

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences De L'ingéniorat
Département : Génie Mécanique
Domaine : Science Et Technique
Filière : .Génie mécanique
Spécialité : fabrication mécanique et production

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

Les Défauts de soudage pipelines

Présenté par : Redouane Madih

Encadrant : Mokas Nacer

Grade : MCA Université : UBM Annaba

Jury de Soutenance :

Lagred Ahmed	Professeur	UBM Annaba	Président
Ben Chiheb Salim	MCB	UBM Annaba	Jury

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace

Je dédie ce travail:

à ma chère Mère et à mes chers frères

*A tous qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce
travail Et sur tout mon encadreur Dr. Mokas nacer*

Remerciement

Au nom de Dieu et après grand merci à notre dieu, qui m'a donné la force pour réaliser ce modeste travail.

Je voudrais d'abord remercier tous mes enseignants du département de mécanique pour nous avoir donné le savoir nécessaire au cours des dernières années. Je tiens à remercier vivement mon encadreur Dr Mokas Nacer pour m'avoir encadré.

Je tiens aussi à remercier tous mes amis sans exception, ainsi que Tous les personnes qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction général

Chapitre I : Soudage des pipelines.

I.1. Introduction	10
I.2. Procédés de soudage :	10
2.1. Soudage par pression	11
2.2. Soudage par fusion.....	11
2.2.1. Soudage à l'arc électrique	12
2.2.1.1. Généralités sur l'arc de soudage	12
2.2.1.2. Principe de soudage à l'arc électrique.....	12
2.2.2. Le soudage avec électrodes enrobées	13
2.2.2.1. Principe du procédé	13
2.2.2.2. Les électrodes	14
2.2.2.3. Protection de métal en fusion	15
2.2.2.4. Apport d'élément.....	15
2.2.2.5. Types d'électrodes	15
2.2.3. Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé TIG.....	15
2.2.3.1. Principe et œuvre du procédé	16
2.2.3.2. Les gaz de protection en TIG	16
2.2.4. Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG...	17
2.2.4.1. Gaz de protection	17
2.2.4.2. La composition des fils dépend	17
II. Soudage des aciers à faible teneur en carbone	17
II.1. Introduction.....	17
II.2. Les différentes zones d'un assemblage soudé	18
2.1. Le métal de base	18
2.2. La zone fondue.....	18
2.3. La zone thermiquement effectuée (Z.A.T)	18
2.4. Zone de liaison.....	19
III. Soudage des pipelines	19
III.1. Introduction	19
III.2. Le soudage des pipelines	19
2.1. Procédé à l'arc électrique à l'électrode enrobée.....	19

a) Soudage manuel	20
b) Soudage automatique	21

Chapitre II : Les défauts des soudages.

I. FISSURES.....	21
1. Généralités.....	21
1.1. Orientation des fissures.....	21
2.1. Les fissures longitudinales	21
2.2. Les fissures transversales	22
3. Types des fissures	22
3.1. Fissures de Gorge (Throat Cracks)	23
3.2 Fissures de Racine	24
3.3. Fissures de Cratère.....	24
3.4. Fissures au raccordement.....	25
3.5. Fissures Sous -Cordon	26
4. Fissure à chaud (ou de solidification)	26
5. Fissures à froid (fissures d'hydrogène)	28
6. Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire).....	30
7. Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	37
II.2. Manque de fusion.....	39
2.1. Localisations possibles des manques de pénétration	39
2.2. Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	40
2.3. Manque de fusion entre passes.....	41
2.4. Manque de fusion à la racine de la soudure.....	42
2.5. Manque de pénétration.....	43
2.6. Manque de pénétration à la racine.....	44
2.7. Manque de pénétration dans la soudure	45
II.3. Inclusion gazeuses	45
3.1. Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités	45
3.2. Porosités vermiculaires.....	46
3.3. Porosités de reprise	47
3.4. Porosités uniformes.....	47
3.5. Inclusion solides.....	49

3.5.2. Différents types d'inclusions solides.....	49
3.5.3. Inclusions de laitier.....	49
3.5.4 Inclusionsde tungstène.....	50
3.5.5. Inclusions cuivre.....	50
3.8. Excès de matière	51
3.8.1. Généralité	51
3.9. Excès de pénétration	52
3.10 Surépaisseur	52
3.11 Recouvrements non fusionnés (Débordements)	53
II.4. Dénivellement	54
1. Dénivellement	51
II.5. Cratère	52
1. Cratère	52
II.6. Défauts de surface	56
II.6. 1. Morsures/Caniveaux..	56
II.6. 2. Effondrement à la racine..	58
II.6. 3. Amorces d'arc..	59
II.6. 4. Projections sur le métal de base..	60
II.6. 5. Défaut d'aspect	61
II.7. Métal de base :(Inspection a défauts)	62
II.7.1. Inspection des matériaux..	62
II.7.2. Inspection de tubes	63
II.7.3. Inspection de tôles	63
II.7.4. Défauts de laminage	64
II.7.5. Imperfections du métal de base	64
II.7.6. Replieure	65

Chapitre III : Résultats et interprétations

I. Résultats et interprétations :	66
I.1. Introduction :	66
2. Types de défauts :	66
II. Détection des défauts par rayonnements :	70
II 1. Pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo) :	70
II 2. Un désalignement des pièces à souder (Offset ou Hi-Lo) et un remplissage insuffisant à	

la racine du joint :	71
II 3. Concavité excessive (insuffisamment rempli) :	71
II 4. Pénétration excessive (glaçon) :	72
II 5. Caniveau externe :	72
II 6. Caniveau interne à la racine :	73
II 7. Concavité interne à la racine :	74
II 8. Cratère à la racine localisé :	74
II 9. Pénétration incomplète ou manque de pénétration :	75
II 10. Inclusions de laitier en inter passe :	75
II 11. Inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer) :	76
II 12. Manque de fusion (sur les côtés des plaques) :	76
II 13. Manque de fusion entre les passes :	77
II 14. Porosités dispersées :	78
II 15. Nids de Porosités ou soufflures agglomérées :	78
II 16. Porosités ou soufflures enlignées la racine du joint :	78
II 17. Fissures transversales :	79
II 18. Fissures longitudinales :	80
III. Les remèdes :.....	80
Conclusion générale	
Bibliographique.	

Liste des figures

Figure 1 :Principe de soudage par Pression.....	11
Figure 2 : principaux procédés de soudage à l'arc.....	12
Figure 3: Principe de soudage à l'arc électrique.	13
Figure 4 : L'électrode enrobée.....	14
Figure 4 : Electrodes de soudage.....	15
Figure 5 : Principe de soudage TIG.....	16
Figure 6 : Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	19
Figure 7 : Principe de soudage manuel.....	20
Figure 8 : Soudage des pipelines (type manuel).....	21
Figure 9 : Soudage des pipelines type automatique.....	22
Figure 10a : La fissure longitudinale.....	22
Figure 10b : La fissure transversale.....	22
Figure 11 : Les types de fissure.....	23
Figure 12 : Fissure de Gorge (Throat Cracks).....	24
Figure 13 : Fissure de Racine.....	24
Figure 14 : Fissure de Cratère.....	25
Figure 15 : Fissure au raccordement.....	25
Figure 16: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	26
Figure 17: Fissure à chaud (ou de solidification).	27
Figure 18 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.....	28
Figure 19 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	29
Figure 20: Arrachement lamellaire dans un joint en T.....	30
Figure 21 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.....	31
Figure 22 : Relation entre STRA et concentration en soufre pour tôle de 12.5 à 50mm d'épaisseur.....	32
Figure 23 a : Configuration du Joint la soudure à deux angles.....	33
Figure 23b : Configuration du Joint, les soudures à deux faces sont moins susceptibles.....	34
Figure 23c : Configuration du Joint, plus petites soudures d'angle à deux faces.....	34

Figure 23d : Configuration du Joint, la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible.....	35
Figure 24a : Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible.....	36
Figure 24b : Beurrage in-situ.....	37
Figure 25 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	38
Figure 26a : Soudage en position à plat–haut degré de raffinement de la ZAT.....	39
Figure 26b : Soudage en position verticale ou horizontale –faible degré de raffinement de la ZAT.....	39
Figure 27 : Localisations possibles des manques de fusio.....	40
Figure 28 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	40
Figure 29 : Manque de fusion entre passes.....	41
Figure 30 : Manque de fusion à la racine de la soudure.....	42
Figure 31a : Localisations possibles des manques de pénétration à la racine de la soudure.....	43
Figure 31b : Localisations possibles des manques de pénétration à l’intérieur de la soudure.....	43
Figure 32 abc & d : Manque de pénétration dans la soudure.	44
Figure33a : Apport (chaleur) arc trop faible.....	45
Figure33b : Diamètre électrode trop grand.....	45
Figure 34a : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.....	46
Figure 34b : Inclusions gazeuses porosités de reprise.....	47
Figure 34c : Inclusions gazeuses porosités uniformes.....	48
Figure 35a : Inclusions de laitier.	49
Figure 35b : Inclusions de tungstène.	50
Figure 35c : Inclusions de cuivre.	51
Figure36 : Excès de matière.	52
Figure37 : Excès de pénétration.	52
Figure38 : Convexité excessive & Surépaisseur excessive.....	53
Figure39 : Recouvrements non fusionnés (Débordements).....	54
Figure 40 : Dénivellement.....	55
Figure 41 : Cratère.....	56
Figure 42 : Défauts de surface (Morsures/Caniveaux).....	57

Figure 43a : Effondrement à la racine.	58
Figure 43b : Effondrement.	59
Figure 44 : Amorces d'arc.	59
Figure 45 : Projections sur le métal de base.....	60
Figure 46 : Défaut d'aspect.	61
Figure 47 : Métal de base (Inspection a défauts).	62
Figure 48 : Inspection de tôles.	63
Figure 49 : Défauts de laminage.	64
Figure 50 : Imperfections du métal de base.	65
Figure 51 : Repliure.	65
Figure 52 : Doublure de laminage.	65
Figure 53 : Dommages Mécaniques.....	66
Figure 54 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux, Fissure, Amorces d'arc).....	66
Figure 55 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux)....	67
Figure 56 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère et Fissure).....	68
Figure 57 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux, et Fissure).....	68
Figure 58 : Cordon de soudure avec les défauts (fissure).....	69
Figure 59 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusion et cratère)...	69
Figure 60 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère).....	70
Figure 61 : L'image radiographique pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo)...	70
Figure 62 : L'image radiographique d'un désalignement des pièces à souder.....	71
Figure 63 : L'image radiographique concavité excessive (insuffisamment rempli)...	72
Figure 64 : L'image radiographique pénétration excessive (glaçon).....	72
Figure 65: L'image radiographique caniveau externe.....	73
Figure 66 : L'image radiographique caniveau interne à la racine.....	73
Figure 67 : L'image radiographique concavité interne à la racine.....	74
Figure 68 : L'image radiographique cratère à la racine localisé.....	74
Figure 69 : L'image radiographique pénétration incomplète ou manque de pénétration.....	75

Figure 70 : L'image radiographique inclusions de laitier en inter passe.	75
Figure 71 : L'image radiographique inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer).	76
Figure 72 : L'image radiographique manque de fusion (sur les côtés des plaques)..	77
Figure 73 : L'image radiographique manque de fusion entre les passes.....	77
Figure 74 : L'image radiographique porosité dispersée.	78
Figure 75 : L'image radiographique nid de porosité ou soufflure agglomérée.	78
Figure 76 : L'image radiographique porosité ou soufflure enlignée la racine du joint.	79
Figure 77 : L'image radiographique fissure transversale.	79
Figure 78 : L'image radiographique fissure longitudinale.	80
Figure 79 : Limage du cordon de soudure.....	82
Figure 80 : Enlèvement de la matière du cordon de soudure.....	83

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 desoudure des pipelines ce travail a été réalisé.

- Le manuscrit est composé de trois chapitres :
- Le premier chapitre est une généralité sur le soudage.
- Le deuxième chapitre est réservé aux défauts de soudage des pipelines.
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats et interprétations des défauts observés dans les cordons de soudures et leurs remèdes.

Chapitre I

Soudage des pipelines

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.

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.

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.

❖ Procédés de soudage de pièces métalliques

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

- Soudage électro gaz.
- Soudage par diffusion.
- Soudage par explosion.
- Soudage par impulsion magnétique

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

I.2.1 - Soudage par pression

Le soudage par pression, 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

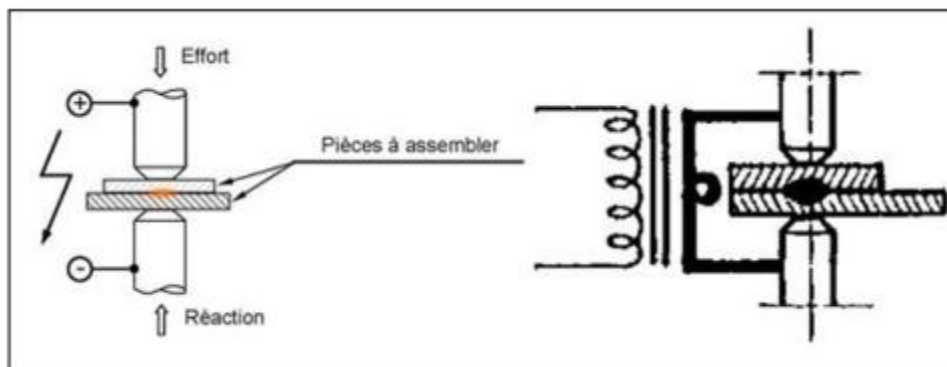


Figure1 : Principe de soudage par pression.

I.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 chimique....

- Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :
 - Soudage à l'arc électrique
 - Soudage à l'arc sous gaz de protection
 - Soudage par jet de plasma
 - Soudage sous flux

I.2.2.1. Soudage à l'arc électrique

I.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 y a plusieurs formes ou types de décharges électrique : en arc, à leur, par étincelles, décharge orageuse (éclair) et autre elles par leurs durée, tension, intensité de courant et autres paramètres.

