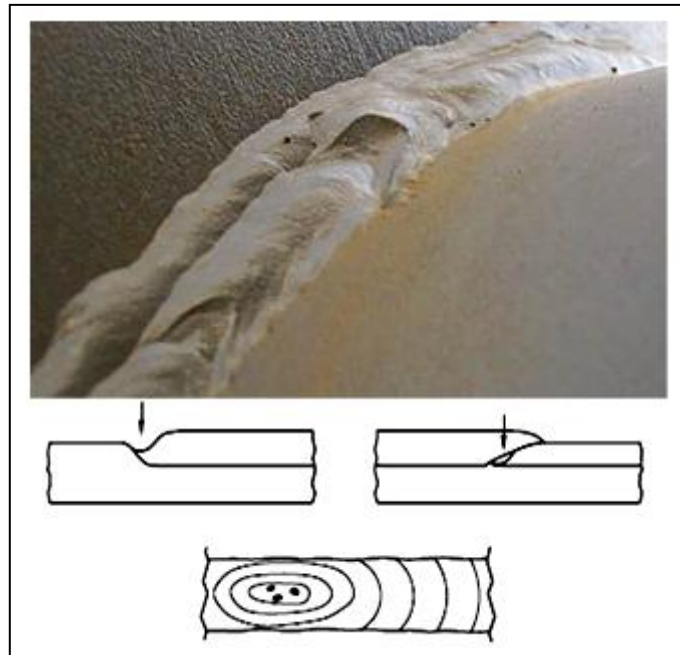


Figure 41 : Cratère.

1.2. Causes possibles :

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

1.3. Méthodes de détection :

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

1.4. Méthodes de réparation :

-Meuler et ressouder.

1.5. Mesures préventives :

-Diminution progressive de l'apport de chaleur peut éviter les défauts.

-Prévoir un prolongement au cordon dans lequel la soudure se termine et que l'on élimine par après.

IX. Défauts de surface :

1. Morsures/Caniveaux :

1.1. Définition :

Un creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base (Fig.42.).

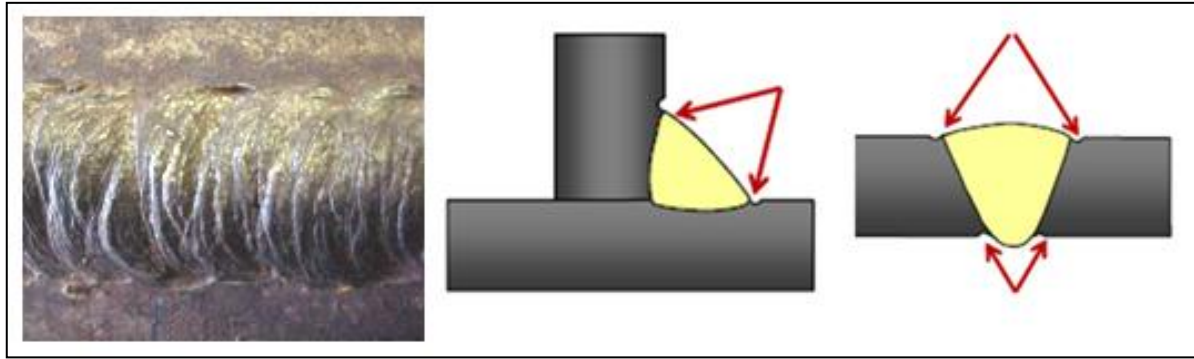


Figure 42 : Défauts de surface (Morsures/Caniveaux).

1.2. Causes possibles :

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

1.3. Méthodes de détection :

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

1.4. Méthodes de réparation :

- Réparation par soudage éventuellement après meulage.

1.5. Mesures préventives :

- Souder avec la pièce en position plane (sous la main).
- Limiter le balancement en passant à un cordon multi-passes.
- Ne pas terminer le cordon sur un bord libre.
- Remplacer le laitier de protection par un laitier qui mouille plus le métal de base.

2. Effondrement à la racine :

2.1. Définition :

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (Fig.43a.).

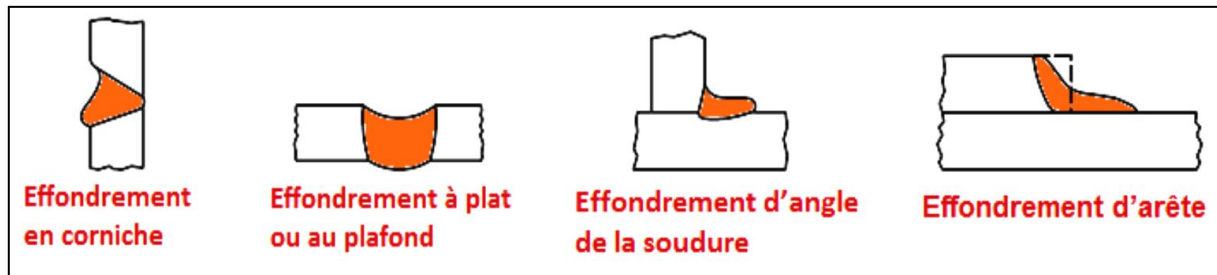


Figure 43a : Effondrement à la racine.

2.2. Causes possibles :

- Vitesse de soudage trop lente
- Chaleur trop élevée.

2.3. Méthodes de détection :

- Inspection visuelle.

2.4. Méthodes de réparation :

- Eliminer les parties en excès et remplir celles de manque par soudage

2.5. Mesures préventives :

- Augmenter la vitesse.
- Réduire l'intensité du courant.
- Effectuer un bon mouvement oscillatoire.

➤ Effondrement (suite) :

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

Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort (Fig.43b.).

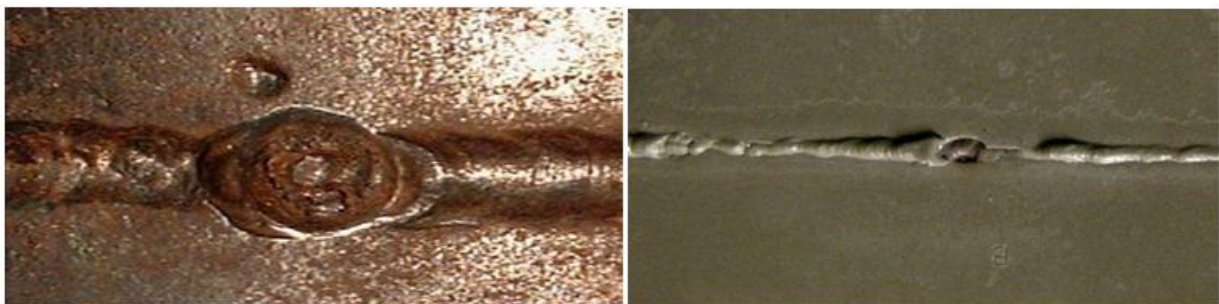


Figure 43b : Effondrement.

3. Amorces d'arc :

3.1. Définition :

Des points de métal fondu où l'électrode, la pince d'électrode ou la masse ont touché par hasard le métal de base et ont provoqué un arc de courte durée (Fig.44.).

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



Figure 44 : Amorces d'arc.

3.2. Causes possibles :

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

3.3. Méthodes de détection :

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

3.4. Méthodes de réparation :

- Léger meulage afin d'éliminer toute amorce à la fissuration.

3.5. Mesures préventives :

- Améliorer l'accessibilité.
- Inspecter régulièrement l'isolation des torches et pinces d'électrodes.

4. Projections sur le métal de base :

4.1. Définition :

De petites gouttes du matériau d'électrode qui ont été projetées sur le métal de base et qui sont fusionnées avec ce métal (Fig.45.).



Figure 45 : Projections sur le métal de base.

4.2. Causes possibles :

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

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

4.3. Méthodes de détection :

- Examen visuel.

4.4. Méthodes de réparation :

- Léger meulage.

4.5. Mesures préventives :

- Diminuer l'apport d'énergie.
- Utiliser une longueur d'arc plus faible.
- Utiliser du courant alternatif afin d'éviter le soufflage magnétique de l'arc.

5. Défaut d'aspect :

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

- Dimension de l'électrode pour la passe de finition trop grande.

- Vitesse de soudage trop lente.
- Courant de soudage trop faible.
- Tension d'arc trop basse (SAW et GMAW).
- Une mauvaise manipulation de l'électrode.
- Un positionnement/placement incorrect du cordon de soudure.



Figure 46 : Défaut d'aspect.

X. Métal de base :(Inspection a défauts) :

1. Inspection des matériaux :

Tous les matériaux arrivant sur site devraient être inspectés pour:

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

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

2. Inspection de tubes :

Condition :

(Corrosion, Dommages mécaniques, Epaisseur, Ovalisation, Doublures & Soudure) (Fig.47.).

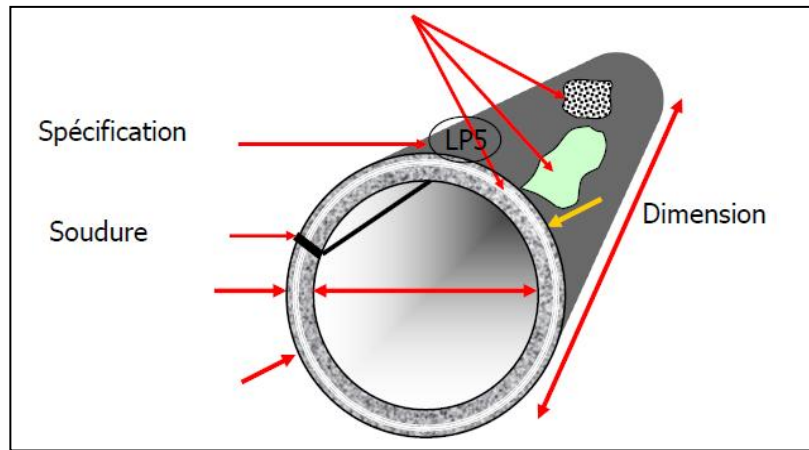


Figure 47 : Métal de base (Inspection a défauts).

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

3. Inspection de tôles :

Condition :

(Corrosion, Dommage mécanique, Pliure, Bourrelets& Délaminage) (Fig.48.).

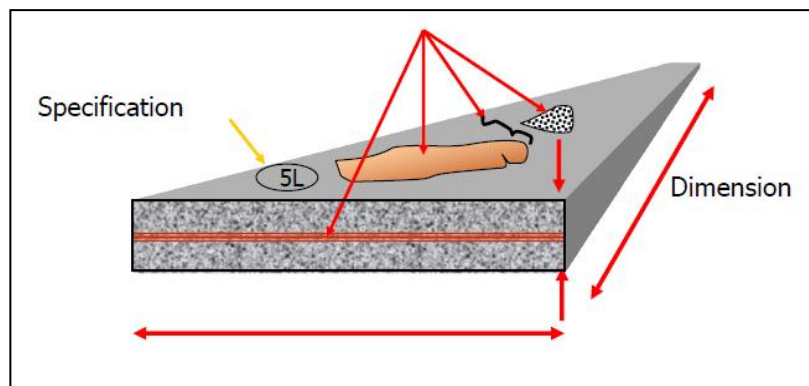


Figure 48 : Inspection de tôles.

4. Défauts de laminage :

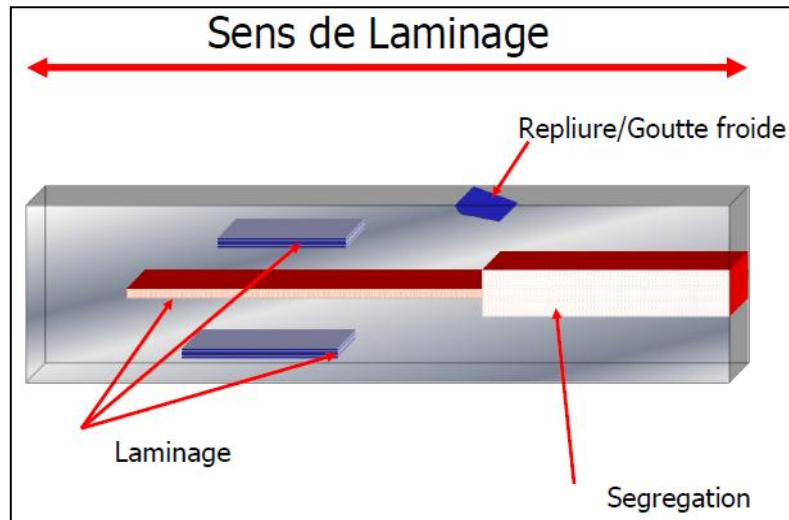


Figure 49 : Défauts de laminage.

5. Imperfections du métal de base :

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

5.2. Bandes de Ségrégation : se produisent dans le centre de la tôle et sont constitués d'impuretés à point de fusion bas tels que le soufre et le phosphore.

5.3. Pliure: sont causées durant le laminage lorsque le métal de chevauchement ne fusionne pas avec le matériau de base (Fig.50.).

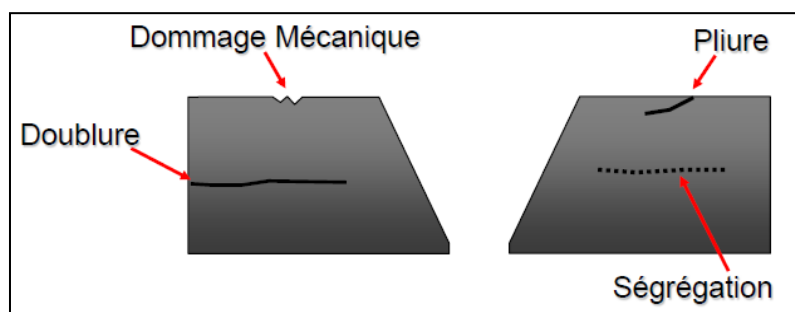


Figure 50 : Imperfections du métal de base.