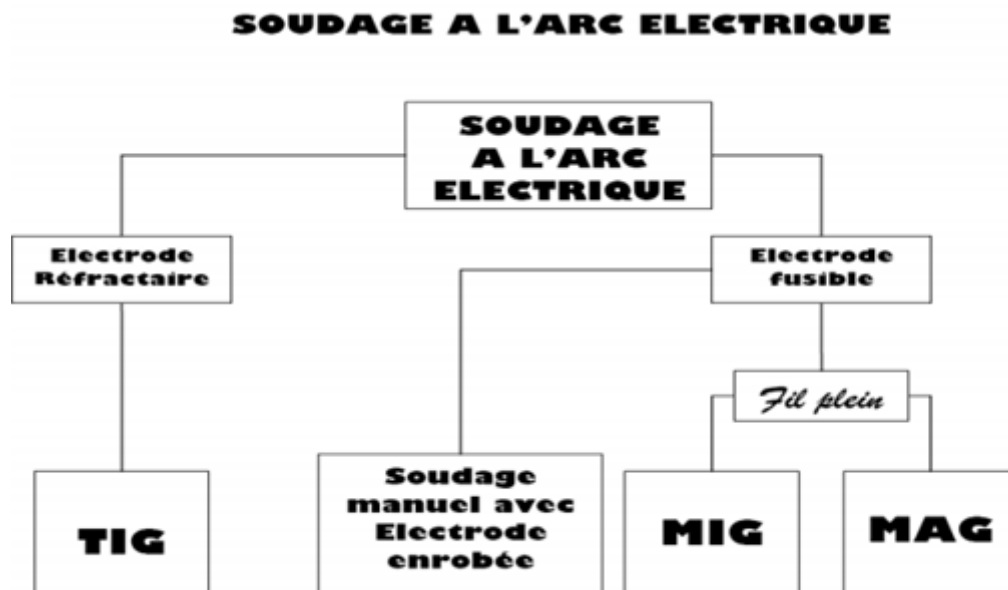


Figure 2 : principaux procédés de soudage à l'arc INRS,
guide pratique ventilation n°7-E688

I.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. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder. 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 ce choix sont :

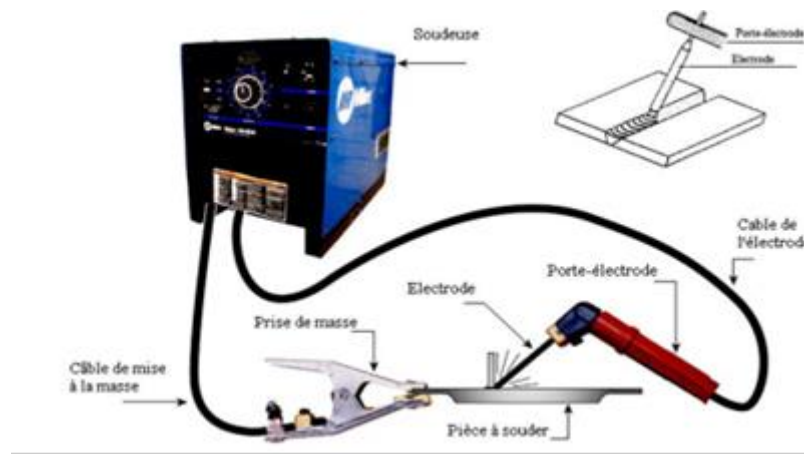


Figure 3 : principe de soudage à l'arc électrique

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

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

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

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

I.2.2.2 - Le soudage avec électrodes enrobées

I.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. L'arc résulte du passage d'un courant électrique intense à travers une atmosphère de gaz ou de vapeur, normalement non-conductrice. Les électrons circulent de la cathode (pôle négatif)

vers l'anode (pôle positif) que constituent l'extrémité de l'électrode et l'impact de l'arc sur la pièce : la polarité est choisie ionisée ne représente qu'une faible part d'énergie calorifique mais irradie surtout des rayonnements électromagnétique (lumière visible, ultra violettes, ...). La tâche anodique et surtout la tâche cathodique, où se présentent les ions positifs, fournissent ensemble l'essentiel de la chaleur. La tâche anodique, bombardée par les électrons est par contre à une température plus haute (3500°C) que celle de la tâche cathodique (2400°C).

Cette situation est permanente en courant continu ; elle s'inverse à chaque alternance en courant alternatif. Le réamorçage s'obtient dans la mesure où l'anode, devenue cathode, reste suffisamment chaude pour devenir émettrice

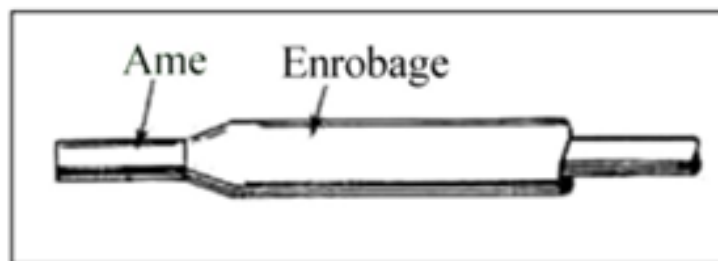


Figure 4 : L'électrode enrobée

I.2.2.2.2 - Les électrodes

Les électrodes de soudages sont constituées par :

- Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant et dont la 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



Figure 4 : Electrodes de soudage.

I.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 format aussi le départ des gaz occlus.

I.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.

I.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

I.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

I.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. 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.

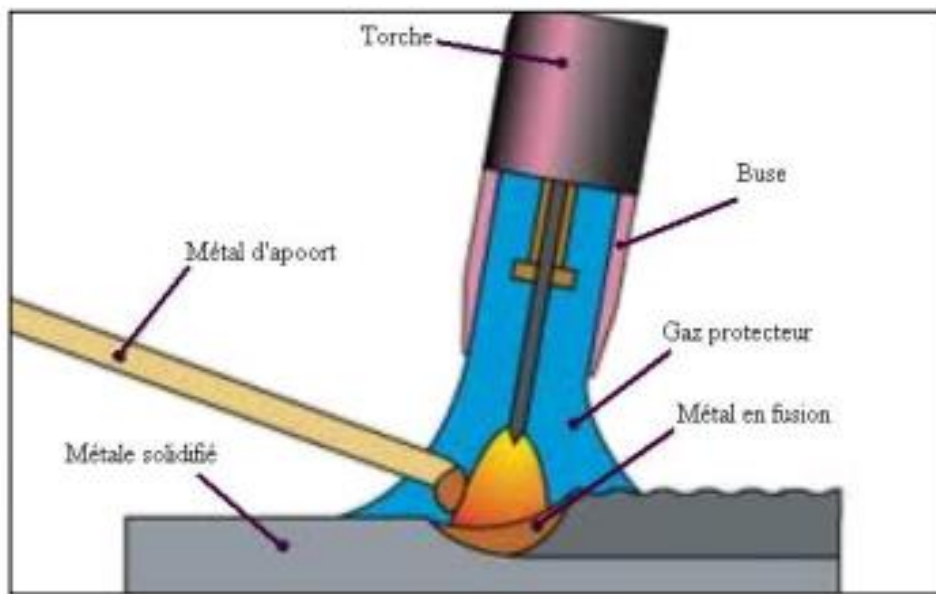


Figure 5 : Principe de soudage TIG

I.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 tous les cas d'application. L'hélium, plus coûteux 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.

I.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.

I.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 légers 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.

I.2.2.4.2 - La composition des fils dépend

- La nature des matériaux à souder
- Des pertes d'éléments pendant le soudage

I.2.3 - Soudage des aciers à faible teneur en carbone

I.2.3.1- 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.

II.2.3.2 - Les différentes zones d'un assemblage soudé

I.2.3.2.1 - 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.

I.2.3.2.2 - 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).

I.2.3.2.3 - 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 modifiés 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. 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

I.2.3.2.4 - 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).

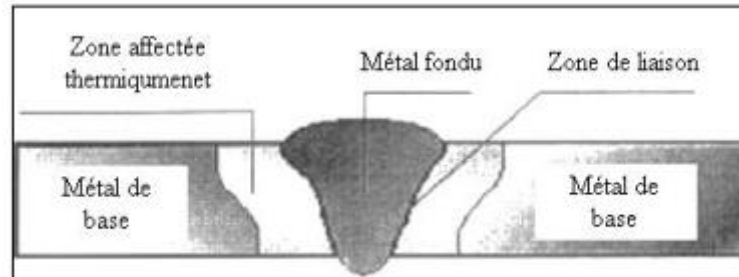


Figure 6 : Les différentes zones d'un assemblage soudé.

I.2.4 - Soudage des pipelines

I.2.4.1 - 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.

I.2.4.2. Le soudage des pipelines

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

I.2.4.2.1 - 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 l'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

❖ 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.

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.

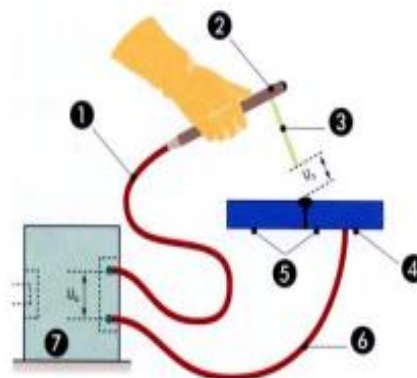


Figure 7 : Principe de soudage manuel.

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 %.

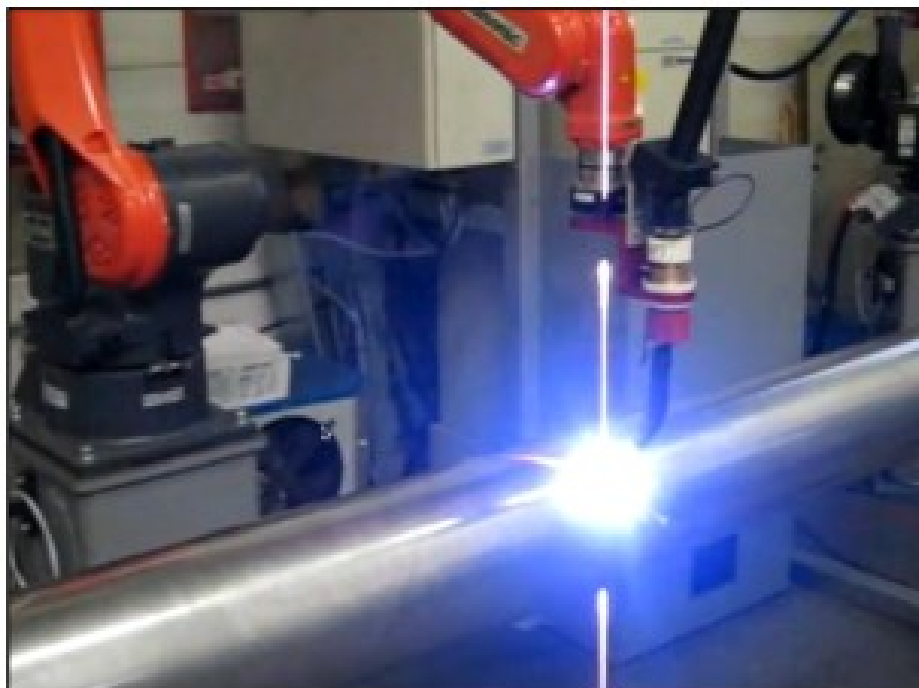


Figure 9 : Soudage des pipelines type automatique.

Chapitre II

les défauts de soudage pipelines

II.1 - Les Fissuration

Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé. L'utilisation d'un métal d'apport incompatible avec le métal de base, un cordon trop petit ou des tensions internes créées par le retrait peuvent être à l'origine des fissures. Le bon choix du métal d'apport, un préchauffage approprié, une bonne préparation des joints et la formation d'un cordon respectant les dimensions exigées peuvent donc prévenir les fissures.

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent :

- Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

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

II.1.1 - Orientation de fissure

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.

II.1.2.1- 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.

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

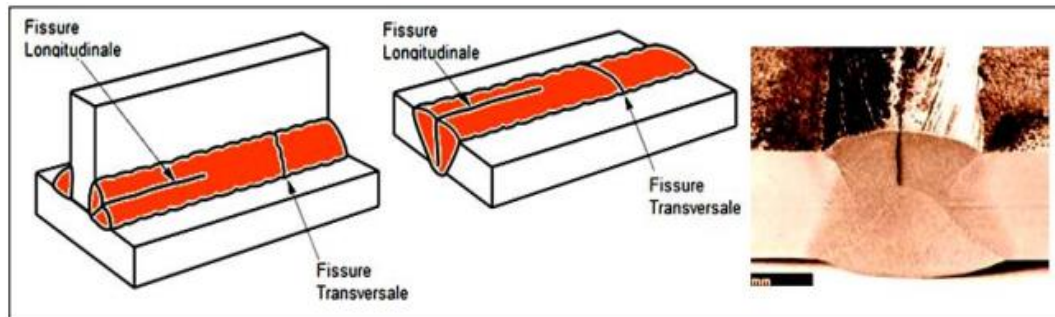


Figure 10 a : La fissure longitudinale.

II.1.2.2- 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.