6. Repliure :

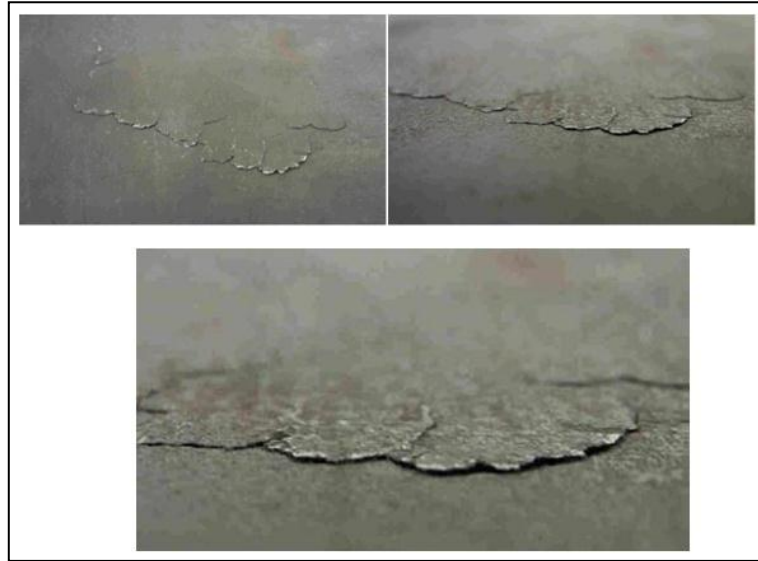


Figure 51 : Repliure.

➤ Doublure de laminage :

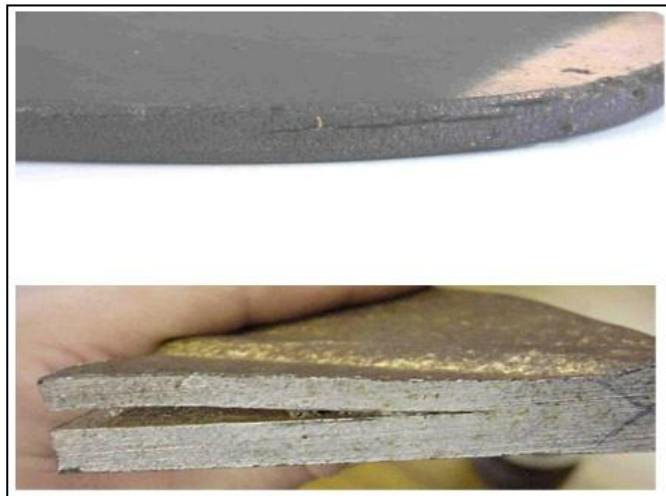


Figure 52 : Doublure de laminage.

➤ Dommages Mécaniques :

Les dommages mécaniques peuvent être définis comme tout dommage de la surface du matériau durant le processus de fabrication/construction (Fig.53.).

- ✓ Meulage.
- ✓ Martelage.
- ✓ Cisailage.
- ✓ Burinage.
- ✓ Enlèvement des attaches temporaires (zones d'arrachements).

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

➤ **Dommages Mécaniques :**

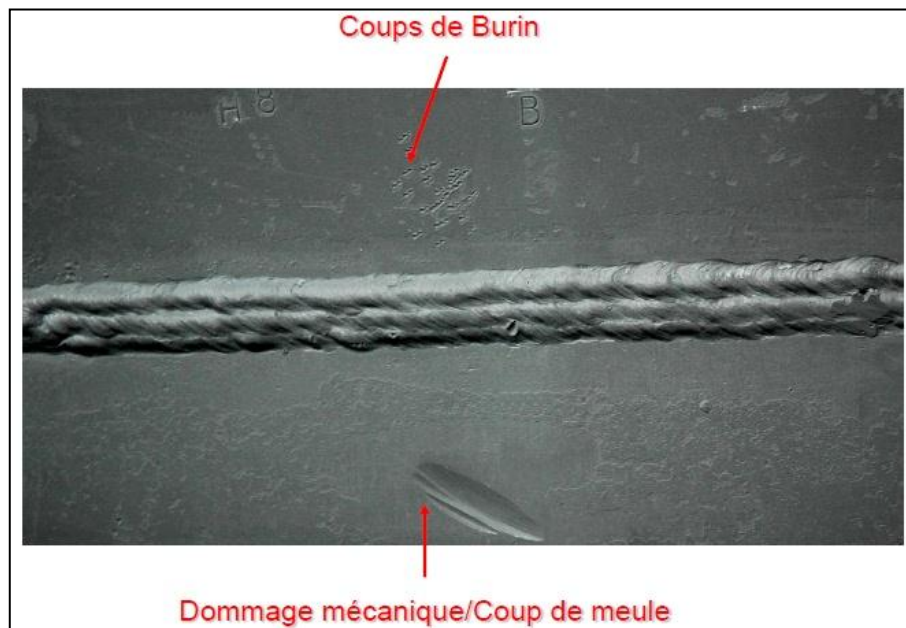


Figure 53 : Dommages Mécaniques.

Conclusion partielle

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

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

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

I. Méthodes Expérimentales :

I.1. Introduction :

Le transport par pipelines s'impose depuis le début du siècle dernier, reconnu comme le moyen le plus sûr et économique, il se développe d'avantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie et l'apparition de nouveaux consommateurs d'hydrocarbures sur le marché⁽¹⁶⁾.

La partie conduite d'un pipeline est une construction mécano- soudée, ainsi la soudabilité des aciers des tubes a des répercutions sur le coût de réalisation et sur la fiabilité de la conduite⁽¹⁷⁾.

Il faut noter qu'il s'agit de centaines de kilomètres de soudures réalisées sur les chantiers de construction de conduites. Ainsi, toute modification importante au niveau de la composition de l'acier ou des dimensions des tubes nécessite de nouvelles mesures technique, technologique et beaucoup de précaution afin d'obtenir des joints de soudure fiables. Au delà de la soudabilité locale ou métallurgique, la recherche de nouveaux aciers pour les conduites doit être entreprise par d'autres aspects qui intègrent le procédé de soudage et son environnement opératoire. Les défauts des joints de soudure constituent la deuxième cause de défaillances des conduites, après la corrosion. C'est ainsi que durant la fabrication des tubes en usine et la construction des conduites, le soudage est une étape très importante et décisive. Le développement du réseau mondial des canalisations de transports des hydrocarbures doit suivre l'accroissement des besoins énergétiques mondiaux. La préoccupation primordiale du constructeur doit être la définition des assemblages soudés qui permettent de faire passer les efforts avec un maximum de sécurité et réaliser la soudure au moindre coût, tout en prenant en considération l'accroissement de la quantité du métal à déposer en fonction de l'augmentation des dimensions des conduites, l'emploi de nouveaux aciers à composition chimique de plus en plus complexe et les conditions difficiles d'exécution des soudures d'assemblage des tubes sur chantier. Ainsi l'évolution de la technologie et des techniques de soudage doit suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques des aciers des tubes et des dimensions des conduites afin de répondre aux besoins des constructeurs et aux exigences des utilisateurs⁽¹⁸⁾.

Le travail de construction des pipelines est réalisé par le **groupe Cosider**.

I.2. Présentation de l'entreprise COSIDER Biskra :

Cosider a été créé le 1^{er} janvier 1979 sous forme de société d'économie mixte par la Société nationale sidérurgique (SNS) et le groupe danois Christiani et Nielsen. En 1982, elle devient

filiale à 100% de la SNS suite au rachat par cette dernière des actions du partenaire danois. Une fois transformée en société par actions, suite à l'application de la loi portant autonomie financière des entreprises publiques en 1989, elle a su exploiter diverses opportunités lui permettant, contrairement à ses concurrents, d'intervenir dans des activités autres que le bâtiment et les travaux publics. Ce qui fait, aujourd'hui, de Cosider le plus grand groupe algérien du BTPH avec un capital social de 4,335,000,000 de dinars, un chiffre d'affaires (2004) de 22,550 millions de dinars et un effectif total, toutes catégories confondues, de 14,228 agents. Ses réalisations mettent à son actif le plus grand nombre de barrages, hydrauliques construits ainsi que le plus grand palmarès dans la pose de pipelines⁽¹⁹⁾.

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

Détenteur à 100% du capital de ses neuf filiales, le groupe COSIDER a la particularité d'intervenir dans des domaines aussi nombreux que divers. A travers sa filiale COSIDER Travaux publics, il lui est permis d'intervenir dans les travaux d'ouvrages souterrains et maritimes, routes et autoroutes, aérodromes et ouvrages d'art. Sa deuxième filiale, COSIDER Construction, intervient, elle, sans le bâtiment, le génie civil industriel et les ouvrages d'art dans les stations d'épuration et de traitement des eaux. La filiale Canalisations assure la construction de pipelines (Fig.54.), des canalisations hydrauliques et diverses installations hydrauliques. La quatrième filiale active pour la production, la transformation et la commercialisation des matériaux de carrières dont les agrégats pour le béton. La cinquième est la filiale Alrem spécialisée dans la maintenance et la rénovation des matériels de travaux publics et la commercialisation de pièces de rechange. Alsim, elle, intervient dans la réhabilitation des équipements, notamment la chaudronnerie, la réalisation de charpentes métalliques et de coffrage pour le bâtiment. Cometal agit dans le négoce de produits sidérurgiques, COSIDER Promotion dans la conception, la réalisation et la vente de logements, et enfin Agral qui intervient dans la mise en valeur des terres et l'industrie agroalimentaire⁽¹⁹⁾.



Figure 54 : Pipelines au niveau de Cosider.

I.4. Procédé de soudage à COSIDER :

On note qu'au niveau de l'entreprise COSIDER, il utilise généralement le soudage à l'arc électrique. Le soudage a pour but de tester les vannes et aussi de souder plusieurs tubes en acier.

La figure 55 présente un poste de soudure utilisé au niveau des ateliers de COSIDER.

Les caractéristiques de ce poste de soudure sont indiquées dans le tableau 1 :

Tableau 1 Caractéristiques de poste de soudage⁽²⁰⁾ :

Mode de soudage	Plage de courant de soudage	Puissance nominale	Tension à vide max.	Courant génératrice nominal	Moteur	Contenance en carburant
CC/DC	55 – 500 A (Modèles CC) 15 – 500 A (Modèles CC/CV)	Modèles export: 300 A, 32 Volts DC facteur de marche 100% 430 A, 37 Volts DC facteur de marche 60%	95 v	Standard Monophasé, 4 kVA/kW, 34/17 A, 120/240 V AC, 50/60 Hz Option puissance génératrice triphasée*	Perkins 404D-22 refroidissement aire, à quatre cylindres, Moteur Diesel 32,6 HP	95 L

CV/DC (Modèles CC/CV uniquement)	14 – 40 V	300 A,29Volts DC (CV) facteur de marche 100% 430 A,36Volts DC (CV) facteur de marche 60% Autres modèles : 400 A, 36 Volts DC facteur de marche 100% 450 A, 38 Volts DC facteur de marche 60% 500 A, 30 Volts DC (CC),34 Volts DC (CV)	56 v	Monophasé/Triphasé, 12/15 kVA/kW, 50/36 A,120/240 V AC,60 Hz En plus de la puissance génératrice 4 kVA/kW standard		
---	-----------	--	------	--	--	--



Figure 55 : Poste de soudure à l'arc électrique.

La figure 56 montre les baguettes de soudage à l'arc électrique.



Figure 56 : Les baguettes de soudage.

La composition chimique de ces baguettes est indiquée dans le tableau 2 :

Tableau 2 de caractéristiques fonctions mécaniques et chimiques des baguettes de soudage⁽²¹⁾:

Types	SOR 200	SOB 330	SOB 340
Propriétés			
Type de recouvrement	Oxyde de Titane	De base	De base
Classement			
AFNOR A81309	E 1024	E 51 4/3 B160	E 51 4/3 B170 36H
AWS 5.1.78	E 513 RR 17032	26H	E 7028
DIN 1913		E 7028	E Fe Kbix
		E Fe Kbix	
Fonction mécanique			
R (N/mm²)	520 – 570	570 – 620	520 – 560
E (N/mm²)	460 – 500	500 – 560	420 – 460
A (%)	25	25 – 30	28
KV j	50j à –0°C	137j à +20°C, 88j à –20°C	70j à –20°C
Analyse chimique			
(%) C	0.08	0.08	0.10
(%) Mn	0.80	1.00	1.00
(%) Si	0.40	0.40	0.40

Type de courant	Rendement: 170 CA ($U_0 \geq 50$ V) ou CC (+)	Rendement: 170 Toutes les positions de soudage CA ($U_0 \geq 70$ V) ou CC (+)	Rendement: 165 CA ($U_0 \geq 60$ V) ou CC (+)
------------------------	---	---	---

Utilise :

Pour l'angle de soudure est concentrée tôles moyennes et épaisses, et les structures en acier de type Almtaml des SOR - utilisé 200, R 410-500 N / mm "A" et "d" 2.

Soudage de réservoirs sous pression, les structures et le soudage de l'acier et de certains types d'acier moulé de coulée avec de la lumière. SOR - et d'utiliser 330.

Les joints de soudure à haute résistance à la pression de craquage et de réservoirs et de navires, etc 340SOR feuilles - sont également utilisés⁽²¹⁾.

I.5. Les étapes de soudage au niveau de COSIDER de Biskra :

Les étapes de soudage au niveau de COSIDER de Biskra sont :

5.1. Préparation d'un morceau de tube à souder : (Voir la figure 57).

Figure 57 : Préparation d'un morceau de tube.

5.2. Fixation du morceau :

Ensuite ce morceau est fixé comme le montre la figure 58.



Figure 58 : Fixation du morceau de tube.

La figure 59 montre bien que la surface transversale n'est pas homogène car il y'a une irrégularité.



Figure 59 : Etat irrégulier de la surface transversale.

5.3. Limage du contour du tube :

Ensuite le limage de la surface irrégulière (Fig.60.).



Figure 60 : Polissage du contour du tube.

De même, cette opération est effectuée sur le deuxième tube à assembler (Fig.61.).



Figure 61 : Limage deuxième tube.

5.4. Préparation du chanfrain :

Cette étape vient juste avant le soudage et qui est très nécessaire pour le dépôt du métal d'apport (Fig.62.).



Figure 62: Préparation du chanfrain.

La figure 63 montre les types des chanfreins.

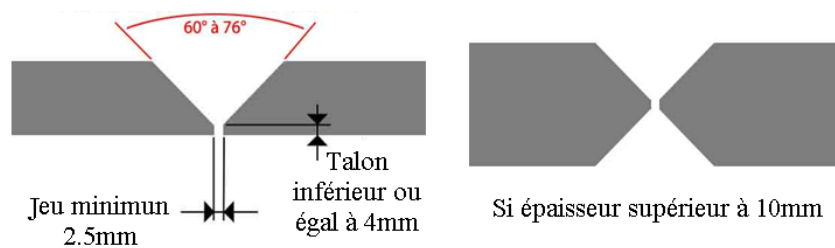


Figure 63 : Types des chanfreins (chanfrein v, chanfrein x).

5.5. Positionnement des deux tubes à assembler :



Figure 64 : Positionnement des deux tubes à assembler.

5.6. Fixation des deux tubes par deux points de soudure :

La figure 65 montre la préfixation des deux tubes par deux points de soudure.



Figure 65 : La préfixation des deux tubes par deux points de soudure.

5.7. Opération de soudage :

La figure 66 montre une partie soudée des deux tubes.



Figure 66 : Début de soudage.

5.8. Fin du procédé de soudage :



Figure 67: Cordon de soudure.

5.9. Netoyage du cordon de soudure par brossage :

Enfin après soudage le cordon de soudure est nettoyé par brossage comme le montre la figure 68.



Figure 68 : Etat du cordon de soudure après brossage.

I.6. Prélèvement des échantillons :

Afin d'étudier les défauts de soudure des cordons de soudage, nous avons prélevé quelques échantillons. Le prélèvement est effectué par tronçonnage en utilisant une meule comme le montre la Figure 69.



Figure 69 : Prélèvement des échantillons.

II. Contrôle des cordons :

II.1. Contrôle visuel et dimensionnel :

1.1. Principe du contrôle :

Le contrôle visuel et dimensionnel consiste à soumettre une surface, une préparation de chanfrein ou une soudure à une vérification visuelle de son aspect physique et de ses dimensions géométriques⁽²²⁾.

1.2. Condition du contrôle visuel et dimensionnel :

Le contrôle visuel et dimensionnel doit être réalisé sous une luminosité de 350 lux minimum (recommandé : 500 lux). L'œil de l'observateur doit être placé à une distance inférieure à 500 mm de la surface à examiner sous un angle supérieur à 30°.

1.3. Matériels de contrôle :

- Règle droite ou ruban de mesure avec graduations de 1 mm ;
- Loupe grossissante de 2 à 5 fois ;
- Jeu de jauges ou cales de 0,1 à 3 mm ;
- Jauge à vernier ou calibre de soudure ;
- Miroir ou endoscope⁽²²⁾.

1.4. Forme et dimensions :

La préparation du chanfrein est contrôlée pour vérifier que :

- la forme et les dimensions du joint sont conformes à la fiche de soudage ;
- les bords et la surface adjacente sont nettoyés.

La soudure est contrôlée pour vérifier que :

- la hauteur de la surépaisseur du cordon externe et de la pénétration est conforme ;
- la surface de la soudure est saine et régulière ;
- la largeur de la soudure est constante ;
- la dénivellation ou le désalignement est dans les tolérances de la norme⁽²²⁾.

II.2. Contrôle magnétoscopique :

2.1. Principe du contrôle magnétoscopique :

Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchant (obstrués ou non) et sous-jacents (de 1 à 2 mm) sous la surface des matériaux métalliques ferromagnétiques (les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium sont exclus de cette application). Un champ magnétique important ($> 2400 \text{ A / m}$) traverse la pièce à contrôler jusqu'à saturation magnétique avec l'application simultanée en surface d'une liqueur magnétique colorée ou fluorescente constituée de traceurs comme produit indicateur. En présence d'un défaut plan ou volumique, les lignes de force du champ sont déviées et accumulent la poudre magnétique au droit du défaut pour le rendre visible à l'œil nu. La perpendicularité du défaut par rapport aux lignes du champ magnétique accentue la sensibilité de détection du contrôle (Fig.70.).

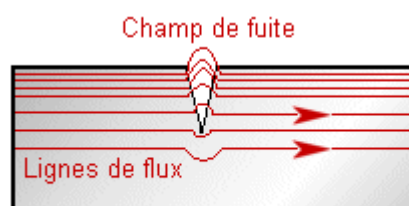


Figure 70 : Principe du contrôle magnétoscopique.

2.2. Rappel de quelques notions de magnétisme

Le champ magnétique (H) est exprimé en Ampère par mètre (A / m) ou en Oersted (1 OEM = 80 A / m).

L'induction magnétique (B) est exprimée en Tesla (T) ou en Gauss (1 Gauss = 10^{-4} Tesla).

$$B \text{ (Tesla)} = \mu_0 \times \mu_r \times H \text{ (A / m)} \quad \text{ou} \quad B = \mu \times H \quad \text{avec} \quad \mu = \mu_0 \times \mu_r$$

- μ : perméabilité absolue du matériau (exprimée en Henry / mètre ou H / m)
- μ_0 : perméabilité du vide ($4 \times 3,1416 \times 10^{-7}$ H / m)
- μ_r : perméabilité relative du matériau.

Le flux magnétique (ϕ) est exprimé en Weber (Wb) ou en Maxwell (M) ($1 \text{ Wb} = 10^8$ Maxwell).

$$\phi = B \times S \times \cos \alpha$$

2.3. Méthodes d'aimantation

Deux méthodes de magnétisation sont possibles :

2.3.1. Aimantation par passage de champ magnétique

Deux méthodes de magnétisation par passage de champ magnétique sont réalisables :

2.3.1.1. Par circuit magnétique fermé

Un électro-aimant fixe ou portable à pièces polaires fixes ou articulées est utilisé au contact de la pièce à contrôler. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à l'axe Nord-sud et à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés (Fig.71.).

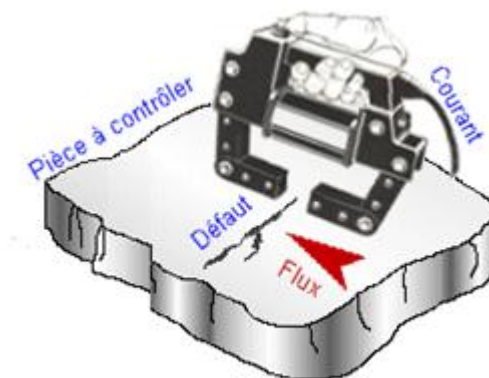


Figure71 : Contrôle par circuit magnétique fermé.

Des spires sont enroulées sur la paroi de la pièce annulaire à contrôler. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés (Fig.72.).

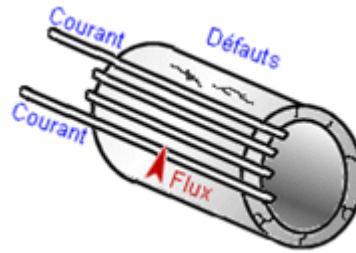


Figure 72 : Autre méthode de contrôle de par circuit magnétique fermé.

Un conducteur central traversé par un courant est placé au centre de la pièce annulaire à contrôler. L'aimantation est transversale et l'induction B est perpendiculaire à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés (Fig.73.).

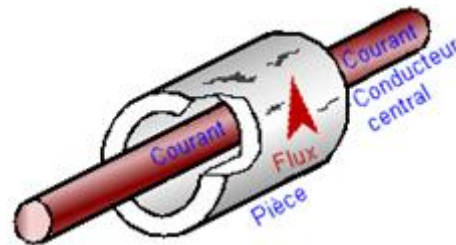


Figure 73 : Autre méthode de contrôle de par circuit magnétique fermé.

2.3.1.2. Par circuit magnétique ouvert

Un solénoïde ou des bobines fixes ou mobiles sont utilisés et traversés par un courant. La pièce à contrôler est placée à l'intérieur du solénoïde et elle constitue le noyau. L'aimantation est longitudinale et l'induction B est parallèle à la direction de l'examen (Fig.74.).

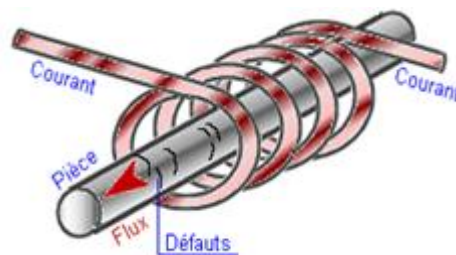


Figure 74 : Méthode de contrôle de par circuit magnétique ouvert.

2.3.2. Aimantation par passage direct de courant électrique

L'aimantation est réalisée par passage direct de courant dans la pièce à contrôler soit avec un appareil fixe ou banc d'aimantation, soit avec un système à deux électrodes (contrôle à la touche). L'aimantation est transversale et l'induction B est perpendiculaire à la direction de l'examen. Des défauts transversaux sont détectés (Fig.75.).

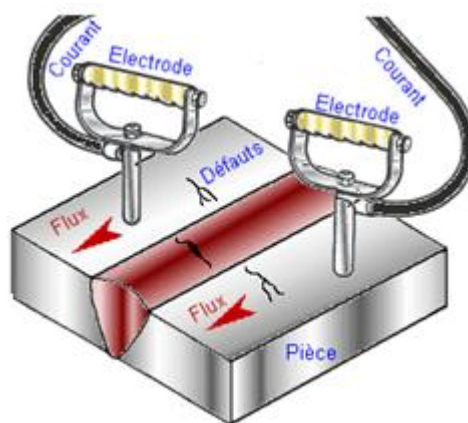


Figure 75 : Contrôle par passage direct de courant électrique.

Le courant électrique utilisé peut être :

- Courant alternatif (effet de self).
- Courant redressé monophasé une alternance.
- Courant redresser monophasé deux alternances.
- Courant continu (pas d'effet de self).
- Courant pulsé⁽²³⁾.

2.4. Produits détecteurs magnétiques :

2.4.1. Liqueur magnétique :

La détection des défauts fins est réalisée avec une liqueur magnétique constituée de poudres magnétiques très fines colorées ou fluorescentes (de 0,1 micron à 2 microns) en suspension dans de l'eau avec un agent mouillant, un anti moussant, un agent bactéricide et un inhibiteur de corrosion ou bien dans un produit pétrolier à base d'huile légère. Cette liqueur est régulièrement brassée par agitation pour conserver une concentration uniforme. La concentration est de l'ordre de 2 à 10 grammes de poudre colorée par litre et de 0,5 à 2 grammes de poudre fluorescente par litre⁽²³⁾.

2.4.2. Poudre sèche magnétique :

La détection des défauts plus grossiers est réalisée avec une poudre sèche constituée de grains de spinelle de fer $Fe_3 O_4$ - $Fe O$ et de fer oxydé finement divisés (de l'ordre de 10 à 30 microns).

2.5. Contrôle de la qualité de l'aimantation :

La vérification de l'intensité du champ magnétique qui doit être supérieure à 2 400 A / m est faite au moyen d'un mesureur de champ tangentiel.

L'opérateur contrôleur peut éventuellement utiliser un témoin d'aimantation pour vérifier la qualité de la détection magnétique.

- Témoin AFNOR.
- Croix de BERTHOLD.
- Témoin ASME.

2.6. Mode d'examen :

Le contrôle est réalisé

- Soit en lumière blanche (500 lux minimum à la surface de la pièce) en utilisant des traceurs colorés et des fonds blancs contrastants (en bombe aérosol).
- Soit en lumière ultraviolette avec lampe de Wood (100 à 150 Watts) en utilisant des traceurs fluorescents (l'intensité lumineuse U.V. doit être supérieure à 8 W/ m^2).

2.7. Avantages du contrôle par magnétoscopie :

- Facilité de détection des défauts débouchant et sous-jacents (à 2 mm maxi).
- Les défauts peuvent être matés ou obstrués.
- Rapidité relative d'obtention des résultats.
- Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

2.8. Inconvénients du contrôle par magnétoscopie :

- Contrôle exclusivement réservé aux matériaux ferromagnétiques.
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur ($> 2 \text{ mm}$ de profondeur).
- Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)
- Risque électrique par passage direct de courant.
- Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- Démagnétisation obligatoire après contrôle.
- Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

3.1. Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique :

Le contrôle radiographique par rayonnements ionisants (X ou γ) permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques. Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive γ qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement. Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en

traversant la paroi du matériau irradié. Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une variation de la densité optique du film au droit de l'image du défaut (Fig.76.)⁽²³⁾.

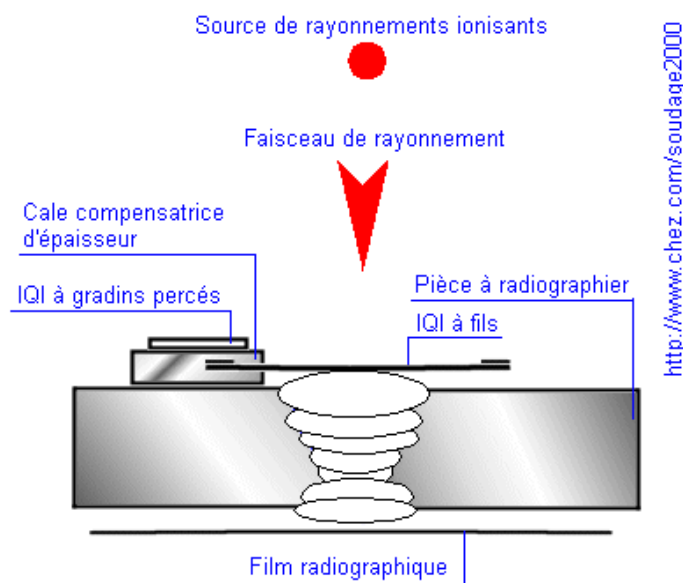


Figure 76 : Principe du contrôle radiographique ou gamma graphique

3.2. Les sources de rayonnements :

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

3.2.1. Le tube à rayons X :

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

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

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

Les alimentations électriques des générateurs à rayons X sont de plusieurs types :

- Auto-redressé sous tension alternative (la plus courante)
- Circuit VILLARD.
- Circuit GRAETZ.
- Circuit GREINACHER.
- Circuit à une diode.