II.1.3- Types des fissures

- Fissure de carter
- Fissure de finition
- Fissure en Z.A.T
- Arrachement lamellaire

- Fissure longitudinale
- Fissure à la racine
- Fissure en passe de la racine
- Fissure de gorge
- Fissure au raccordement
- Fissure au raccordement
- Fissure transversale
- Fissure sous-cordon
- Fissure en ligne de fusion
- Fissure dans le métal de base

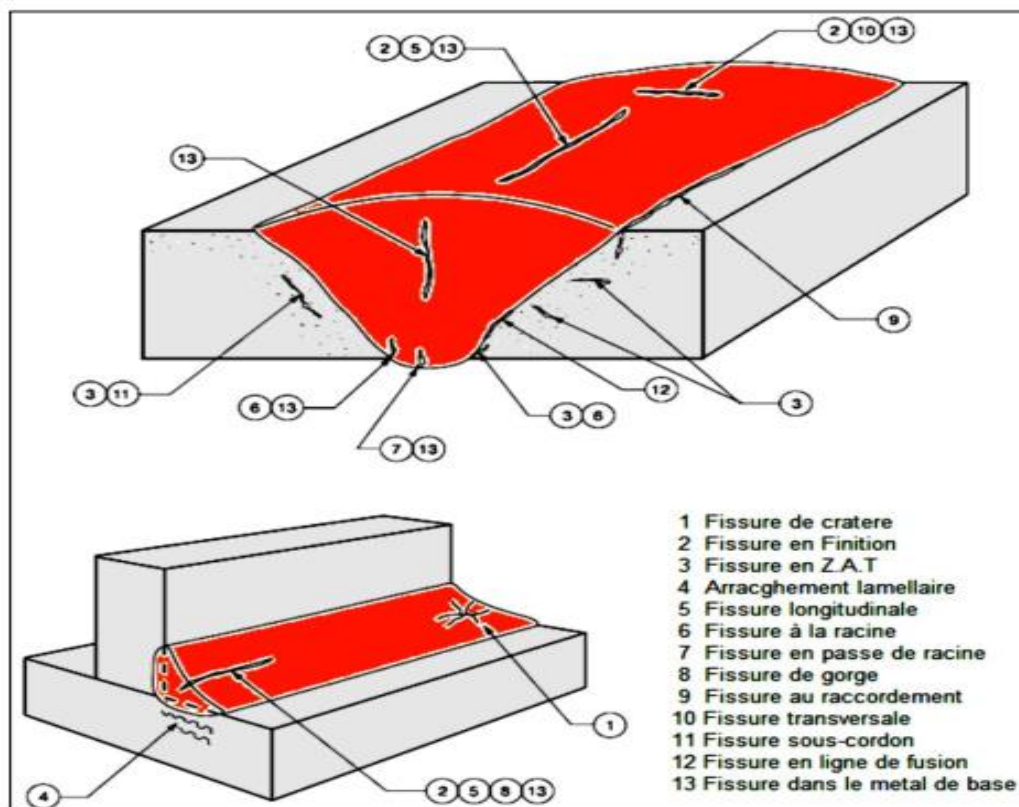


Figure 11 : Les types de fissure.

II.1.3.1- 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.

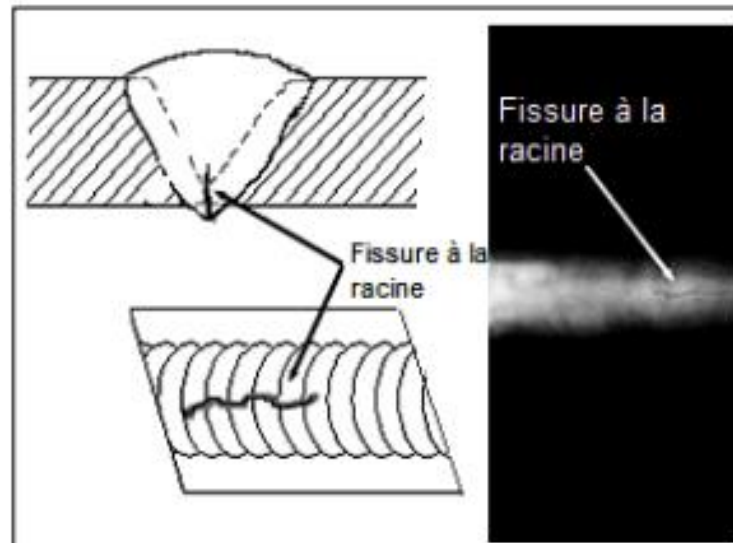


Figure 12 : Fissure de Gorge (Throat Cracks).

II.1.3.2- 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.

II.1.3.3- 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.

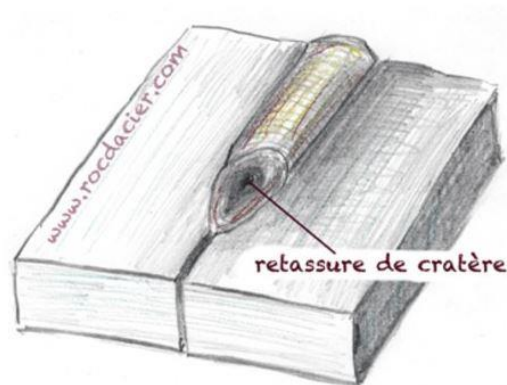


Figure 14 : Fissure de Cratère.

II.1.3.4- 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.

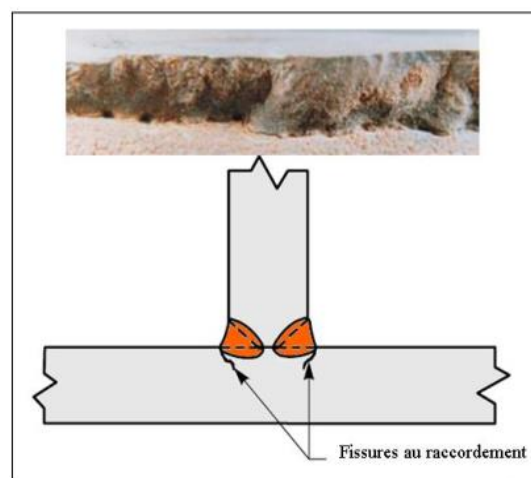


Figure 15 : Fissure au raccordement.

II.1.3.5- 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.

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).

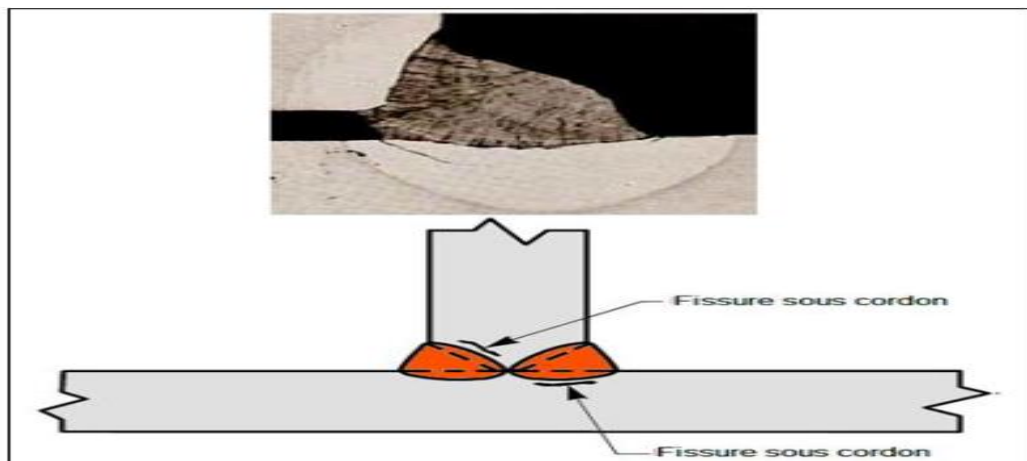


Figure 16: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

II.1.3.6 - Fissure à chaud (ou de solidification)

II.1.3.6.1- 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).

Fissure à chaud ou de solidification

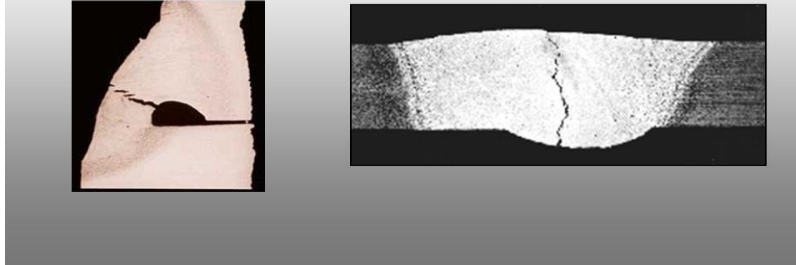


Figure 17: Fissure à chaud (ou de solidification).

II.1.3.6.2- 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.

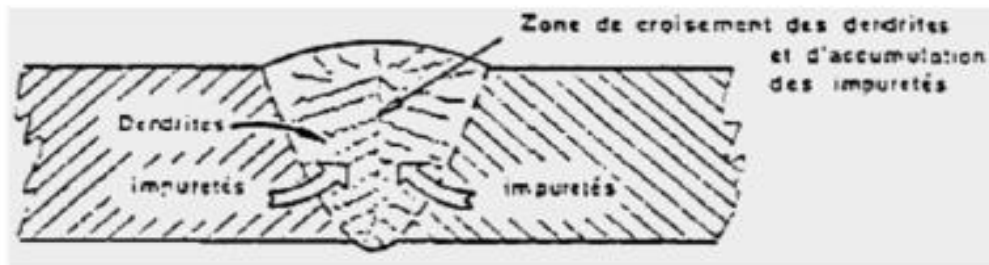


Figure 18 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement.

II.1.3.6.3- Méthodes de détection

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

II.1.3.6.4- 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.

II.1.3.6.5- 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

II.1.3.7- Fissures à froid (fissures d'hydrogène)

II.1.3.7.1- 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).

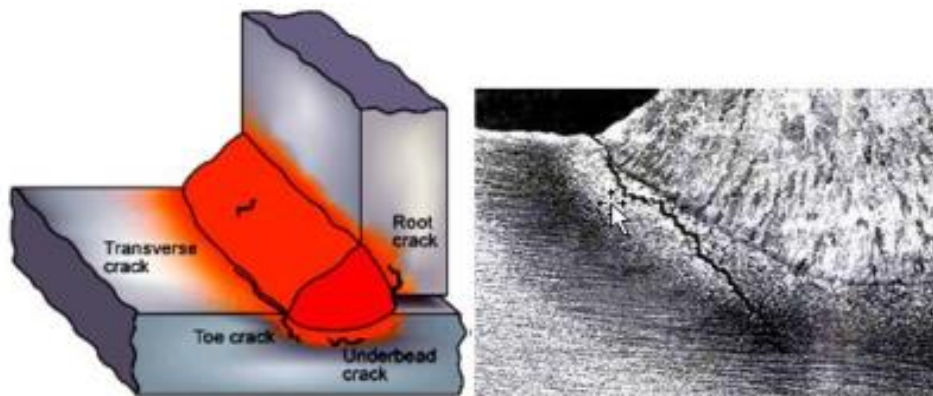


Figure 19 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

II.1.3.7.2- 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.

II.1.3.7.3- Méthodes de détection

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

II.1.3.7.4- Méthode de réparation

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

II.1.3.7.5- 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.

II.1.3.8- Fissuration lamellaire (ou l'arrachement lamellaire)

II.1.3.8.1- 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 décrivons ici, les traits caractéristiques, les principales causes, ainsi que les bonnes pratiques pour minimiser le risque d'arrachement lamellaire.

II.1.3.8.2- 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.

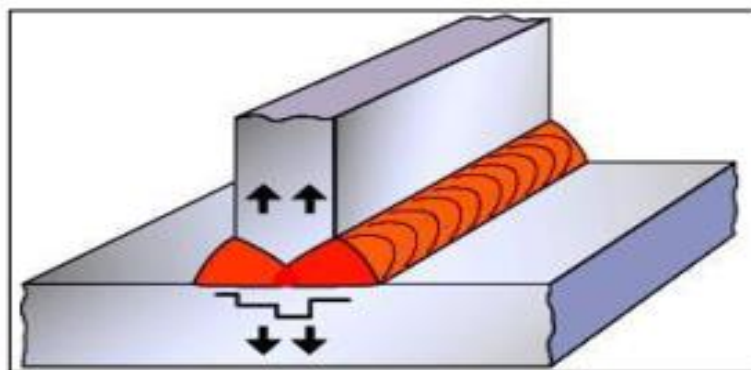


Figure 20: Arrachement lamellaire dans un joint en T.

II.1.3.8.3- 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)

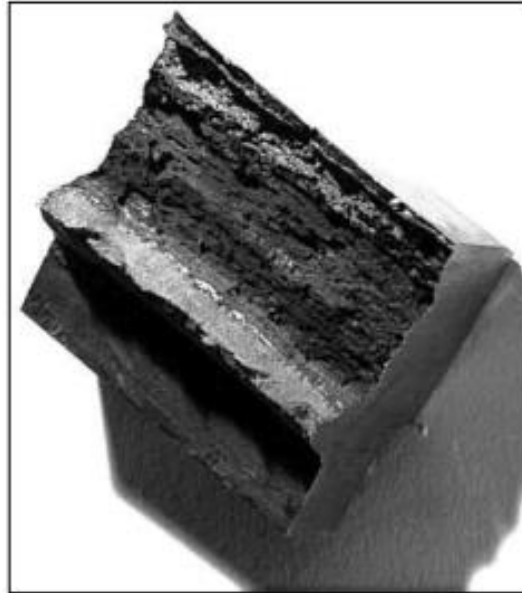


Figure 21 : Apparence de la face de rupture d'un arrachement lamellaire.

II.1.3.8.4- 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.

II.1.3.8.5- 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.

➤ 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.

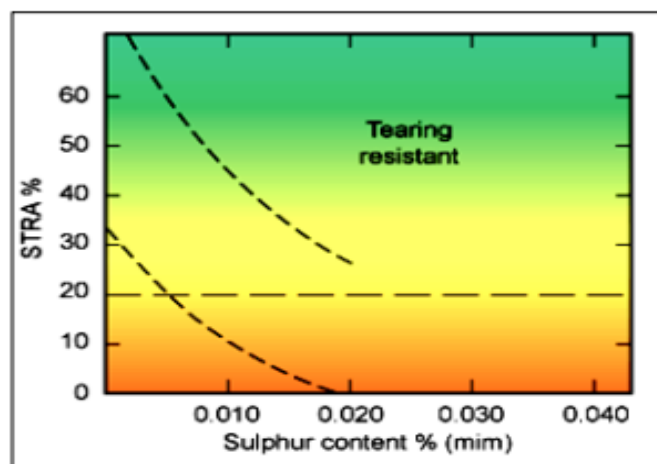


Figure 22 : Relation entre STRA et concentration en soufre pour tôle de 12.5 à 50 mm d'épaisseur.

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.

Les structures cruciformes dans lesquelles 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 soudures bout-about en T de pleine pénétration, utiliser, dans la mesure du possible, deux soudures d'angle.