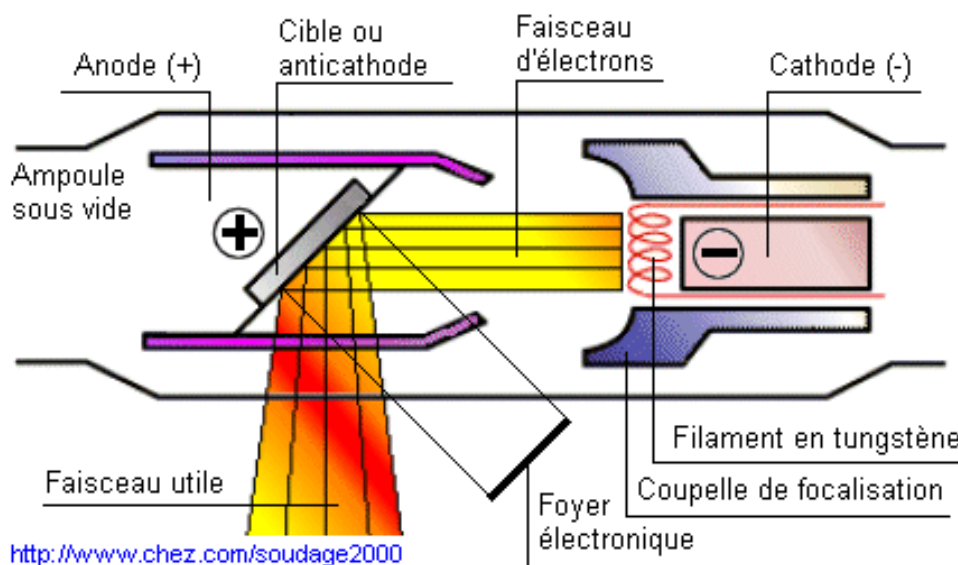


Figure 79 : Le tube à rayons X

Les différents types d'irradiation des tubes à rayons X :

- Irradiation directionnelle.
- Irradiation panoramique orthogonale.
- Irradiation panoramique non orthogonale.
- Irradiation panoramique à anode longue.

3.2.2. La source radioactive à rayonnement gamma δ :

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

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

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

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

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

Tableau 3 les différents types de radio-éléments δ :

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

Le radio élément est placé dans une capsule scellée placée sur une porte source et dans un conteneur appelé projecteur de gammagraphie ou gammagraphie. L'utilisation de ce type de matériel est très réglementé, exige des compétences en radioprotection et la détention de source radiographique est strictement surveillée par la CIREA (Fig.80.).



Figure 80 : Le radio-élément.

3.3. Les films radiographiques

3.3.1. Structure d'un film :

Le développement des films dans le révélateur transforme les ions d'argent Ag⁺ en argent

métallique noir. L'opération de fixage consiste à libérer tous les cristaux AgBr non ionisés (Fig.81.).

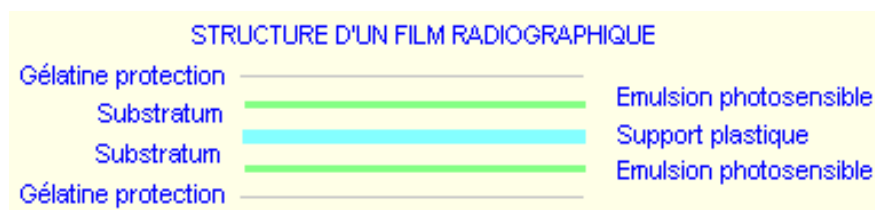


Figure 81 : Structure d'un film radiographique.

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

Tableau 4 classification des films et coefficient de sensibilité :

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

3.3.2. Développement manuel d'un film radiographique :

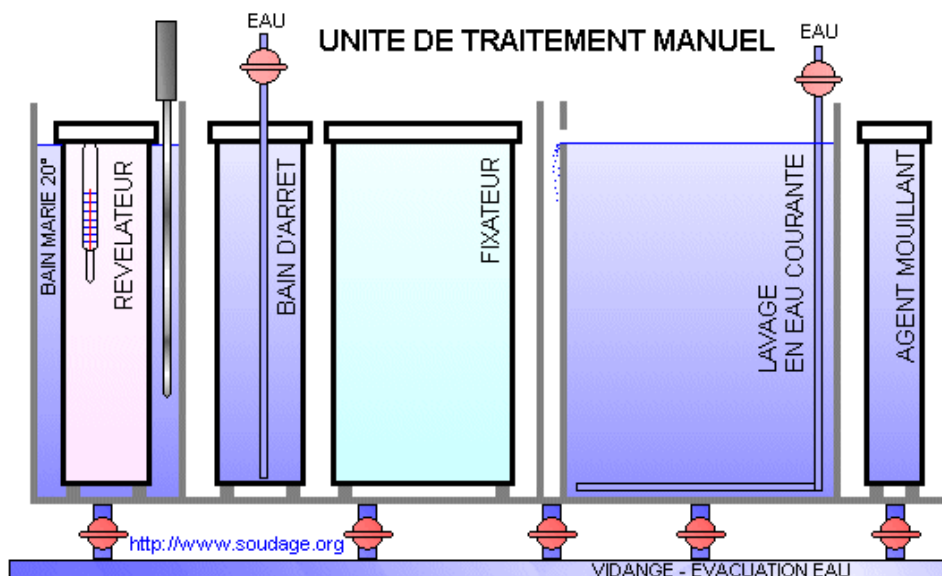


Figure 82 : Développement manuel d'un film radiographique.

Tableau 5 condition de traitement manuel d'un film :

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

- Révélateur : Agiter toutes les 30 secondes. La régénération des bains est faite à raison de 0,2 m² de film par 10 litres de produit.
- Bain d'arrêt : Agiter les cadres pour stopper la révélation.
- Fixateur : Agiter les cadres dans le fixateur. Égoutter les cadres à la sortie.
- Lavage : Eau courante filtrée à moins de 20° Celsius.
- Agent mouillant : Rinçage dans une solution aqueuse avec 10% d'agent mouillant.
- Séchage : A l'air libre ou dans une armoire séchant ou sècheuse à rouleaux.

3.3.3. La densité optique d'un film :

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

3.4. La constitution d'une cassette de film radiographique

3.4.1. La cassette simple film :

La cassette est constituée d'une feuille de papier renforcée ou de plastique opaque à la lumière blanche (Figs.83.). Dans cette cassette, il est placé un film radiographique et deux écrans renforçateurs métalliques (un antérieur et un postérieur).

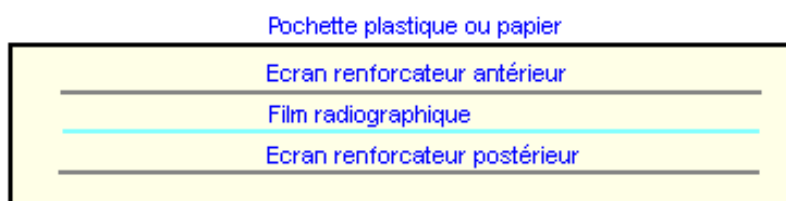


Figure 83 : La cassette simple film.

3.4.2. La cassette double films :

La cassette est constituée d'une feuille de papier renforcée ou de plastique opaque à la lumière blanche. Dans cette cassette, il est placé deux films radiographiques (de rapidité identique ou différente) et trois écrans renforçateurs métalliques (un antérieur, un intermédiaire et un postérieur).



Figure 84 : La cassette double films.

3.5. Les rayonnements parasites :

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

3.6. Le flou géométrique :

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

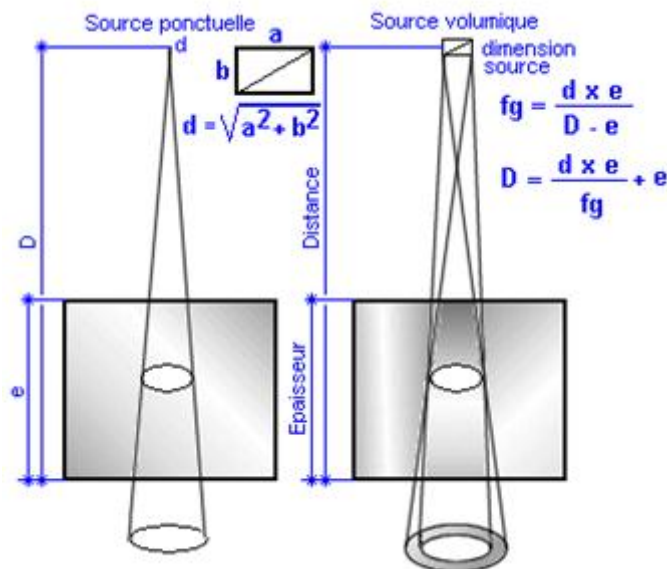


Figure 85 : Le flou géométrique.

3.7. La projection elliptique :

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

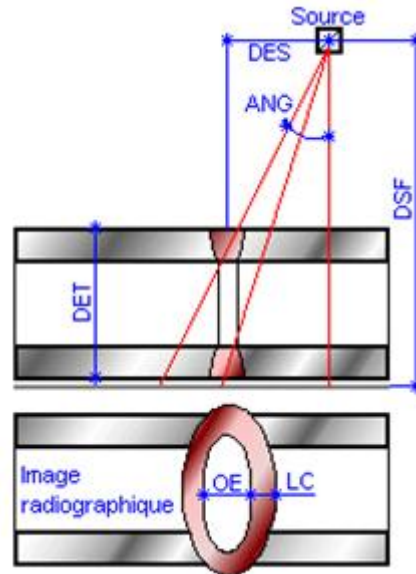


Figure 86 : La projection elliptique.

3.8. Le tir au contact :

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

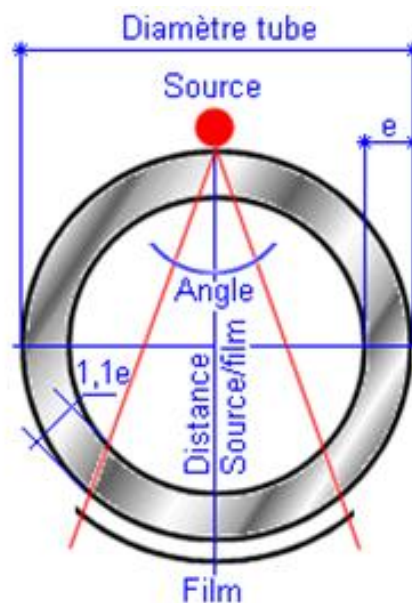


Figure 87 : Le tir au contact.

3.8.1. Les indicateurs de qualité d'image (IQI)

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

3.8.2. Les IQI à fils suivant NF EN 462-1 :

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

- Le fer
- L'aluminium
- Le cuivre
- Le titane



Figure 88 : indicateurs de qualité d'image (IQI)

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

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

- Le fer
- L'aluminium
- Le cuivre
- Le titane

3.9. Le repérage des radiogrammes :

Un système de repérage et d'identification des radiogrammes doit assurer une correspondance parfaite entre le film et la zone radiographiée (Fig.89.).

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

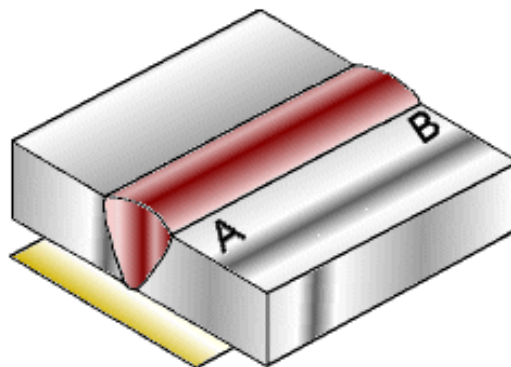


Figure 89 : Le repérage des radiogrammes

3.10. Avantages du contrôle par radiographie :

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

3.11. Inconvénients du contrôle par radiographie :

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

4.1. Principe du contrôle par ressuage :





Le contrôle par ressuage permet de détecter des défauts de compacité, parfois très fins, débouchant en surface et non obstrués (fissures, porosités, replis, manque de liaison) sur des matériaux métalliques non poreux et non absorbants. Ce contrôle est réalisé à l'aide de produits (les pénétrants) à très faible tension superficielle qui pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface. Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces, l'apparition visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts⁽²³⁾.






4.2. Applications du contrôle par ressuage :

- Avant soudage : préparation des chanfreins
- Pendant le soudage : contrôle entre passes, gougeage d'une reprise envers
- Après soudage : défauts superficiels, étanchéité

4.3. Méthode de mise en œuvre du ressuage :

Tableau 6 montre bien la méthode de mise en œuvre du ressuage :

Méthode de mise en œuvre du ressuage		
1	Nettoyage rigoureux et efficace avec brosse métallique et dégraissage soigné avec solvant volatil non chloré de la surface de la pièce à contrôler. Vérification du séchage complet de la pièce à contrôler.	
2	Application par pulvérisation (ou application au pinceau de soie) du liquide pénétrant (pré ou post émulsionné) coloré, fluorescent ou mixte sur toute la surface à examiner	
3	Temps d'imprégnation (de 15 à 40 minutes) du pénétrant par capillarité dans les défauts débouchant.	
4	Application d'un émulateur lipophile (à base d'huile) lors de l'utilisation d'un pénétrant post émulsionné avec émulateur lipophile.	

5	Élimination de l'excès de pénétrant sur la surface de la pièce à contrôler par rinçage à l'eau ou par solvant spécial. Vérification de l'élimination complète de l'excès de pénétrant et vérification du séchage complet de la pièce à contrôler.	
6	Application d'un émulateur hydrophile (à diluer dans l'eau) lors de l'utilisation d'un pénétrant post émulsionné avec émulateur hydrophile.	
7	Application par pulvérisation du révélateur à sec ou en suspension dans un solvant volatil en une couche mince et uniforme. Le révélateur pompe le pénétrant resté dans les discontinuités des défauts débouchant. Des taches colorées apparaissent à l'endroit des défauts.	
8	Interprétation du ressuage dans un délai de 7 à 30 minutes après application du révélateur sous un éclairage de 500 lux minimum pour les pénétrants colorés ou mixtes. Interprétation sous éclairage ultraviolet pour les pénétrants fluorescents et mixtes.	
9	Nettoyage, élimination complète des traces de produits, séchage et remise en état de la pièce contrôlée.	

4.4. Avantages du contrôle par ressuage :

- Facilité de mise en œuvre avec les produits pré émulsionnés.
- Facilité de mise en œuvre sur les chantiers.
- Bonne sensibilité de détection des défauts débouchant.
- Contrôle relativement économique et rapide.

4.5. Inconvénients du contrôle par ressuage :

- Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués
- Nettoyage rigoureux des pièces à contrôler
- Les opérateurs doivent être expérimentés pour certaines techniques
- Produits inflammables, volatils et nocifs
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout

I. Résultats et interprétations :

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente les types de défauts dans les cordons de soudure, les techniques de contrôle et enfin les remèdes.

2. Types de défauts :

D'après nos observations des cordons de soudure, nous avons remarqué plusieurs types de défauts :

D'après la figure 90, on peut voir les différents types de défauts :

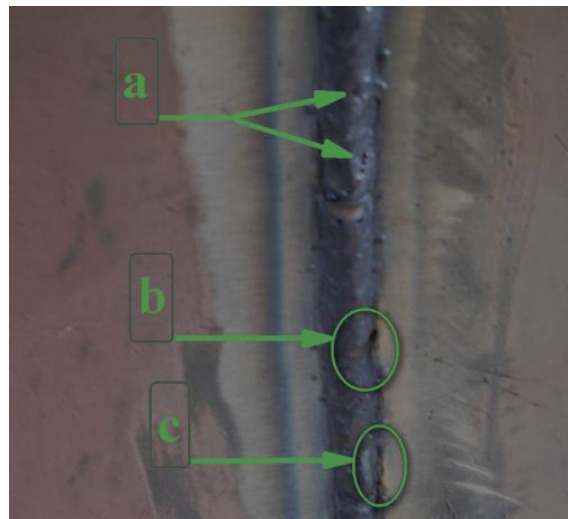
- a) Cratère : ce défaut apparaît lorsque dépression de retrait à la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.
- b) Fissure : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.
- c) Amorces d'arc : ce défaut apparaît lorsque la pince d'électrode ou la masse ont touché par hasard le métal de base
- d) Morsures/Caniveaux : ce défaut apparaît lorsque creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.
- e) Fissure : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.



Figure 90 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux, Fissure, Amorces d'arc).

D'après la figure 91, on peut voir les autres défauts, comme :

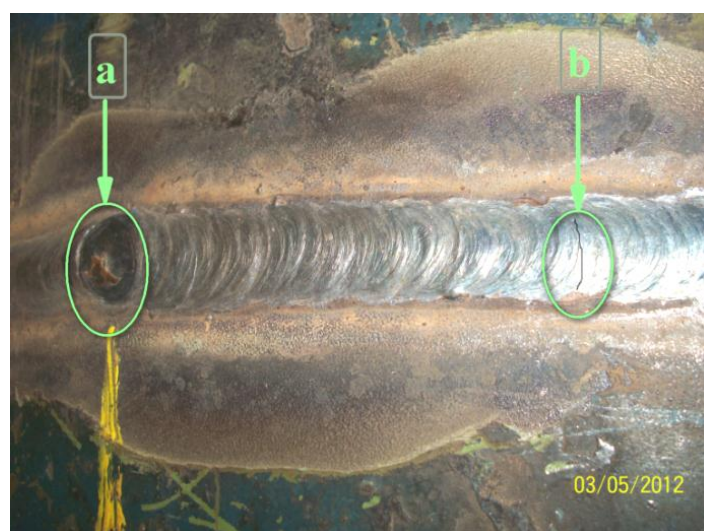
- a) Les inclusions gazeuses : ce défaut apparaît lorsque cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon.
- b) Morsures/Caniveaux : ce défaut apparaît lorsque creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.
- c) Morsures /Caniveaux : ce défaut même défaut en (b).



La figure 91 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux).

D'après la figure 92, on peut voir les autres défauts, comme :

- a) Cratère : ce défaut apparaît lorsque dépression de retrait à la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.
- b) Fissure : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.



La figure 92 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère et Fissure).

Les défauts observés dans la figure 93 sont :

- a) Les inclusions gazeuses : ce défaut apparaît lorsque cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon.
- b) Morsures/Caniveaux : ce défaut apparaît lorsque creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.
- c) Fissure : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.

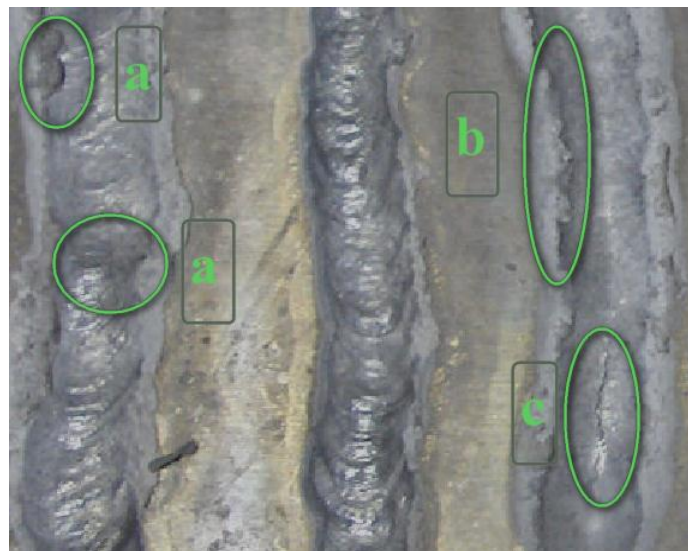


Figure 93 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux, et Fissure).

Les figures 94,95 et 96 montrent d' autres type de défauts :

- a) Fissure : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.

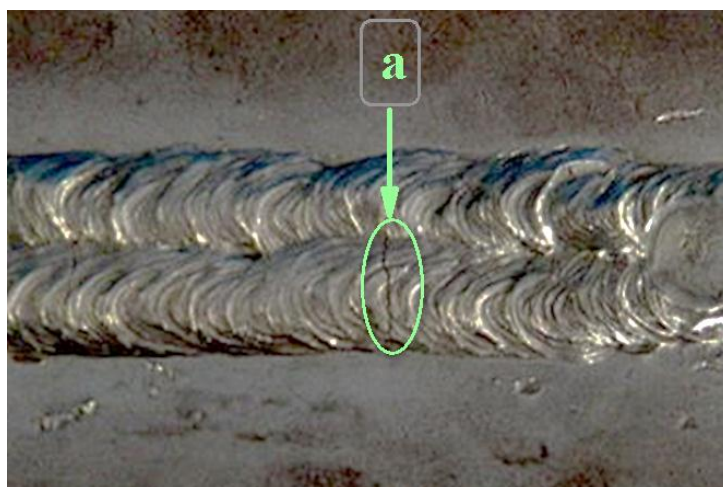


Figure 94 : Cordon de soudure avec les défauts (fissure).

- a) Fissure : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.
- b) Cratère : ce défaut apparaît lorsque dépression de retrait a la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.

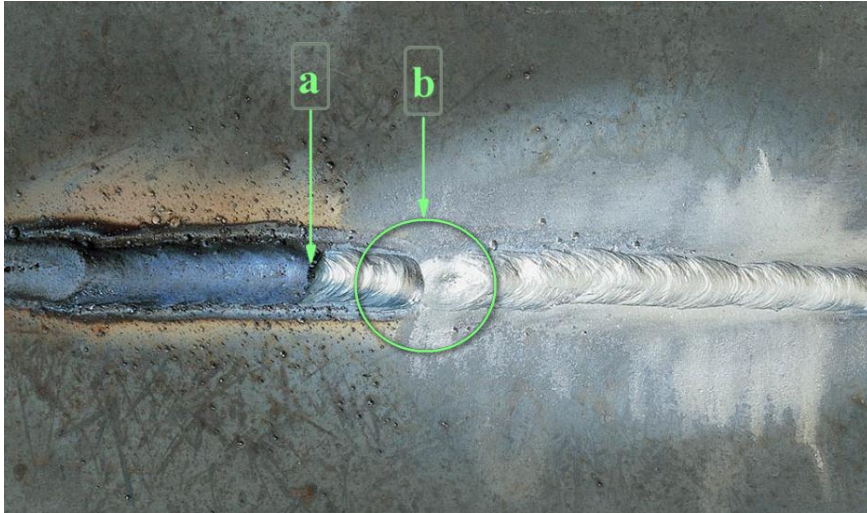


Figure 95 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusion et cratère).

- a) Cratère : ce défaut apparaît lorsque dépression de retrait a la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.



Figure 96 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère).

II. Détection des défauts par rayonnements :

Dans cette partie on présente des exemples de l'analyse de types de défauts par rayon gamma au niveau de Cosider.

1. Pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo) :

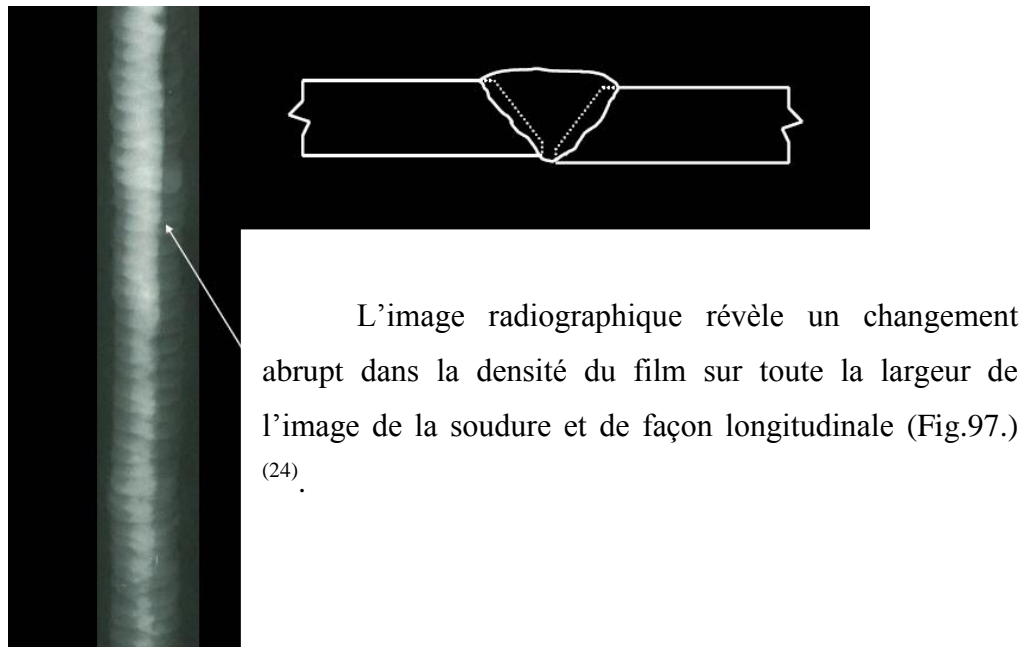


Figure 97 : L'image radiographique pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo).

2. Un désalignement des pièces à souder (Offset ou Hi-Lo) et un remplissage insuffisant à la racine du joint :

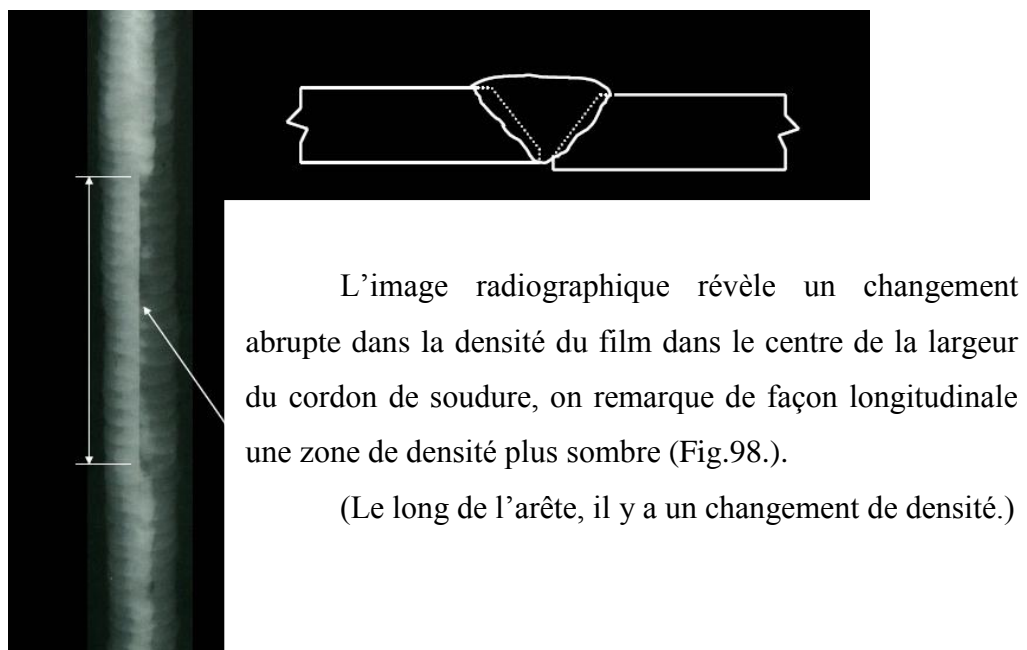


Figure 98 : L'image radiographique d'un désalignement des pièces à souder.

3. Concavité excessive (insuffisamment rempli) :

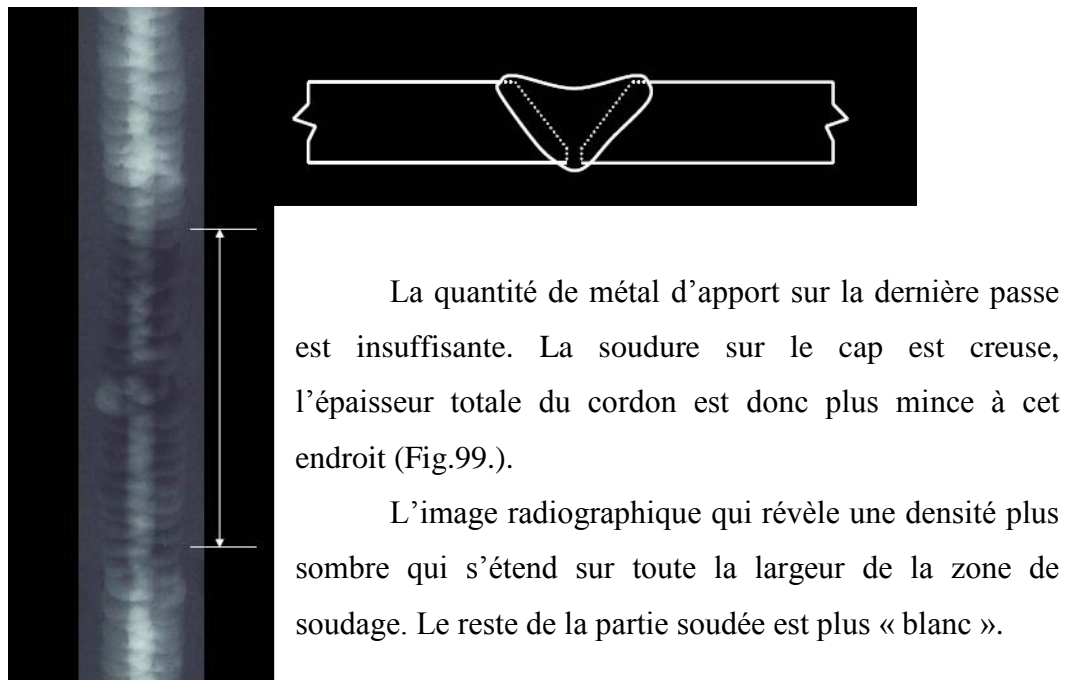


Figure 99 : L'image radiographique concavité excessive (insuffisamment rempli).