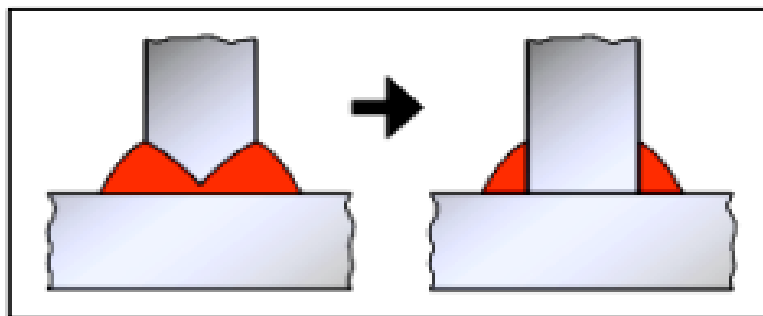


Figure 23 a : Configuration du Joint la soudure à deux angles

(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.

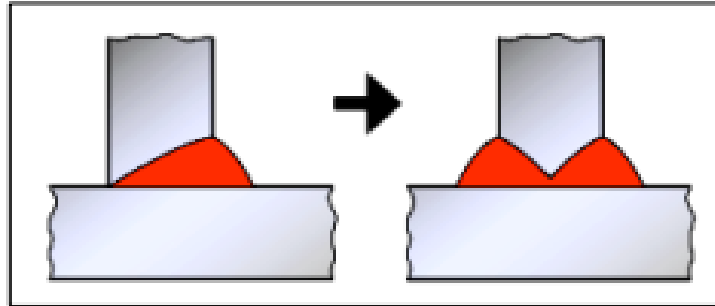


Figure 23b : Configuration du Joint, les soudures à deux faces sont moins susceptibles.

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

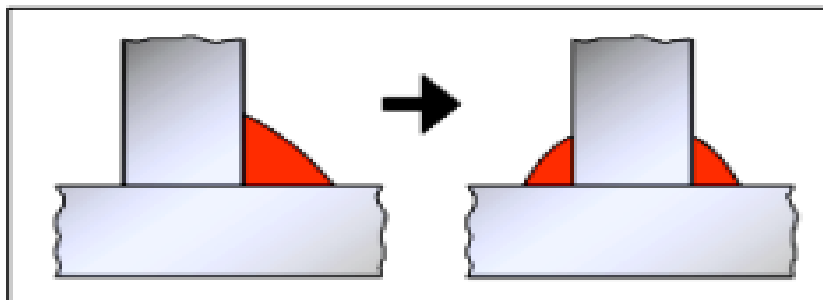


Figure 23c : Configuration du Joint, plus petites soudures d'angle à deux faces.

(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.

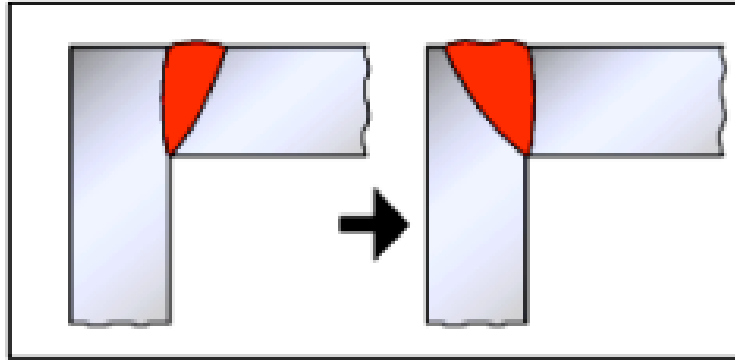


Figure 23d : Configuration du Joint, la ligne de fusion soit plus perpendiculaire à la surface de la tôle susceptible.

➤ Dimensions de la soudure

L'arrachement lamellaire a plus de chance de se produire dans les soudures épaisses quand le coté 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 :

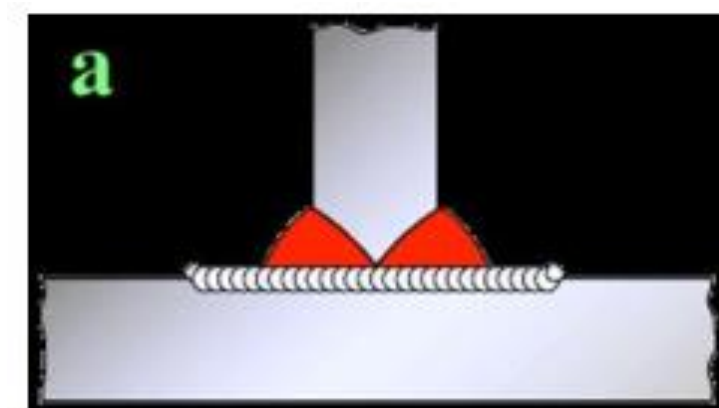


Figure 24a : Dépôt général sur la surface de la tôle susceptible.

b) Beurrage in situ :

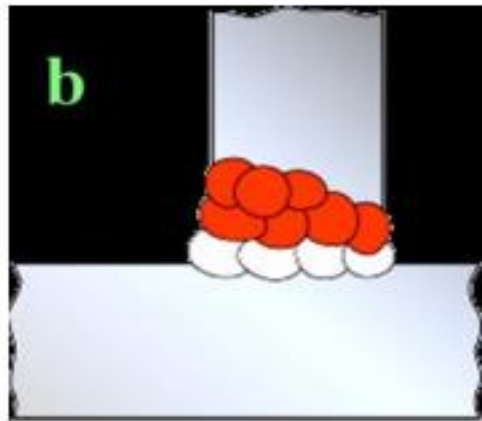


Figure 24b : Beurrage in-situ

➤ 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.

II.1.3.8.6- 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.

II.1.3.9- Fissures de réchauffages (Reheat cracking)

II.1.3.9.1- 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).

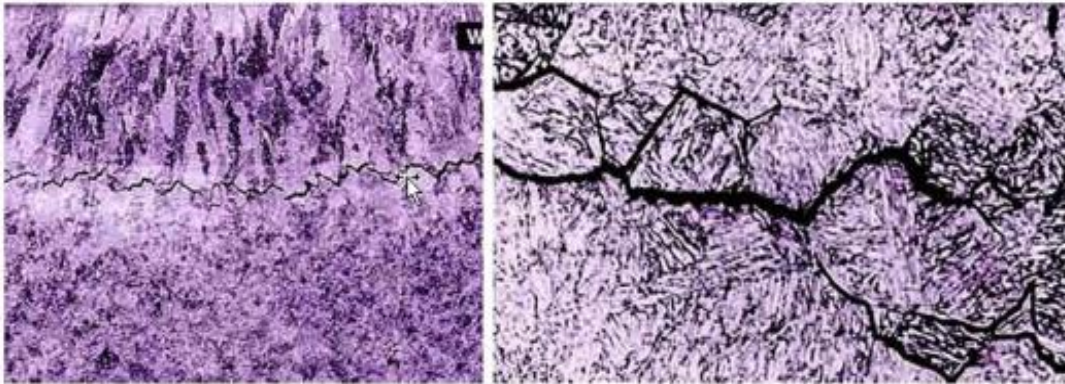


Figure 25 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).

II.1.3.9.2- 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.

II.1.3.9.3- 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).

II.1.3.9.4- Mesures préventives

- Elimination de toute entaille avant traitement thermique.
- Traitement de détente entre les différentes passes.

- Choix du matériau-Procédure et technique de soudage.

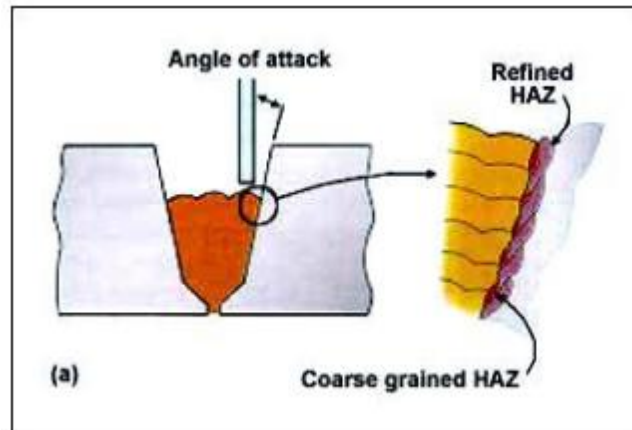


Figure 26a : Soudage en position à plat – haut degré de raffinement de la ZAT.

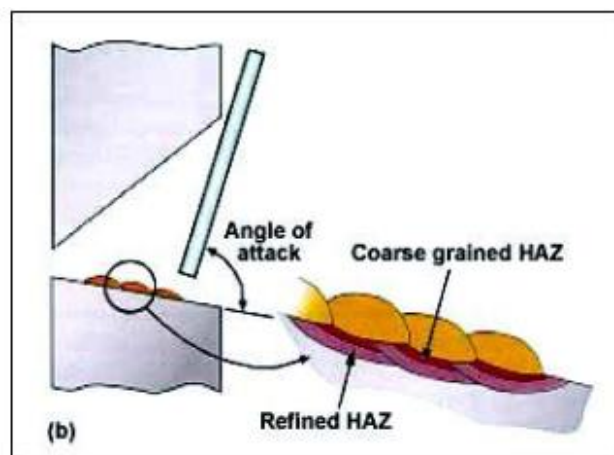


Figure 26b : Soudage en position verticale ou horizontale – faible degré de raffinement de la ZAT.

II.2- Manque de fusion

II.2.1- 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.

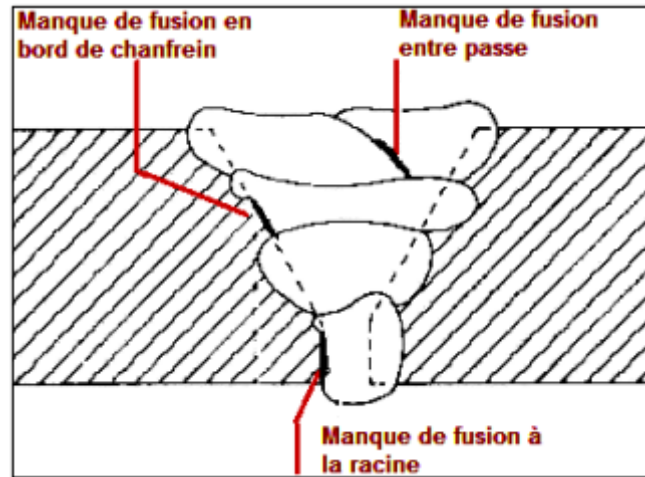


Figure 27 : Localisations possibles des manques de fusion.

II.2.2- Manque de fusion dans le flanc de la soudure

II.2.2.1- Définition

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

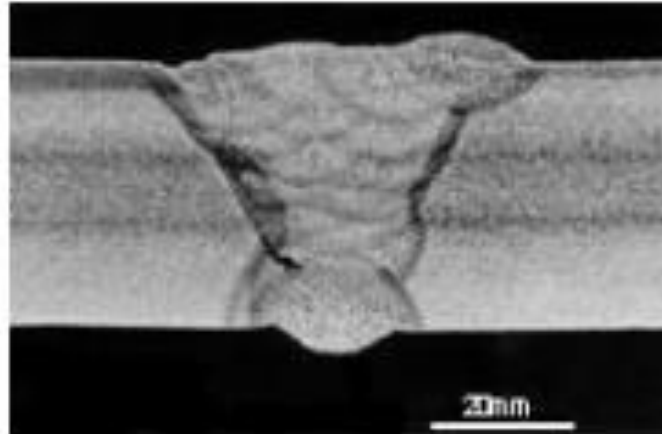


Figure 28 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

II.2.2.2- Causes possibles

- Energie de l'arc trop faible.
- Vitesse de soudage trop élevée.

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

II.2.2.3- Méthodes de détection

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

II.2.2.4- Méthodes de réparation

- Eliminer la partie défectueuse et ressouder.

II.2.2.5- 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.

II.2.3- Manque de fusion entre passes

II.2.3.1- Définition

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

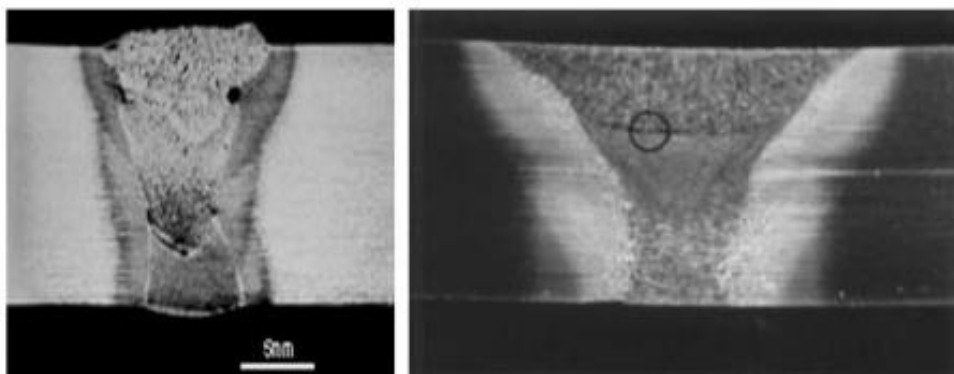


Figure 29 : Manque de fusion entre passes.

II.2.3.2- Causes possibles

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

II.2.3.3- Méthodes de détection

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

II.2.3.4- Méthodes de réparation

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

II.2.3.5- Mesures préventives

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

II.2.4- Manque de fusion à la racine de la soudure**II.2.4.1- 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).

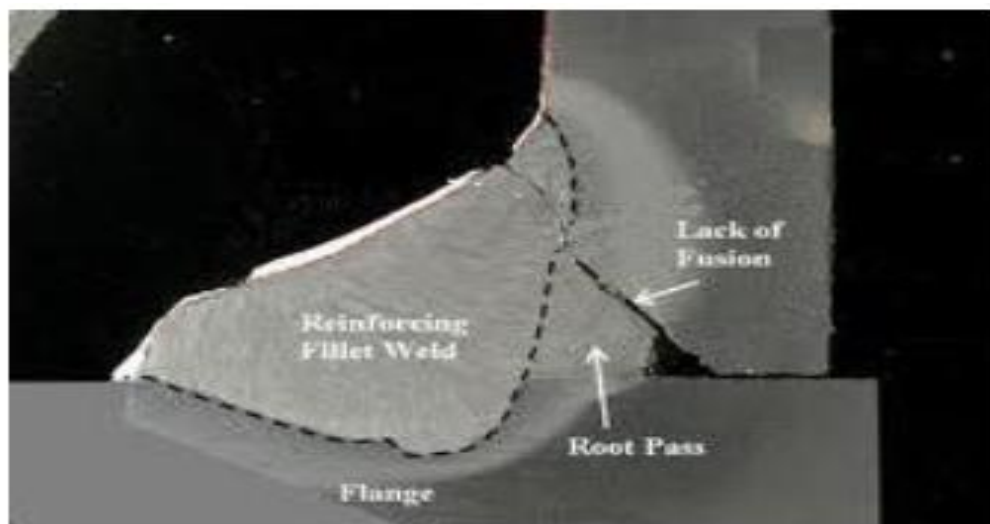


Figure 30 : Manque de fusion à la racine de la soudure :

II.2.4.2- 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.