4. Pénétration excessive (glaçon) :

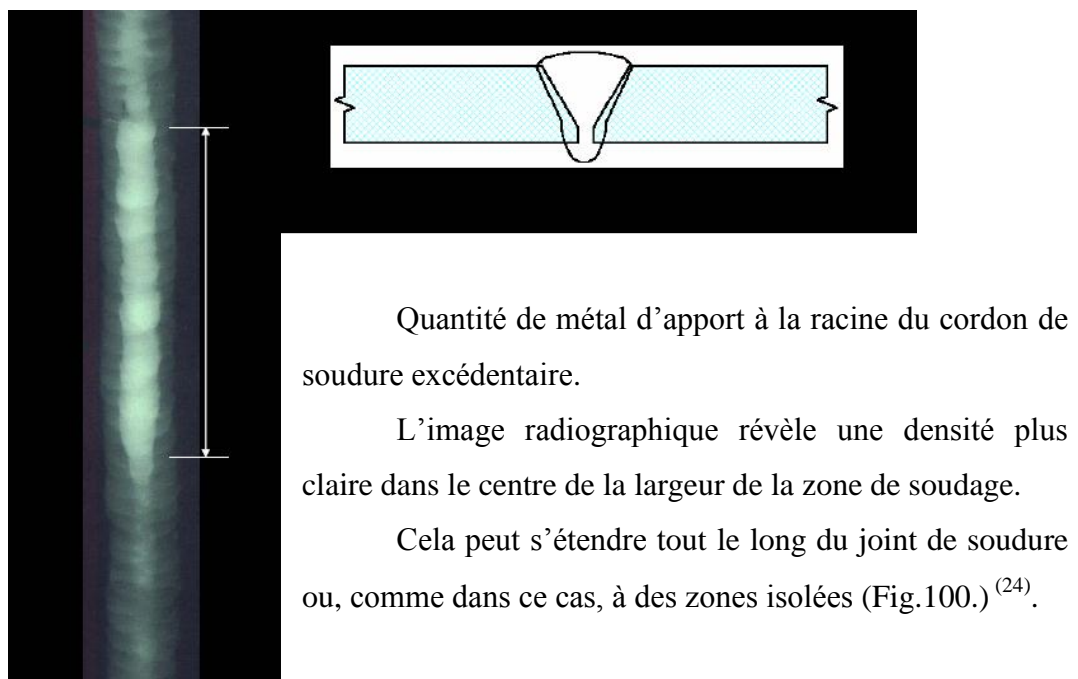


Figure 100 : L'image radiographique pénétration excessive (glaçon).

5. Caniveau externe :

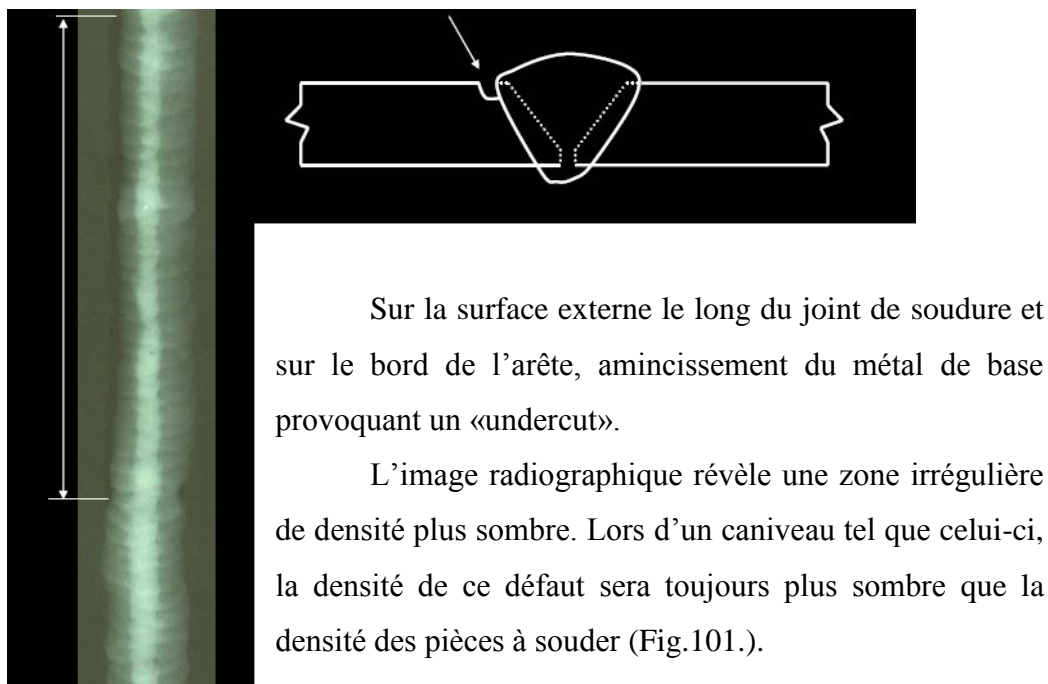


Figure101 : L'image radiographique caniveau externe.

6. Caniveau interne à la racine :

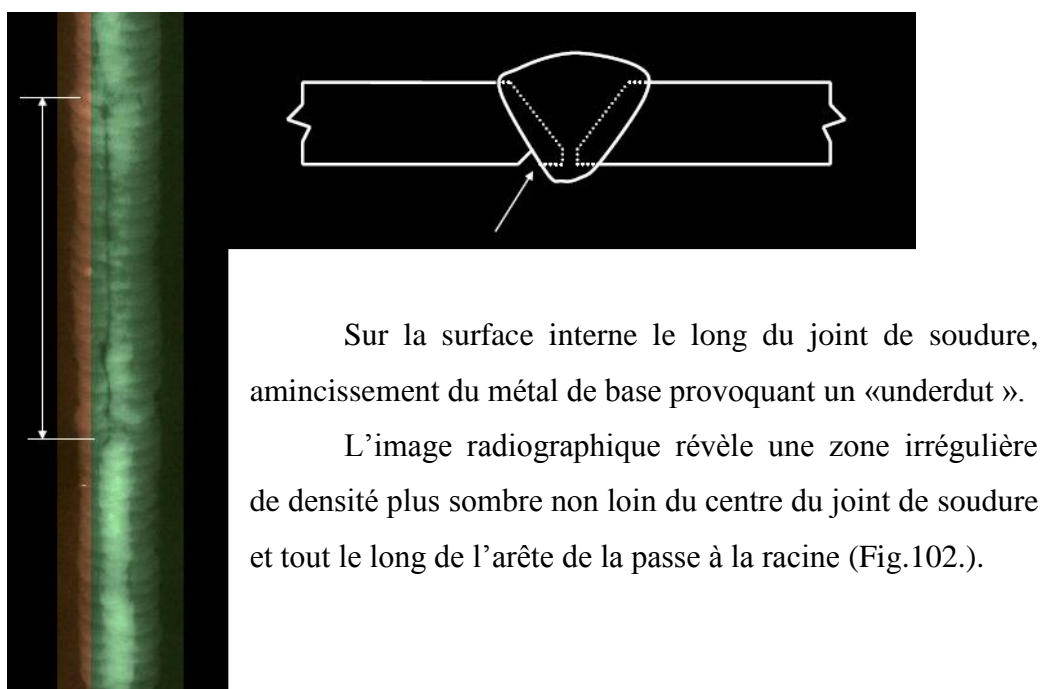


Figure102 : L'image radiographique caniveau interne à la racine.

7. Concavité interne à la racine :

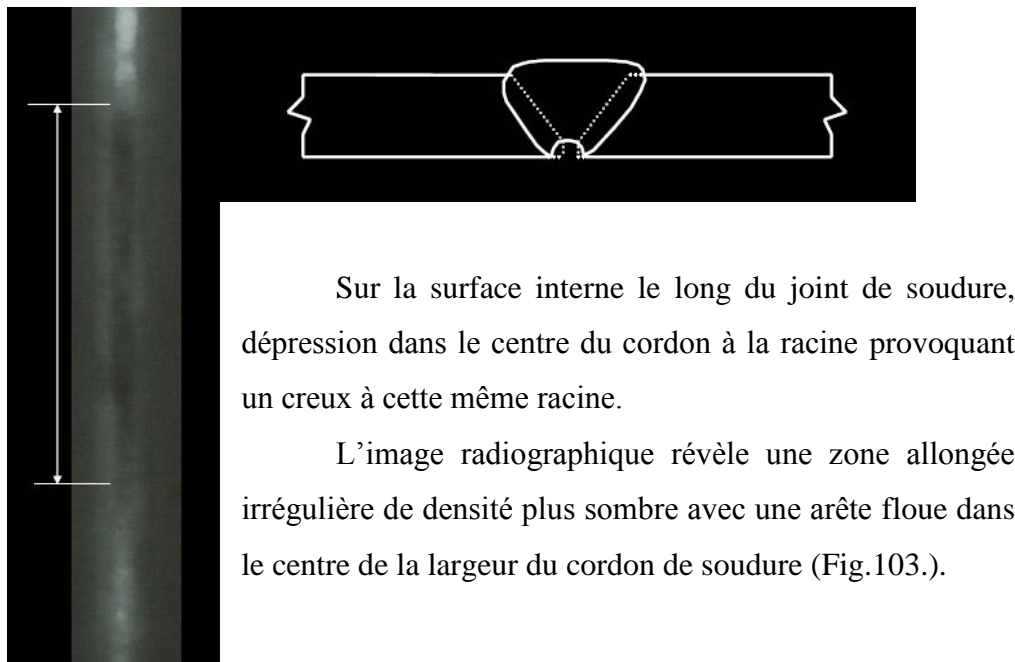


Figure 103 : L'image radiographique concavité interne à la racine.

8. Cratère à la racine localisé :

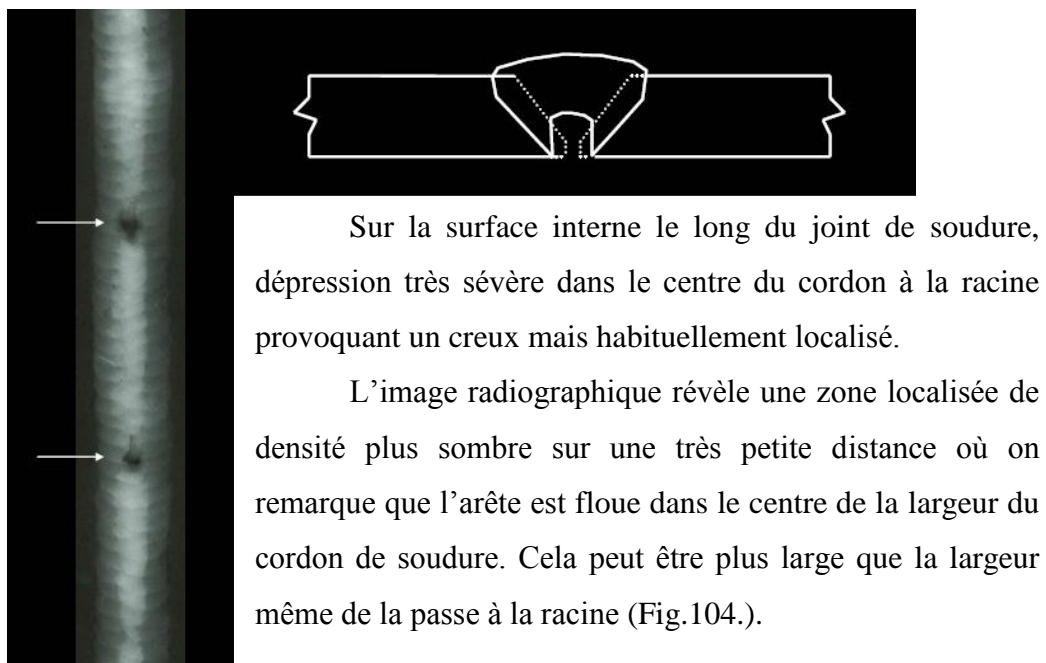


Figure 104 : L'image radiographique cratère à la racine localisé.

9. Pénétration incomplète ou manque de pénétration :

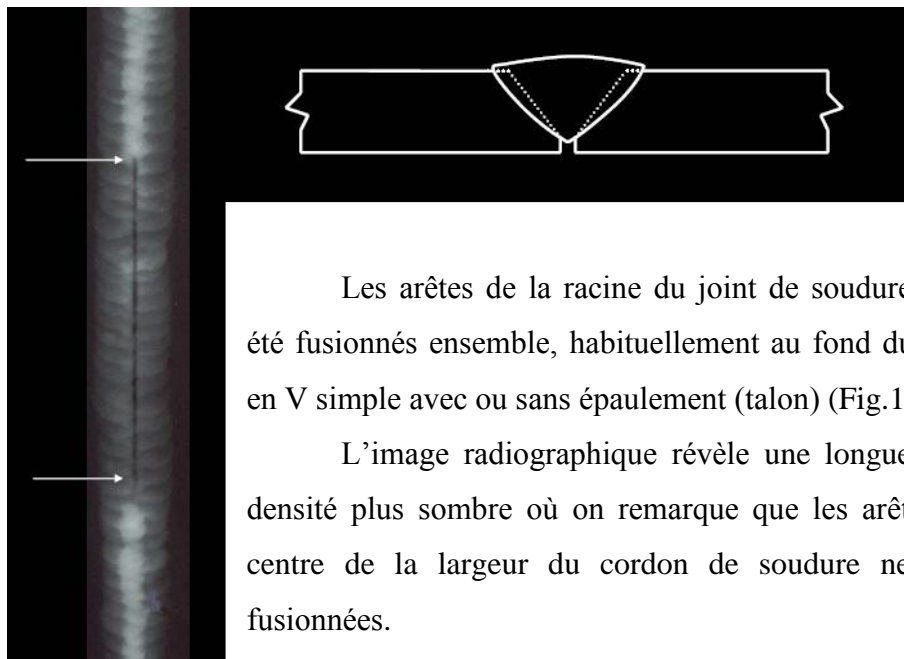


Figure 105 : L'image radiographique pénétration incomplète ou manque de pénétration.