II.2.4.3- 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.

II.2.4.4- 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.

II.2.4.5- Mesures préventives

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

II.2.5- Manque de pénétration**II.2.5 - Localisations possibles des manques de pénétration**

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

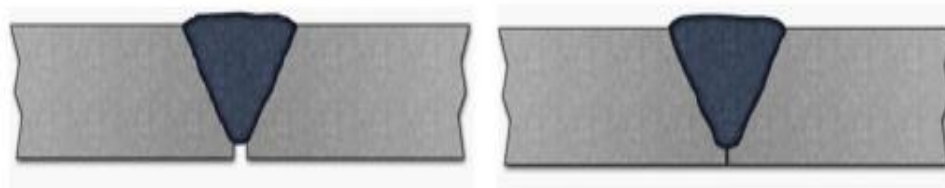
II.2.5.1- A la racine de la soudure (soudure en « V »)

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

II.2.5.1.2- 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.

II.2.6 - Manque de pénétration à la racine

II.2.6.1- Définition

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

II.2.6.2- Causes possibles

- Ecartement trop faible.
- Méplat trop grand.
- Soudage vertical descendant tandis que vertical montant spécifié pour obtenir une pénétration complète.
- Apport calorifique trop faible.
- Vitesse de soudage trop grand.
- Diamètre d'électrode fautif dans le soudage électrique manuel.
- Inductance trop importante dans le soudage MAG.
- Laitier qui coule devant le bain de soudage.

II.2.6.3- Méthodes de détection

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

II.2.6.4- Méthodes de réparation

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

II.2.6.5- Mesures préventives

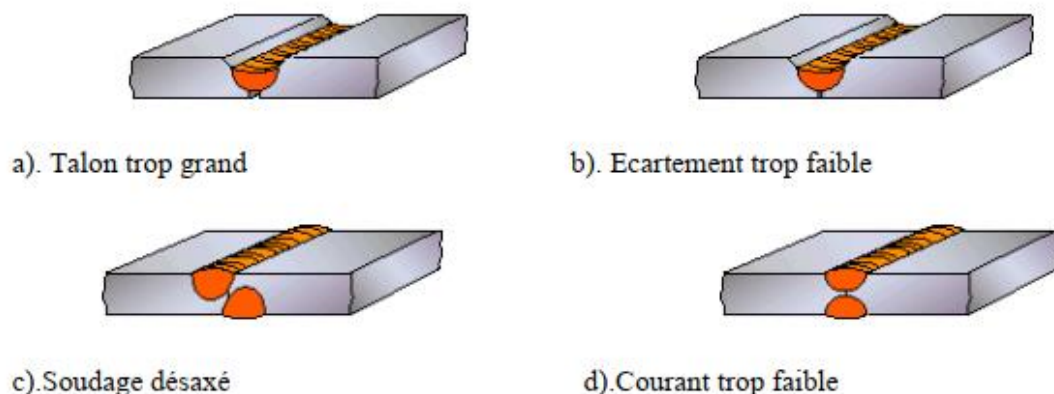


Figure 32 abc & d : Manque de pénétration dans la soudure

- 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.

II.2.7- Manque de pénétration dans la soudure

II.2.7.1- Définition

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

II.2.7.2 Causes possibles

- Idem Manque de pénétration à la racine.

II.2.7.3- Méthodes de détection

- Examen par ultrasons ou radiographie.

II.2.7.4- 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.)

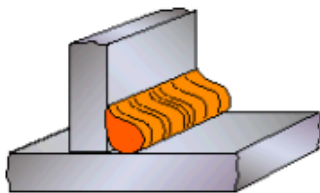


Figure33a : Apport (chaleur) arc trop faible

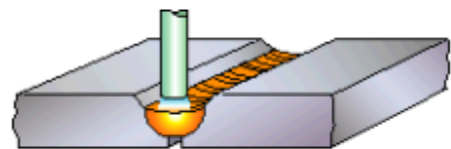


Figure33b : Diamètre électrode trop grand

II.3- Inclusion gazeuses

II.3.1- Différentes formes d'inclusions gazeuses ou porosités

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

- a) Porosités vermiculaires.
- b) Porosités de reprise.
- c) Porosités uniformes

II.3.2- Porosités vermiculaires

II.3.2.1. 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.).

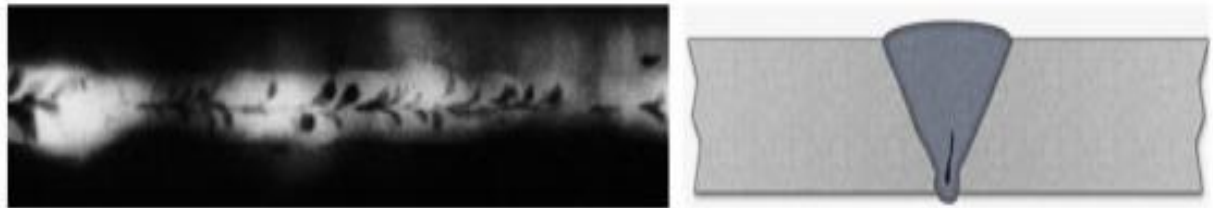


Figure 34a : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.

II.3.2.2- Causes possibles

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

II.3.2.3- Méthodes de détection

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

II.3.2.4- Méthodes de réparation

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

II.3.2.5- 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
- Éviter des préparations de soudage qui causent des cavités.

II.3.3- Porosités de reprise

II.3.3.1- 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).

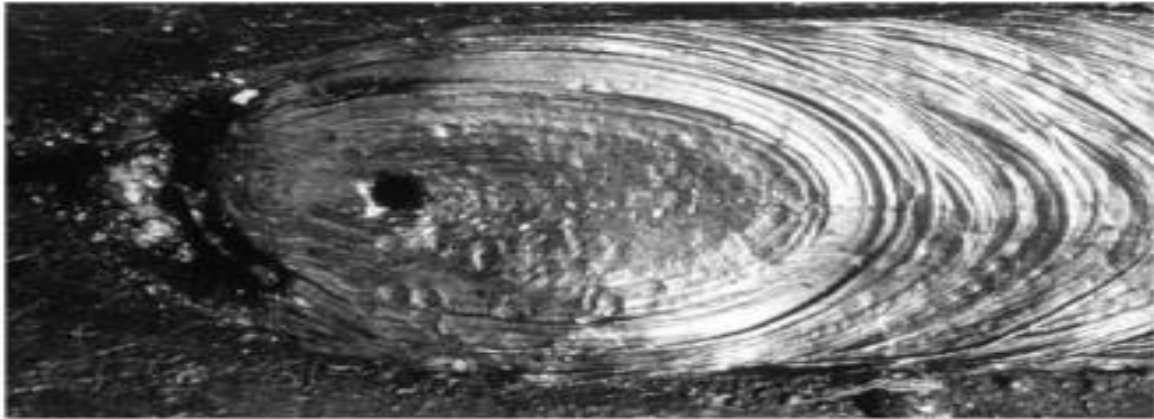


Figure 34b : Inclusions gazeuses porosités de reprise.

II.3.3.2- 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

II.3.3.3- Méthodes de détection

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

II.3.3.4 Méthodes de réparation

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

II.3.3.5- 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.

II.3.4.1- Porosités uniformes

II.3.4.1- Définition

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



Figure 34c : Inclusions gazeuses porosités uniformes.

II.3.4.2- Causes possibles

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

II.3.4.3- Méthodes de détection

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

II.3.4.4- Méthodes de réparation

- Réparation de toute la soudure.

II.3.4.5- 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.

II.3.5- Inclusion solides

II.3.5.1- Différents types d'inclusions solides

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

- a) Laitier.
- b) Tungstène.
- c) Cuivre.

II.3.5.2- Inclusions de laitier

II.3.5.2.1- 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.

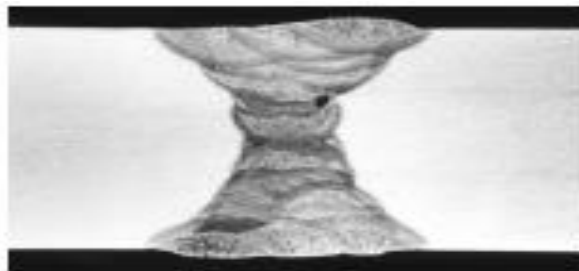


Figure 35a : Inclusions de laitier.

II.3.5.2.2- 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.

II.3.5.2.3- Méthodes de détection

- Ultrasons et radiographie.

II.3.5.2.4- Méthodes de réparation

- Éliminer la zone défectueuse par meulage et réparer.

II.3.5.2.5- Mesures préventives

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

II.3.6 - Inclusions de tungstène

II.3.6.1- Définition

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

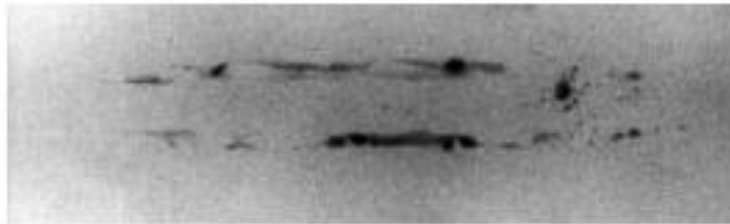


Figure 35b : Inclusions de tungstène.

II.3.6.2- Causes possibles

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

II.3.6.3- Méthodes de détection

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

II.3.6.4- Méthodes de réparation

-Eliminer le défaut par meulage et ressouder.

II.3.6.5- 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.

II.3.7- Inclusions de cuivre

II.3.7.1- Définition

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

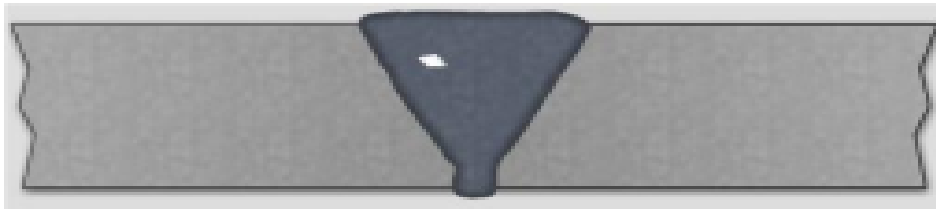


Figure 35c : Inclusions de cuivre.

II.3.7.2- Causes possibles

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

II.3.7.3- 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.

II.3.7.4- 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.

II.3.7.5- Mesures préventives

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

II.3.8- Excès de matière

II.3.8.1- 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.).

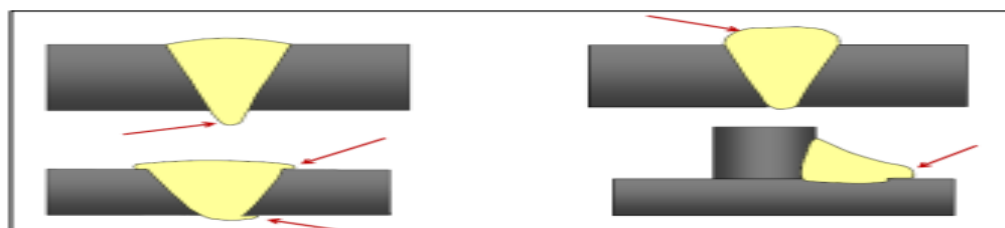


Figure36 : Excès de matière.

II.3.9- Excès de pénétration

II.3.9.1- Définition

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

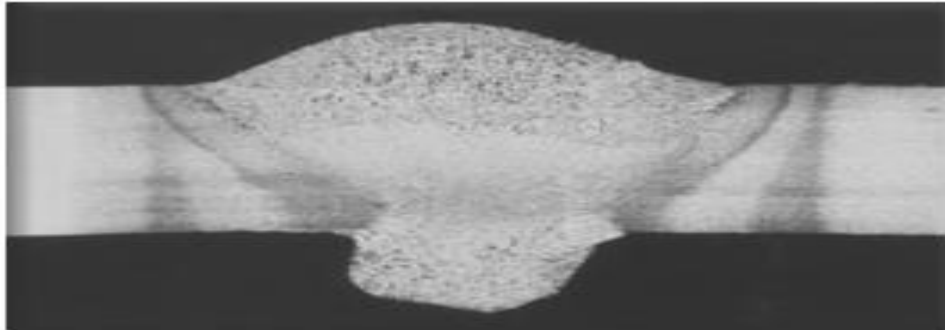


Figure37 : Excès de pénétration.

II.3.6.2- 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).

II.3.9.3- Méthodes de détection

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

II.3.9.4- Méthodes de réparation

- Éliminer l'excès par voie mécanique.

II.3.9.5- Mesures préventives

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

II.3.10 - Surépaisseur

II.3.10.1- 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.).

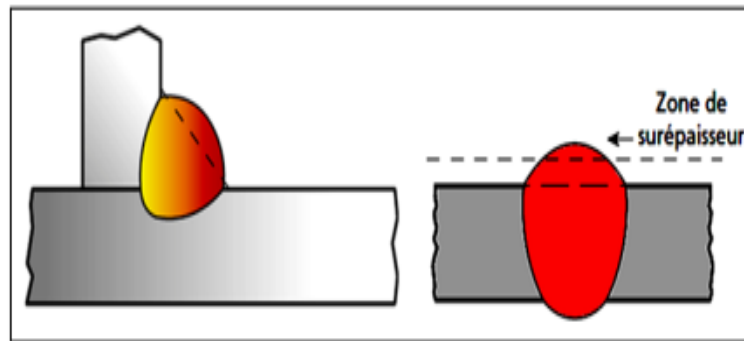


Figure38 : Convexité excessive & Surépaisseur excessive.