10. Inclusions de laitier en inter passe :

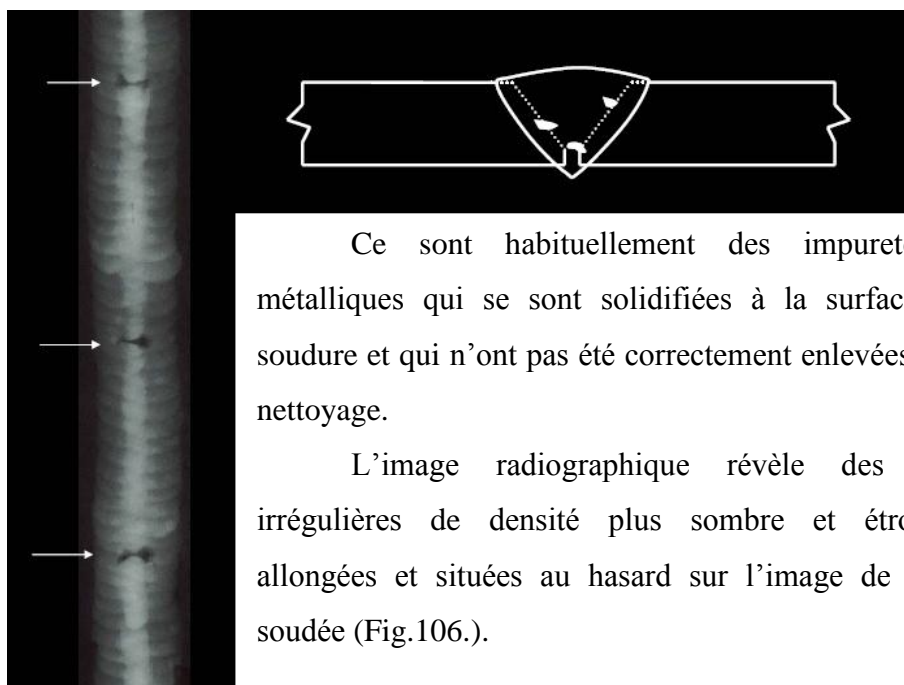


Figure 106 : L'image radiographique inclusions de laitier en inter passe.

11. Inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer) :

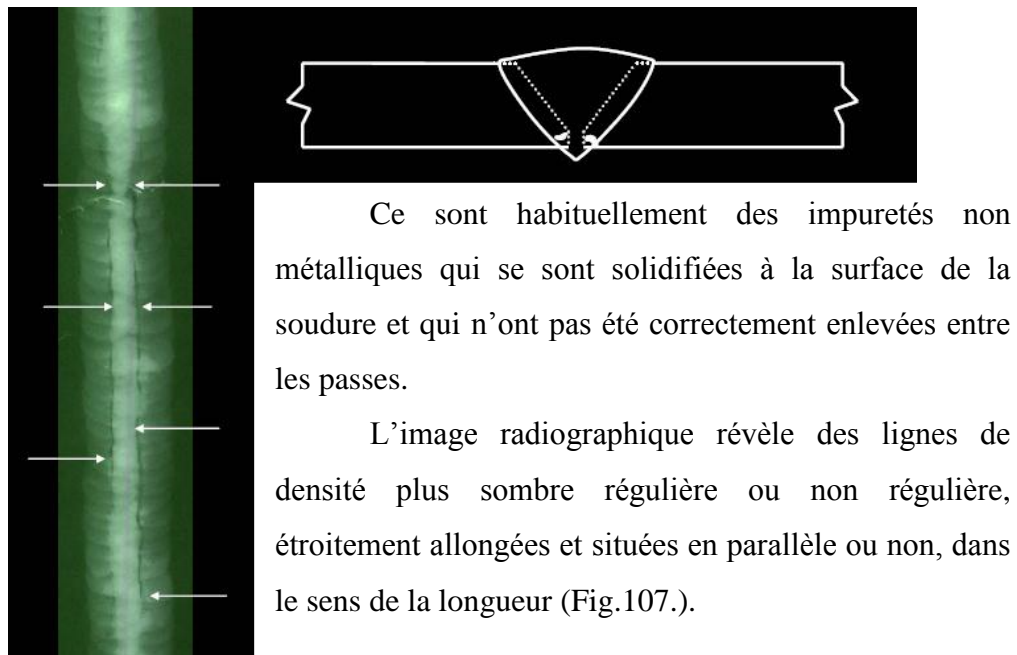


Figure 107 : L'image radiographique inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer).

12. Manque de fusion (sur les côtés des plaques) :

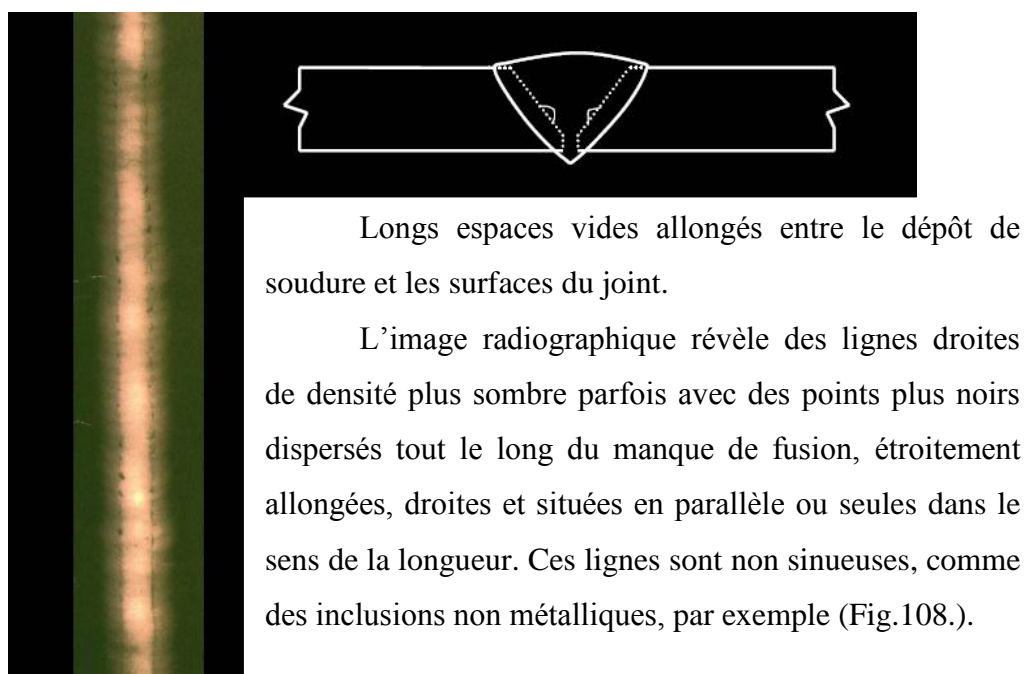


Figure 108 : L'image radiographique manque de fusion (sur les côtés des plaques).

13. Manque de fusion entre les passes :

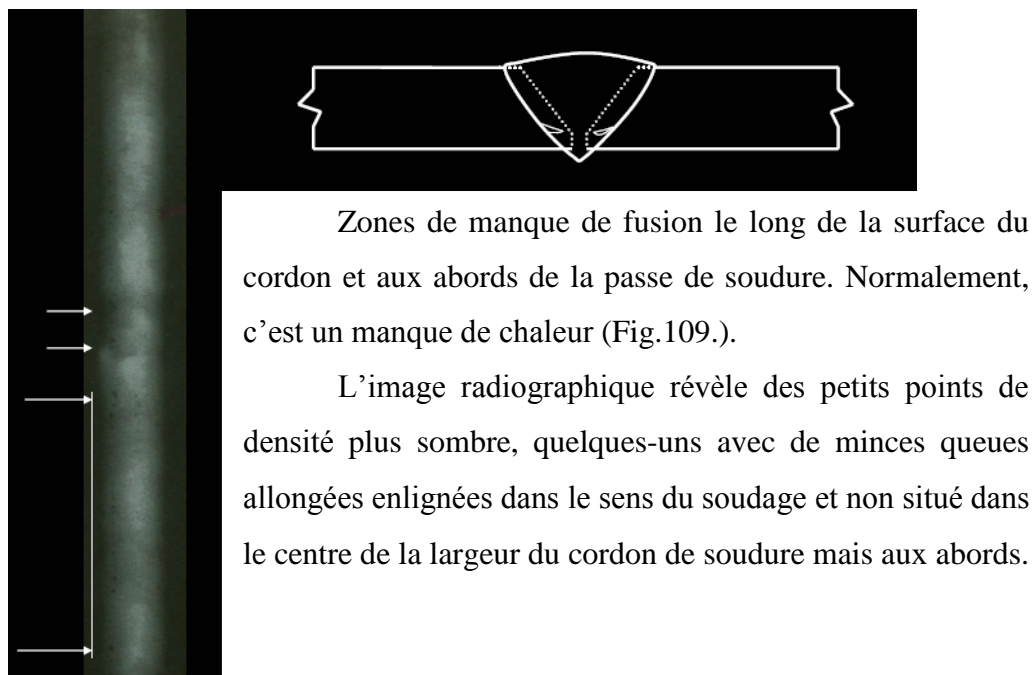


Figure 109 : L'image radiographique manque de fusion entre les passes.

14. Porosités dispersées :

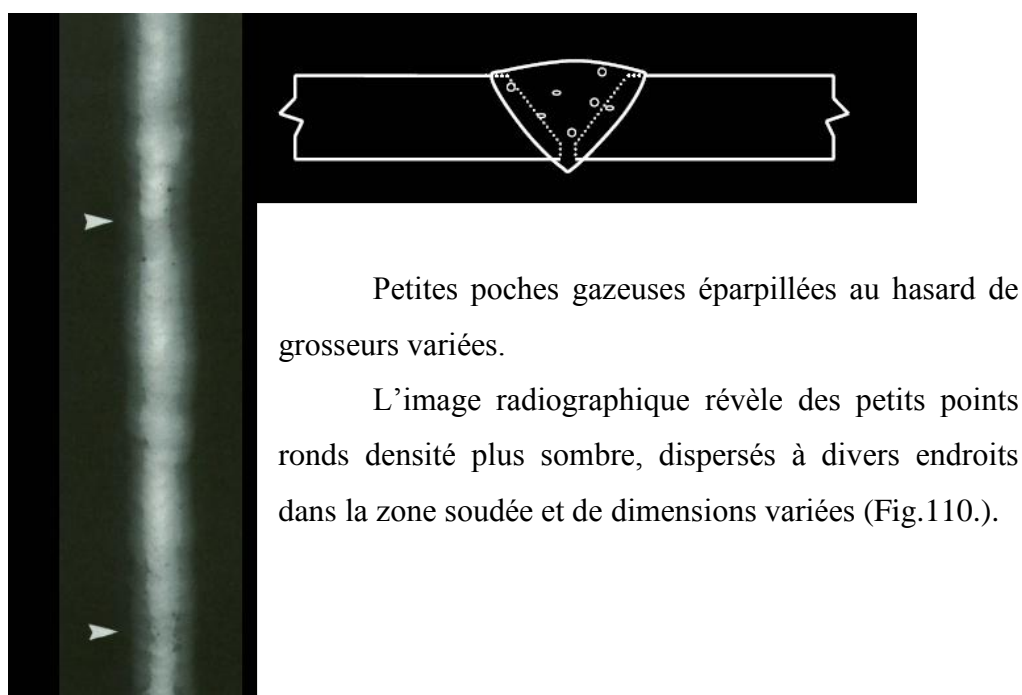


Figure 110 : L'image radiographique porosité dispersée.

15. Nids de Porosités ou soufflures agglomérées :

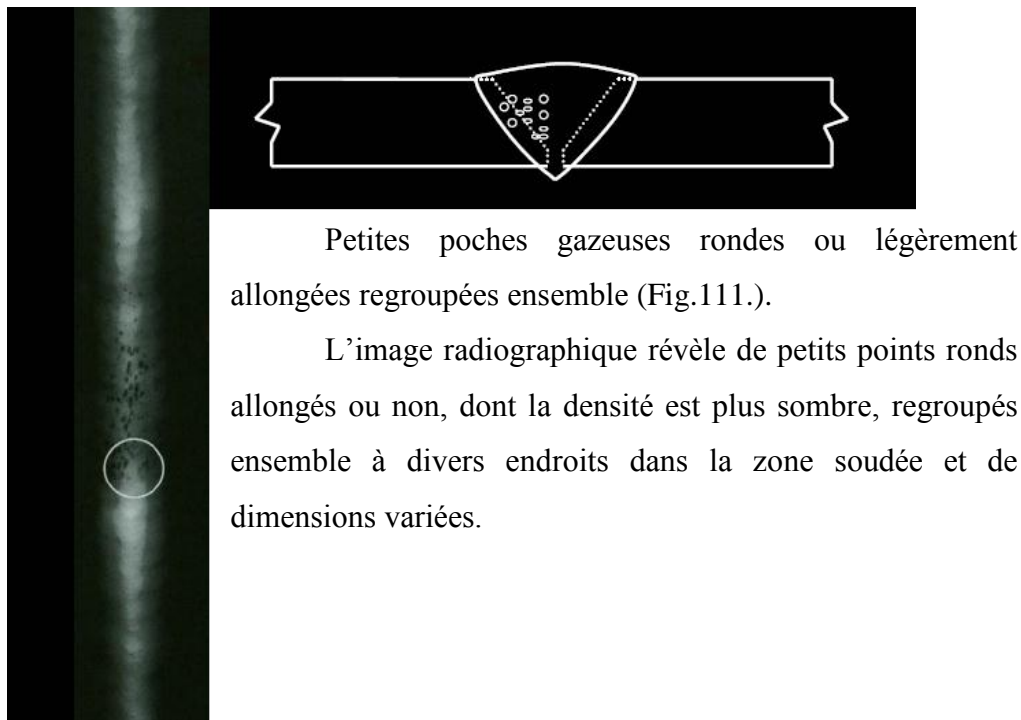


Figure 111 : L'image radiographique nid de porosité ou soufflure agglomérée.