II.3.10.2- Causes possibles

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

II.3.10.3- Méthodes de détection

- Examen visuel avec un calibre de soudage.

II.3.10.4- Méthodes de réparation

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

II.3.10.5- 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.

II.3.11- Recouvrements non fusionnés (Débordements)

II.3.11.1- Définition

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

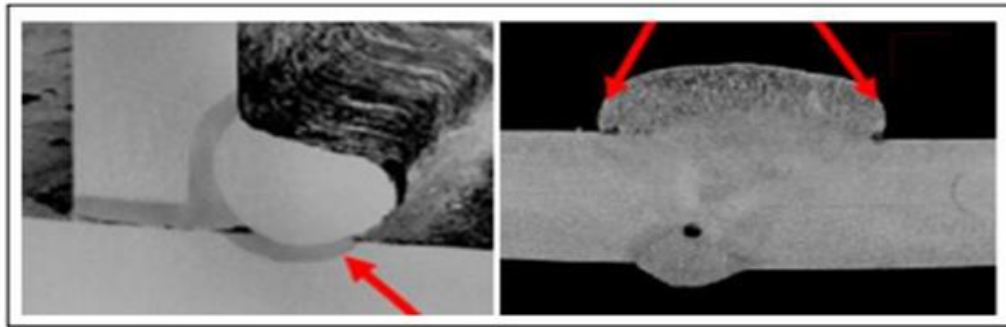


Figure39 : Recouvrements non fusionnés (Débordements).

II.3.11.2- Causes possibles

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

II.3.11.3- Méthodes de détection

- Examen visuel complété d'un examen par ressuage,

II.3.11.4- Méthodes de réparation

- Couper jusqu'au métal sain et éventuellement ressouder.

II.3.11.5- Mesures préventives

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

II.4- Dénivellement

II.4.1- Dénivellement

II.4.1.1- 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.)

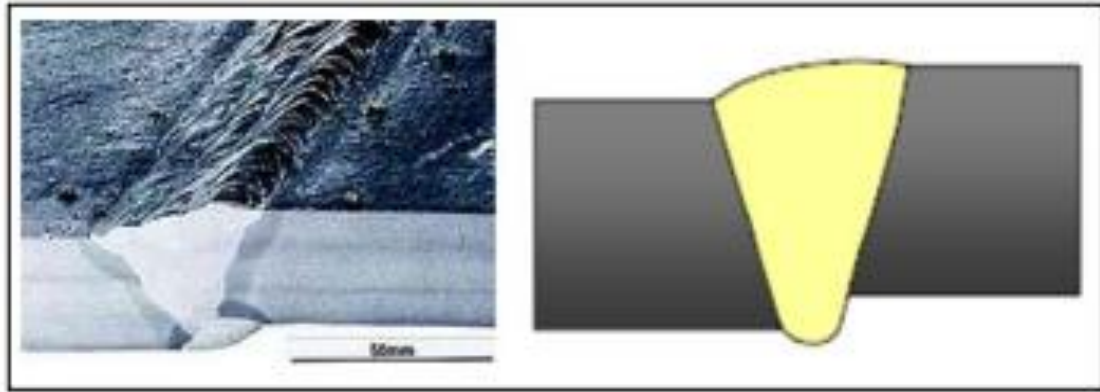


Figure 40 : Dénivellement.

II.4.1.2- Causes possibles

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

II.4.1.3- Méthodes de détection

Inspection visuelle avec calibre de soudage avant soudage.

II.4.1.4- Méthodes de réparation

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

II.4.1.5- Mesures préventives

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

II.5- Cratère

II.5.1- Cratère

II.5.1.1- Définition

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

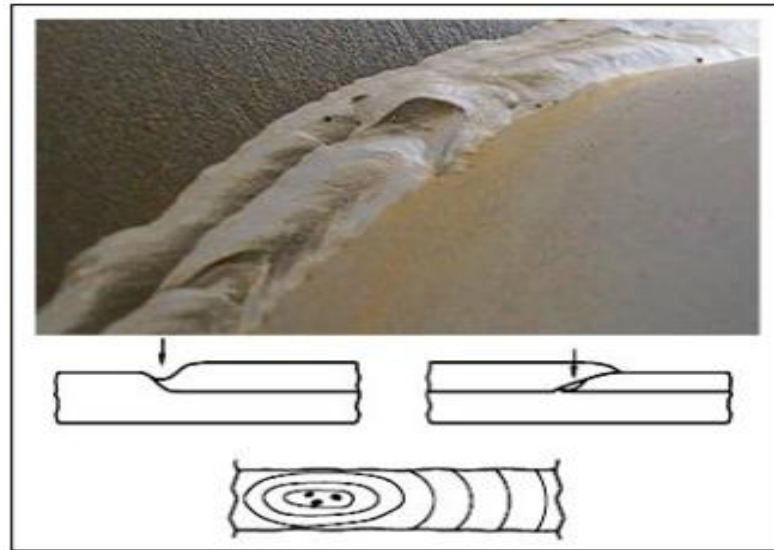


Figure 41 : Cratère.

II.5.1.2- 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).

II.5.1.3- Méthodes de détection

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

II.5.1.4- Méthodes de réparation

-Meuler et ressouder.

II.5.1.5- 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.

II.6- Défauts de surface

II.6.1- Morsures/Caniveaux

II.6.1.1- Définition

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

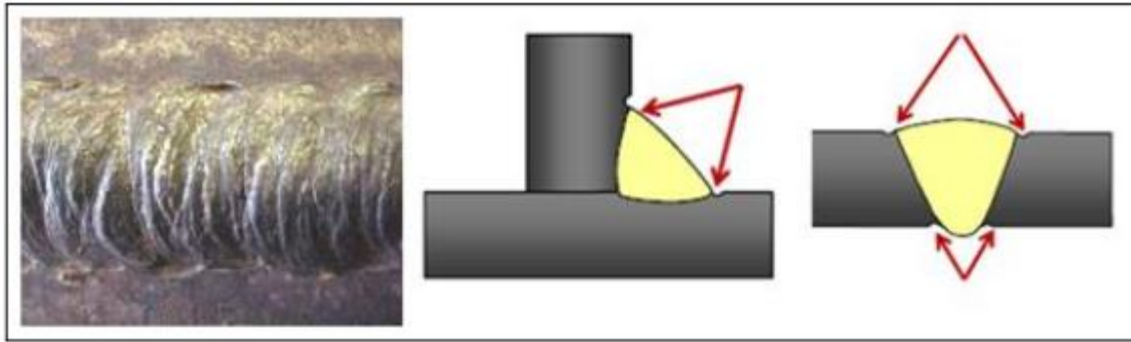


Figure 42 : Défauts de surface (Morsures/Caniveaux).

II.6.2.2- causes possibles

La fusion du bord supérieur une soudure d'angle ou d'une soudure bout-à-bout par une intensité trop forte.

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

II.6.1.3- Méthodes de détection

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

II.6.1.4- Méthodes de réparation

- Réparation par soudage éventuellement après meulage.

II.6.1.5- 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.

II.6.2- Effondrement à la racine**II.6.2.1- 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.).

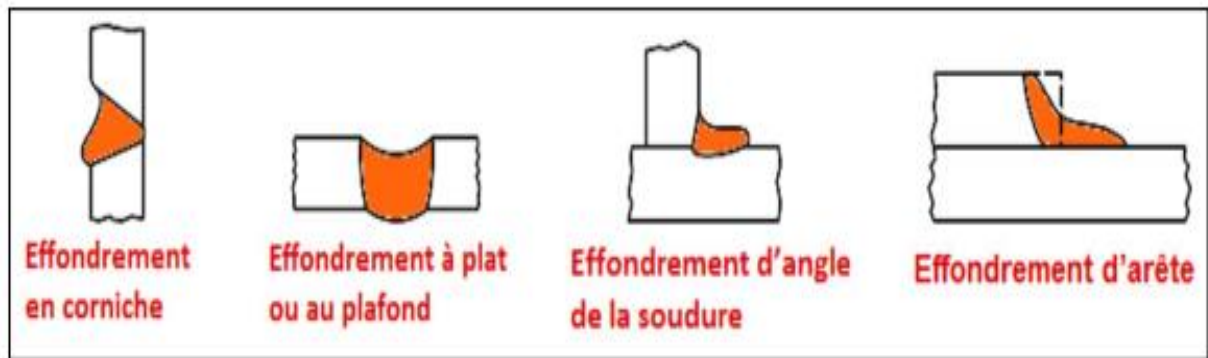


Figure 43a : Effondrement à la racine.

II.6.2.2- Causes possibles

- Vitesse de soudage trop lente
- Chaleur trop élevée.

II.6.2.3- Méthodes de détection

- Inspection visuelle.

II.6.2.4- Méthodes de réparation

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

II.6.2.5- 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.)

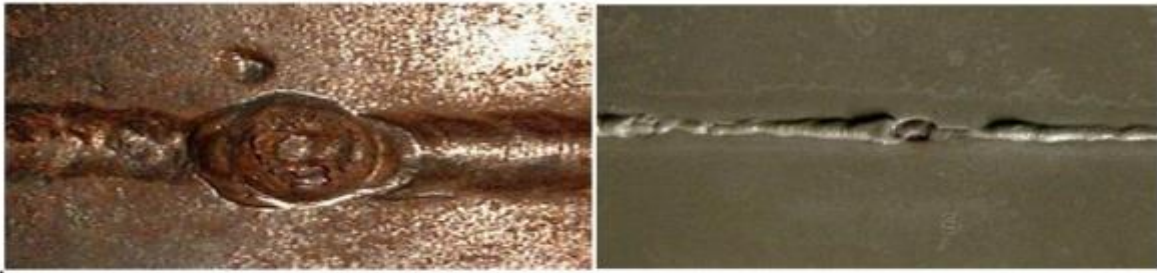


Figure 43b : Effondrement.

II.6.3- Amorces d'arc

II.6.3.1- 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.

II.6.3.2. Causes possibles

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

II.6.3.3- Méthodes de détection

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

II.6.3.4- Méthodes de réparation

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

II.6.3.5 Mesures préventives

-Améliorer l'accessibilité.

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

II.6.4- Projections sur le métal de base**II.6.4.1- 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.

II.6.4.2- 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

II.6.4.3- Méthodes de détection

- Examen visuel.

II.6.4.4- Méthodes de réparation

- Léger meulage.

II.6.4.5- 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.

II.6.5- 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.

II.7- Métal de base :(Inspection a défauts)**II.7.1- 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.

II.7.2- Inspection de tubes**Condition**

(Corrosion, Dommage mécanique, Epaisseur, Ovalisation, Doublures & Soudure) (Fig.47.).

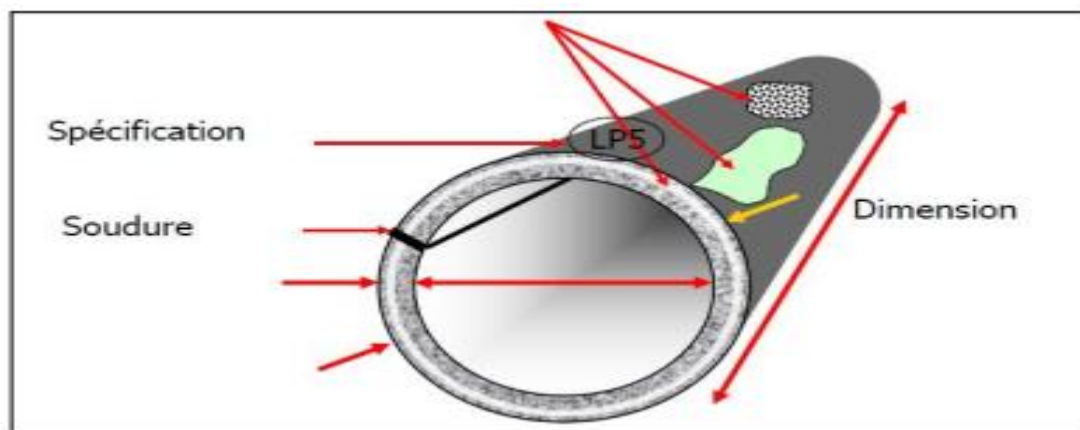


Figure 47 : Métal de base (Inspection a défauts).

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

II.7.3- Inspection de tôles**Condition**

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

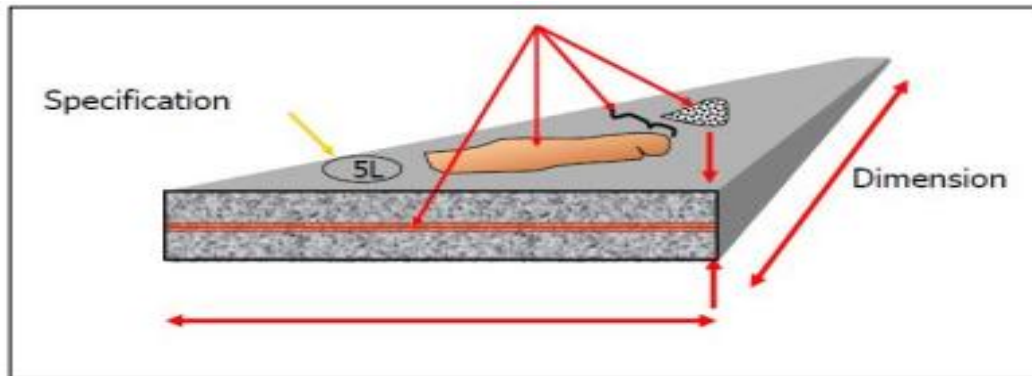


Figure 48 : Inspection de tôles.