16. Porosités ou soufflures enlignées la racine du joint :

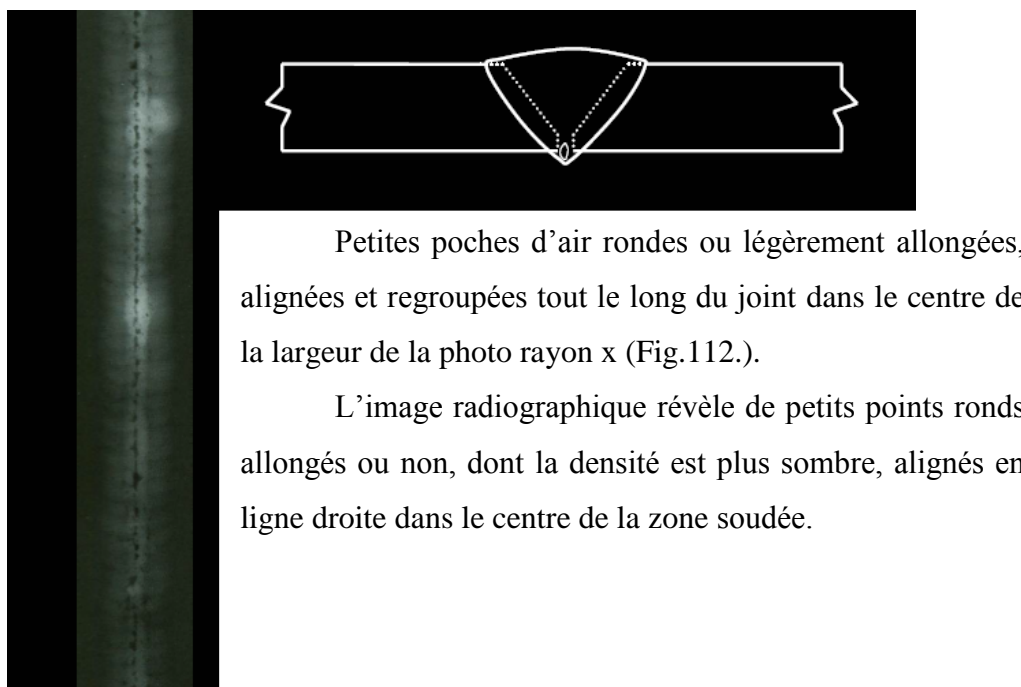


Figure 112 : L'image radiographique porosité ou soufflure enlignée la racine du joint.

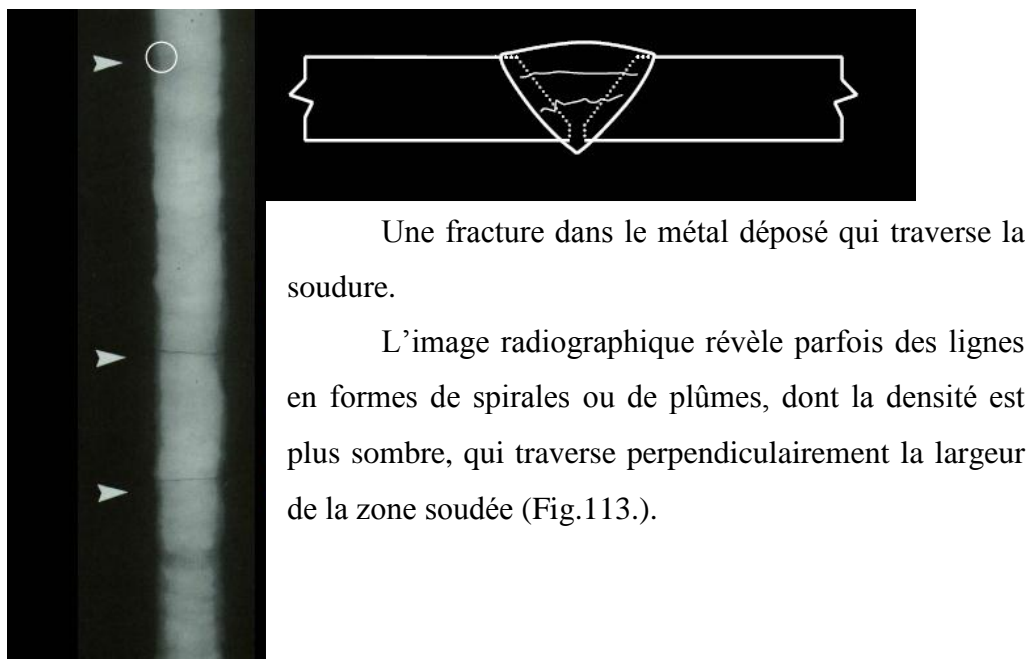
17. Fissures transversales :

Figure 113 : L'image radiographique fissure transversale.

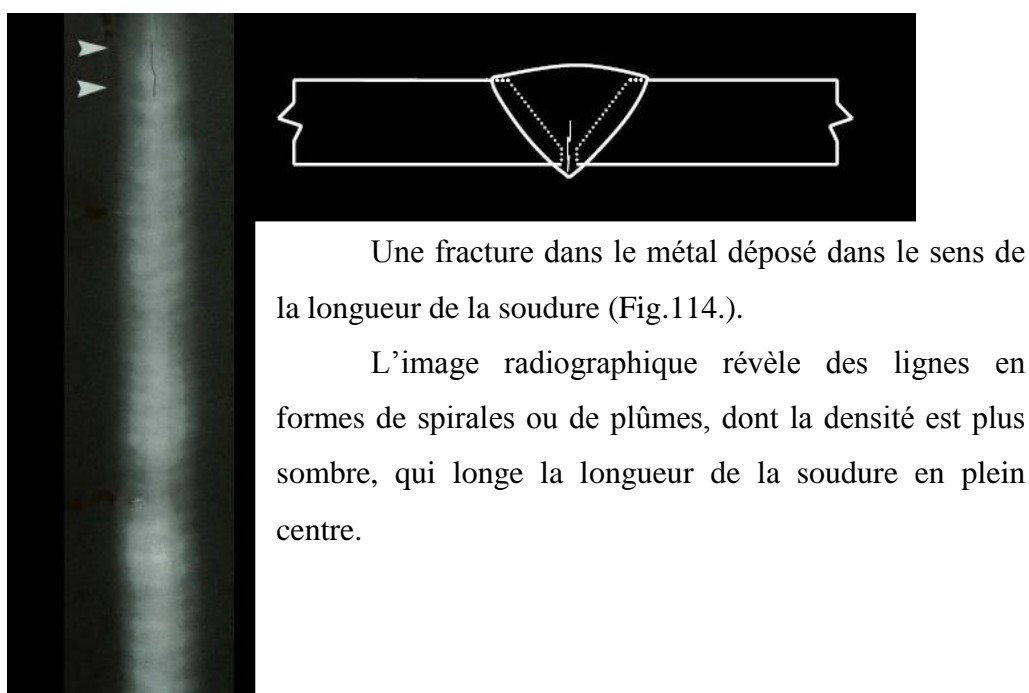
18. Fissures longitudinales :

Figure 114 : L'image radiographique fissure longitudinale.

19. Fissures longitudinales à la racine :

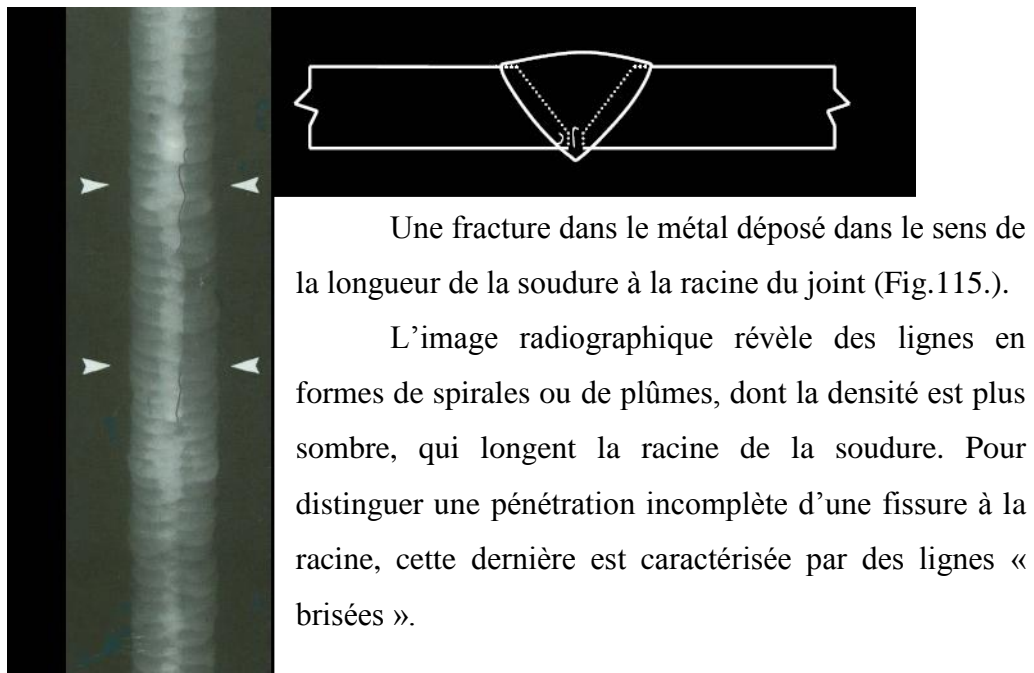


Figure 115 : L'image radiographique fissure longitudinale à la racine.

20. Inclusions de tungstène :

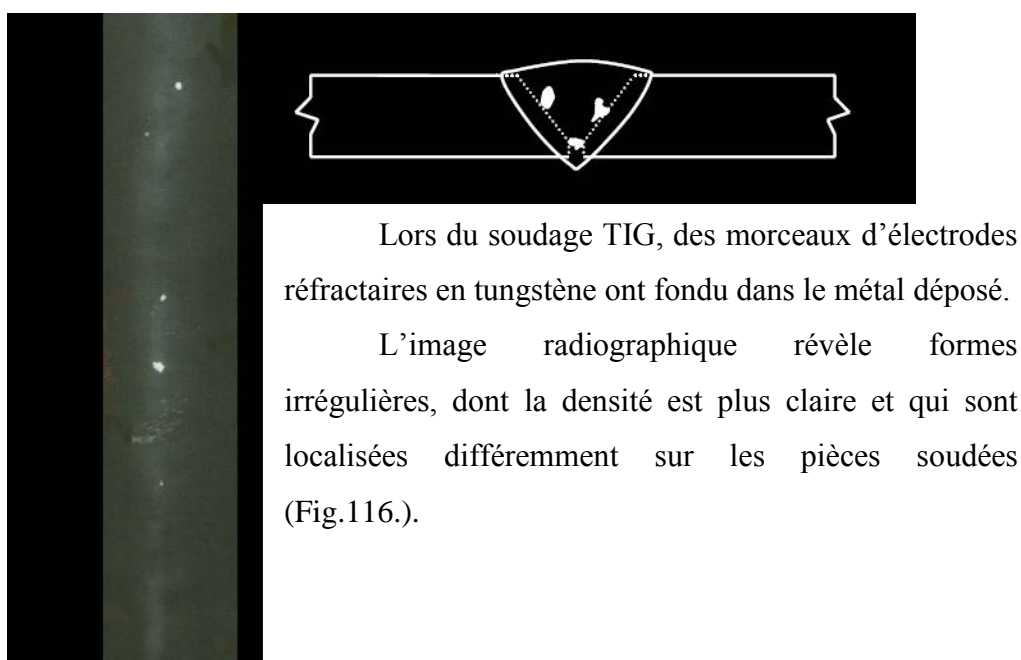


Figure 116 : L'image radiographique inclusion de tungstène.

III. Les remèdes :

Au niveau de COSIDER, plusieurs techniques de remèdes sont utilisées afin d'éliminer les défauts dans le cordon de soudure.

- a- Traitement par chauffage : La figure 117 montre le procédé de traitement du cordon de soudure par chauffage afin d'éliminer le maximum de fissures.



Figure 117 : Traitement d'un cordon de soudure par chauffage.

- b- Traitement mécanique : La deuxième technique consiste en limage du cordon de soudure juste à sa surface (Fig. 118).



Figure 118 : Limage du cordon de soudure.

- c- Par contre, si les fissures ou autres défauts sont encore présents, l'opérateur enlève de la matière du cordon de soudure par limage (Fig. 119).



Figure 119 : Enlèvement de la matière du cordon de soudure.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire de master avait par but est l'étude des défauts de soudage dans les cordons de soudure des pipelines en acier au niveau de Cosider de Biskra.

A partir de ce travail, on a trouvé que :

- Plusieurs types de défauts sont observés dans un cordon de soudure, comme :
(Fissure, Cavités, Inclusion solide, Manque de fusion et de pénétration, défauts de forme, défauts divers).
- Les techniques de détection des défauts s'effectuent par un control visuel et par radiographie.
- Les techniques de remèdes effectuées sont :
 - le chauffage qui permet d'élimmer une grande partie de ces défauts.
 - Le limage.

Généralement ces défauts sont inévitables dans un procédé de soudage.

Référence Bibliographiques

- (1) S.BENSAADA.D.FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ».Office de publication universitaires.2^e 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 ».2^e 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&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a>Fichier pratique de scruté ED83 3^E Edition. Sebtembre2099.
- (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'électrode réfractaire ; publications Centre de Soudage de Cheraga

- (10) H.GRANJON. «Bases métallurgiques de soudage » 2^{ème} édition. publications de soudage et de ses applications Paris .1995.
- (11) Documents (PDF) défauts de soudage des pipelines Yamani Institute of Technology.
- (12) Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- (13) Documents Yamani Institute of Technology
- (14) Site Internet : <http://www.yamani-institute.com/>
- (15) Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- (16) Document de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012
- (17) Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- (18) Document de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012.
- (19) Catalogue de poste soudeuse de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012.
- (20) Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- (21) Catalogue baguette soudeur de l'industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012.
- (22) Documents Technique .C.N.D. COSIDER. Biskra 2012.
- (23) Document Control .CNV CSIDER BISKRA 2022
- (24) Documents technique de Contrôle CND COSIDER. Biskra.

ملخص :

إن الهدف من هذه المذكرة هي دراسة العيوب التي تظهر أثناء وبعد تلحيم خطوط الأنابيب الخاصة لنقل الغاز والبتروول في مؤسسة كوسيدار، ومعرفة أسباب ظهورها وكيفية معالجتها.

Résumé :

Le but de cette note est l'étude des défauts qui apparaissent pendant et après le soudage de pipelines pour transporter le gaz et le pétrole dans une institution COSIDER, et de trouver les raisons de son apparition et comment y faire remédier.

Abstract:

The purpose of this note is the study of defects that appear during and after welding of pipelines to transport gas and oil in an institution COSIDRE, and find out the reasons for its appearance and how to address them.