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

II.7.4- Inspection de tôles

Condition

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

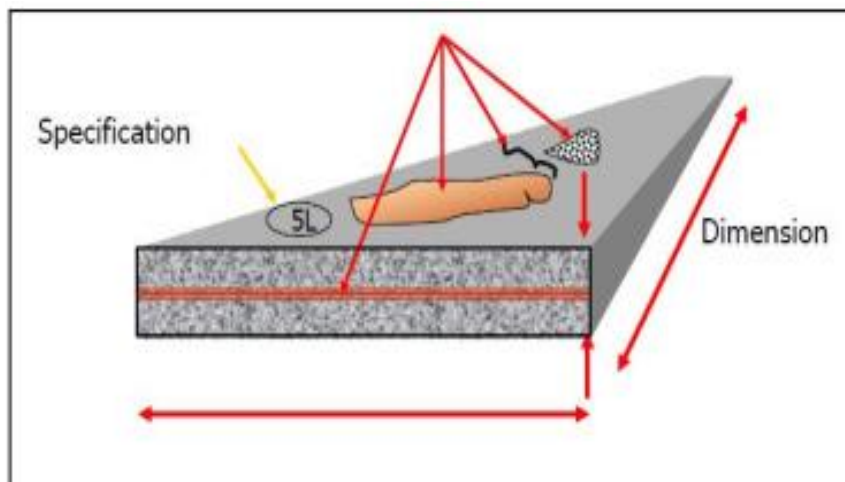


Figure 48 : Inspection de tôles.

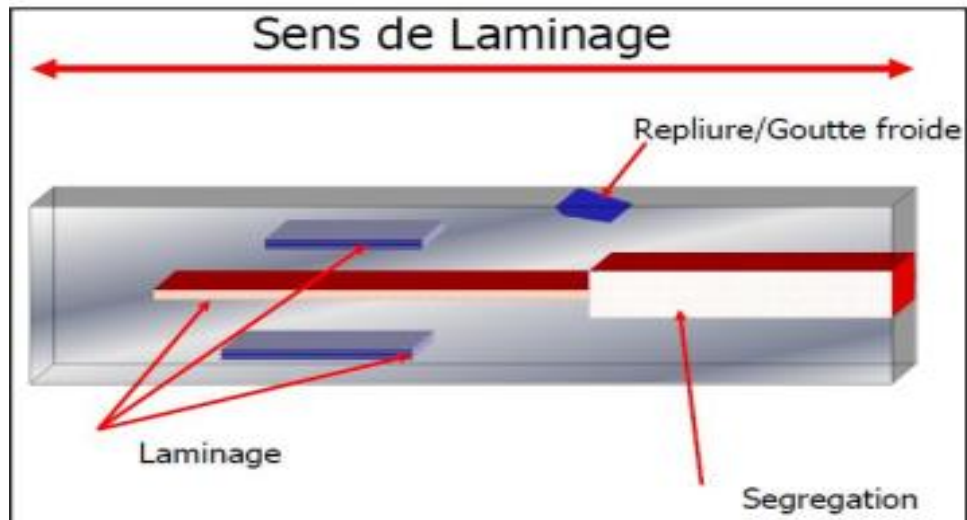
II.7.5- Défauts de laminage

Figure 49 : Défauts de laminage.

II.7.5- Imperfections du métal de base**II.7.5.1- 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.

II.7.5.2- 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.

II.7.5.3- Pliure

Sont causées durant le laminage lorsque le métal de chevauchement ne fusionne pas avec le matériau de base (Fig.50.).

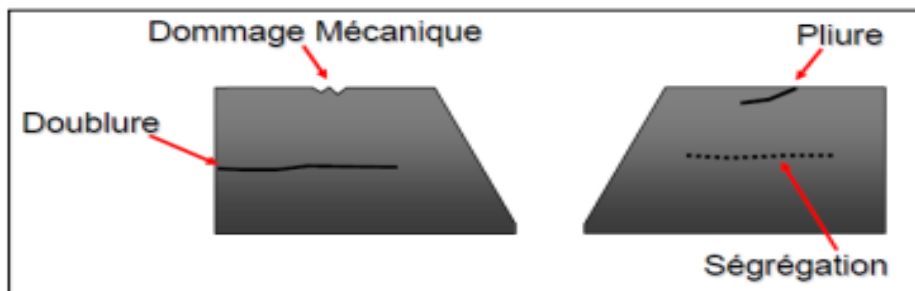


Figure 50 : Imperfections du métal de base.

II.7.6- Repliare

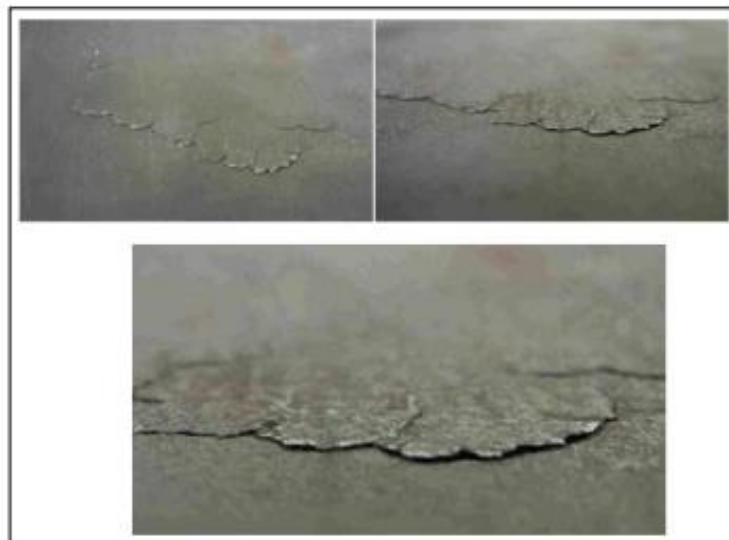


Figure 51 : Repliare.

➤ 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

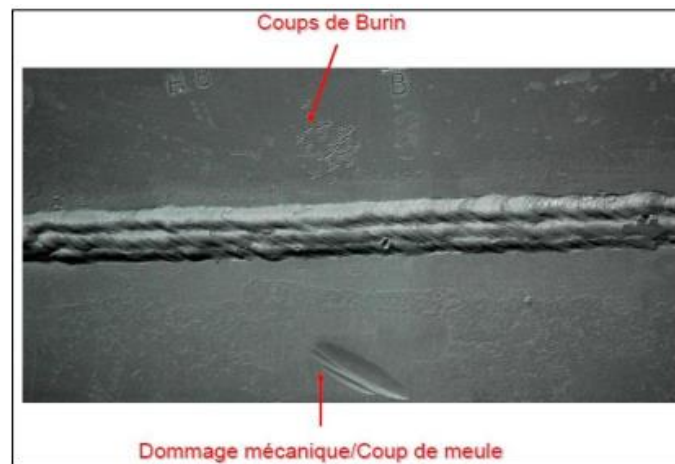
➤ Dommages Mécaniques

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

les défauts de géométrie du cordon, les défauts de pénétration, les soufflures, les inclusions, les caniveaux, les retassures, les projections et les défauts de fusion.

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

Chapitre III

Résulta et interprétions

III.1 - Introduction

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

III.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 :

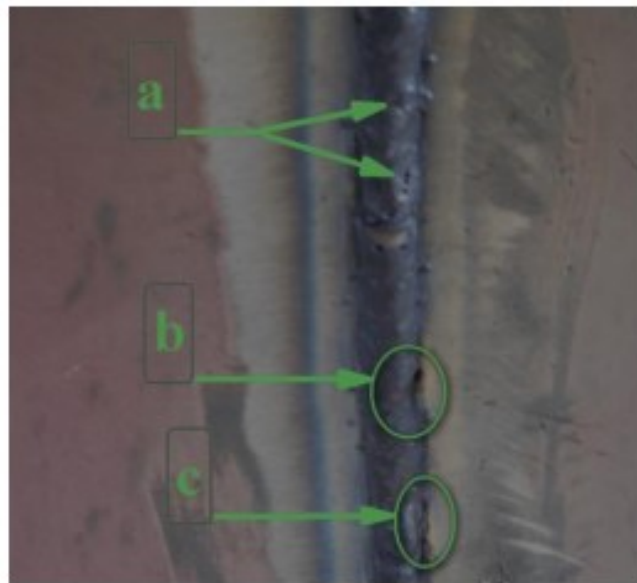
- a) Cratère : ce défaut apparait lorsque dépression de retrait à la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.
- b) Fissure : ce défaut apparait lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.
- c) Amorces d'arc : ce défaut apparait lorsque la pince d'électrode ou la masse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



Figure 54 : 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 :

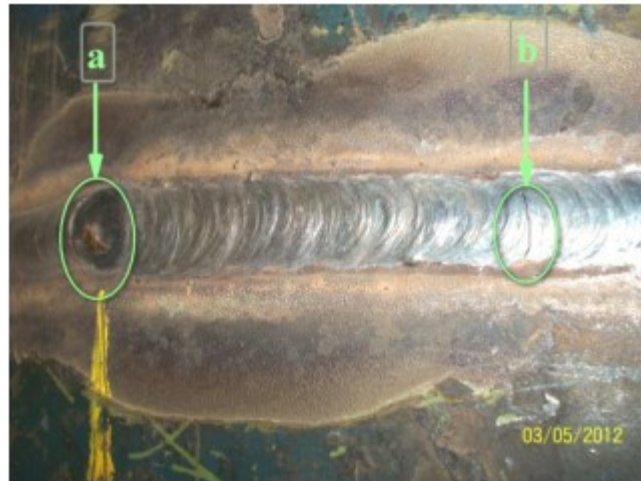
- a) Les inclusions gazeuses : ce défaut apparait lorsque cavités allongées formées par des gaz enfermés pendant la solidification du cordon.
- b) Morsures/Caniveaux : ce défaut apparait lorsque creux irrégulier à la surface du cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.
- c) Morsures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



La figure 55 : 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 apparait lorsque dépression de retrait à la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.
- b) Fissure : ce défaut apparait lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes.



La figure 56 : Cordon de soudure avec les défauts (cratère et Fissure).

Les défauts observés dans la figure 93 sont :

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

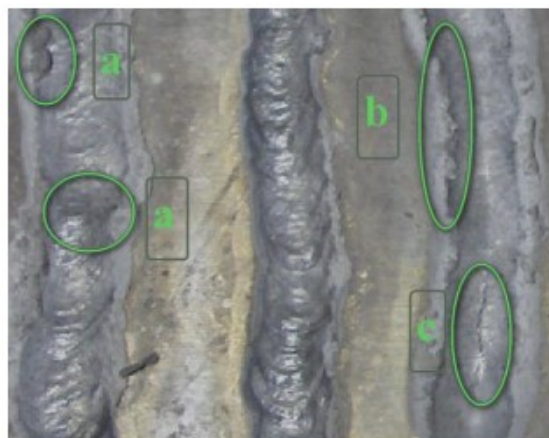


Figure 57 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusions, morsures/caniveaux, et Fissure).

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

a) Fissure : ce défaut apparait lorsque le refroidissement rapide et les forces decontraintes.

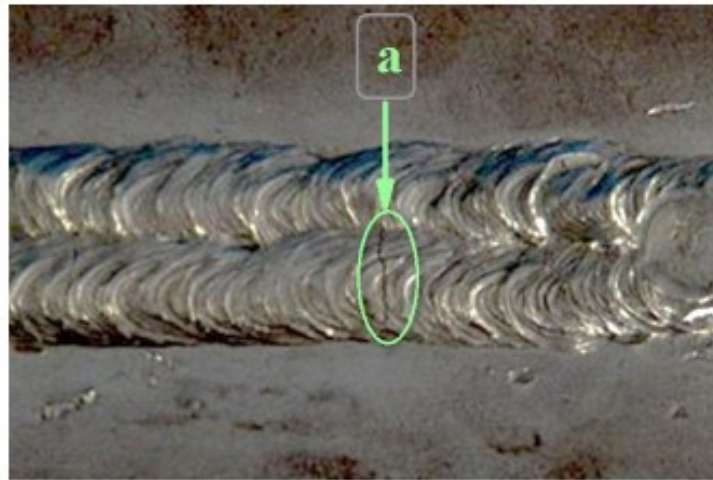


Figure 58 : Cordon de soudure avec les défauts (fissure).

a) Fissure : ce défaut apparait lorsque le refroidissement rapide et les forces decontraintes.

b) Cratère : ce défaut apparait lorsque dépression de retrait a la fin d'une passeoù la source de chaleur a été enlevée.

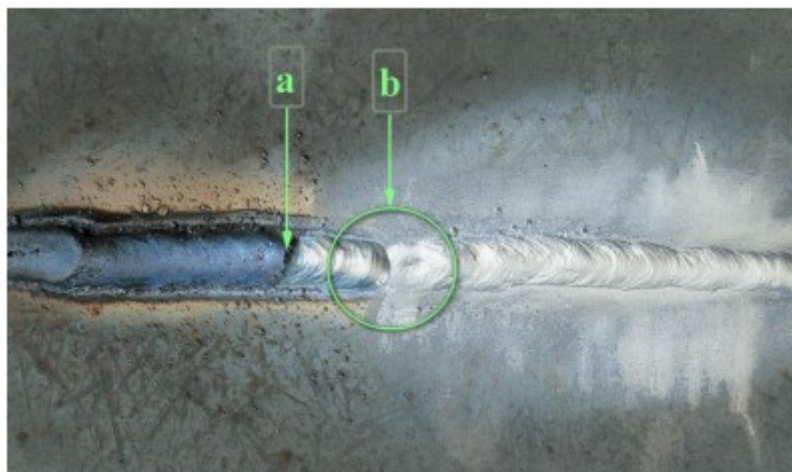


Figure 59 : Cordon de soudure avec les défauts (inclusion et cratère).

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



Figure 60 : 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

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

L'image radiographique révèle un changement abrupt dans la densité du film sur toute la largeur de l'image de la soudure et de façon longitudinale (Fig.97.)

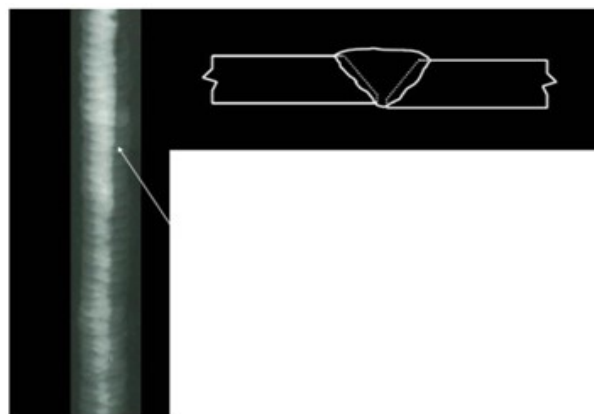


Figure 61 : L'image radiographique pièces à souder mal alignées (Offset ou Hilo).

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

L'image radiographique révèle un changement abrupte dans la densité du film dans le centre de la largeur du cordon de soudure, on remarque de façon longitudinale une zone de densité plus sombre (Fig.98.).

(Le long de l'arête, il y a un changement de densité.)

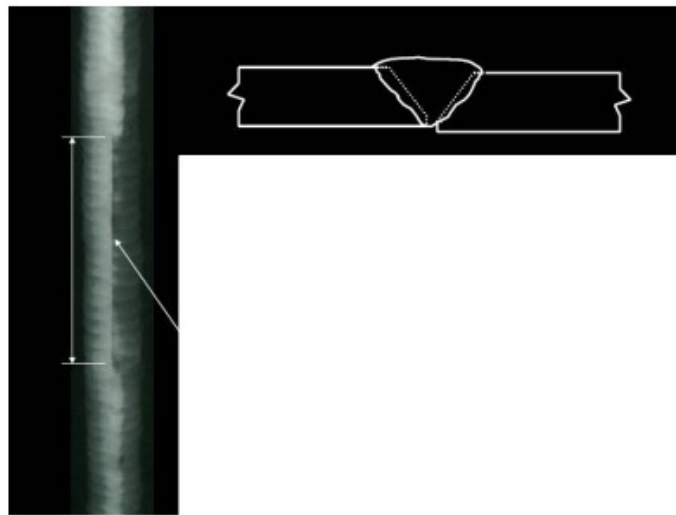


Figure 62 : L'image radiographique d'un désalignement des pièces à souder.

3. Concavité excessive (insuffisamment rempli)

La quantité de métal d'apport sur la dernière passe est insuffisante. La soudure sur le cap est creuse, l'épaisseur totale du cordon est donc plus mince à cet endroit (Fig.99.).

L'image radiographique qui révèle une densité plus sombre qui s'étend sur toute la largeur de la zone de soudage. Le reste de la partie soudée est plus « blanc ».

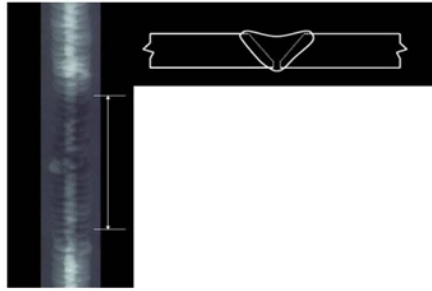


Figure 63 : L'image radiographique concavité excessive (insuffisamment rempli)

4. Pénétration excessive (glaçon)

Quantité de métal d'apport à la racine du cordon de soudure excédentaire.

L'image radiographique révèle une densité plus claire dans le centre de la largeur de la zone de soudage.

Cela peut s'étendre tout le long du joint de soudure ou, comme dans ce cas, à des zones isolées (Fig.100.)

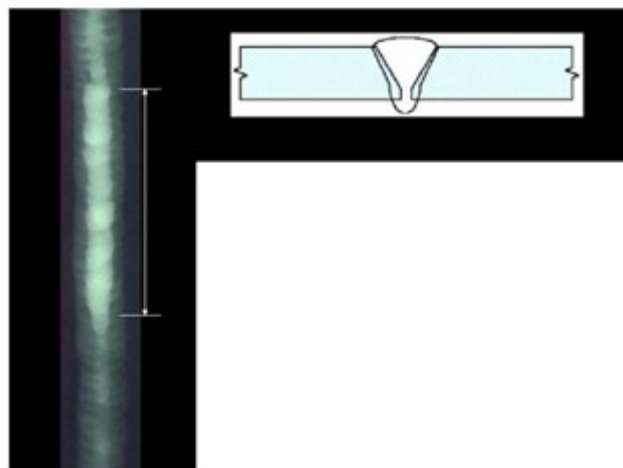


Figure 64 : L'image radiographique pénétration excessive (glaçon).

5. Caniveau externe

Sur la surface externe le long du joint de soudure et sur le bord de l'arête, amincissement du métal de base provoquant un «undercut».

L'image radiographique révèle une zone irrégulière de densité plus sombre. Lors d'un caniveau tel que celui-ci, la densité de ce défaut sera toujours plus sombre que la densité des pièces à souder (Fig.101.).

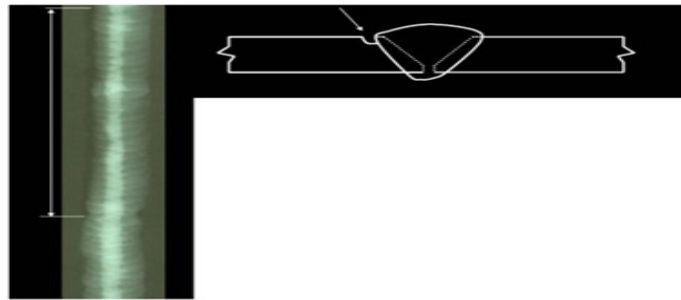


Figure 65 : L'image radiographique caniveau externe.

6. Caniveau interne à la racine

Sur la surface interne le long du joint de soudure, amincissement du métal de base provoquant un «undercut».

L'image radiographique révèle une zone irrégulière de densité plus sombre non loin du centre du joint de soudure et tout le long de l'arête de la passe à la racine (Fig.102.).

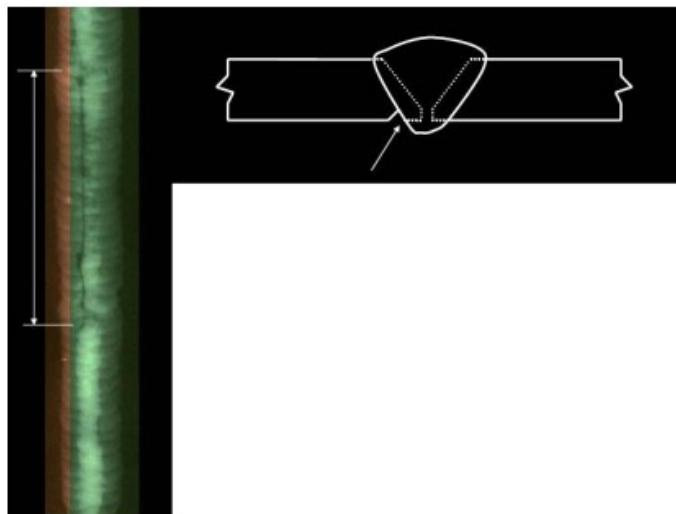


Figure 66 : L'image radiographique caniveau interne à la racine.

7. Concavité interne à la racine

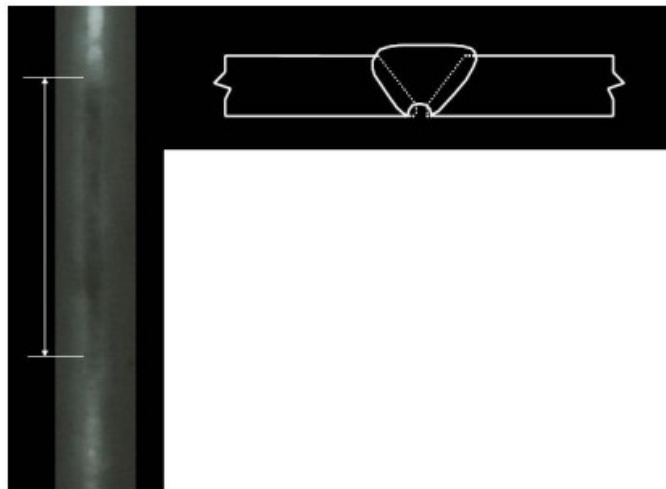


Figure 67 : L'image radiographique concavité interne à la racine.

8. Cratère à la racine localisé :

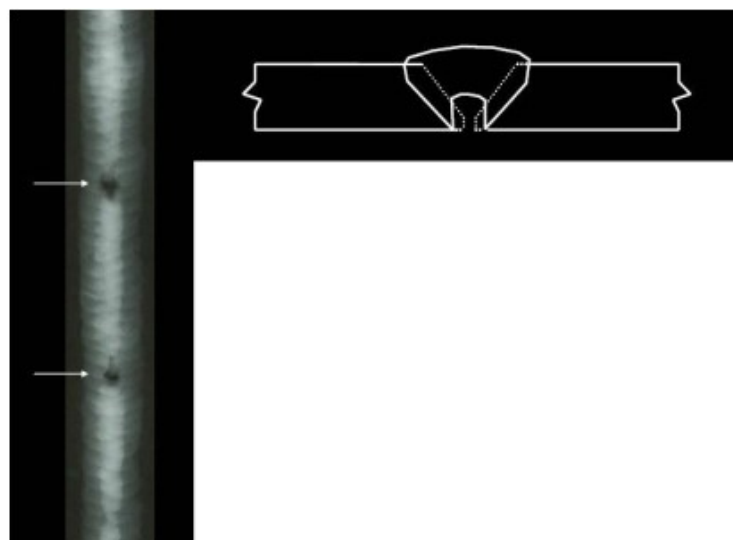


Figure 68 : L'image radiographique cratère à la racine localisé.

9. Pénétration incomplète ou manque de pénétration :

Les arêtes de la racine du joint de soudure n'ont pas été fusionnés ensemble, habituellement au fond du chanfrein en V simple avec ou sans épaulement (talon) (Fig.105.).

L'image radiographique révèle une longue bande de densité plus sombre où on remarque que les arêtes dans le centre de la largeur du cordon de soudure ne sont pas fusionnés

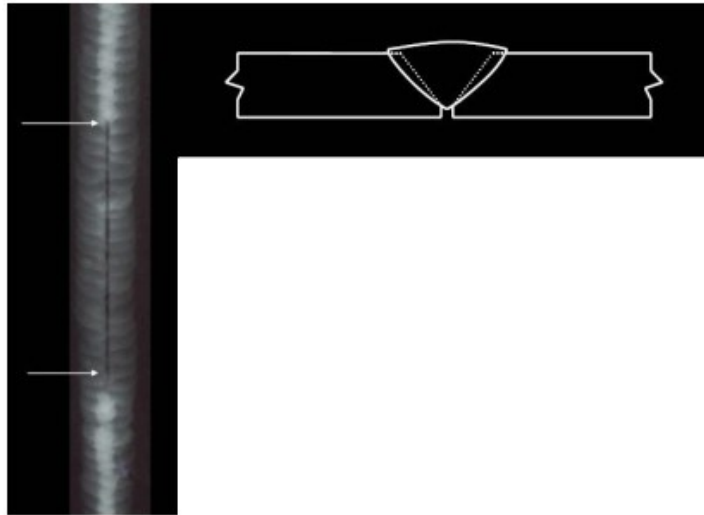


Figure 69 : L'image radiographique pénétration incomplète ou manque de pénétration.

10. Inclusions de laitier en inter passe :

Ce sont habituellement des impuretés non métalliques qui se sont solidifiées à la surface de la soudure et qui n'ont pas été correctement enlevées lors du nettoyage.

L'image radiographique révèle des formes irrégulières de densité plus sombre et étroitement allongées et situées au hasard sur l'image de la zone soudée (Fig.106.)

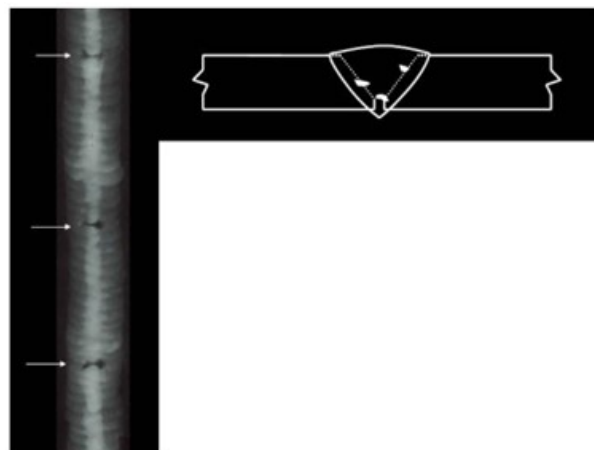


Figure 70 : L'image radiographique inclusions de laitier en inter passe.

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

Ce sont habituellement des impuretés non métalliques qui se sont solidifiées à la surface de la soudure et qui n'ont pas été correctement enlevées entre les passes.

L'image radiographique révèle des lignes de densité plus sombre régulière ou non régulière, étroitement allongées et situées en parallèle ou non, dans le sens de la longueur .

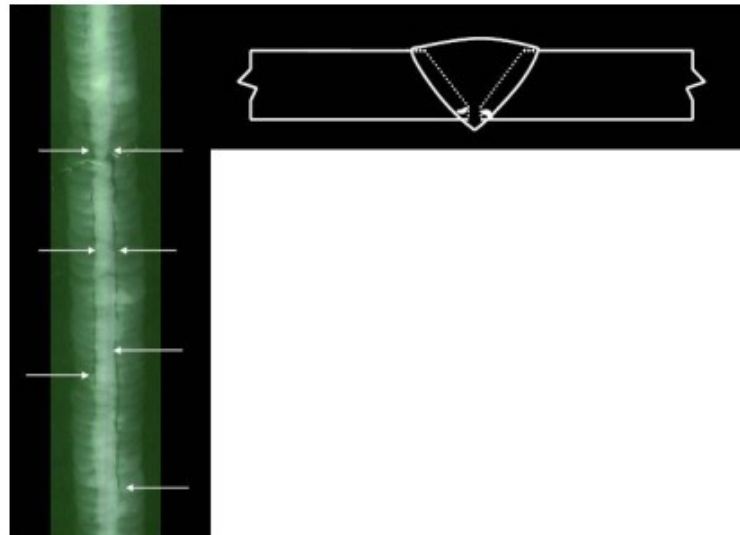


Figure 71 : L'image radiographique inclusions de laitier en lignes allongées

(enchemin de fer).

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

Longs espaces vides allongés entre le dépôt de soudure et les surfaces du joint.

L'image radiographique révèle des lignes droites de densité plus sombre parfois avec des points plus noirs dispersés tout le long du manque de fusion, étroitement allongées, droites et situées en parallèle ou seules dans le sens de la longueur. Ces lignes sont non sinueuses, comme des inclusions non métalliques, par exemple

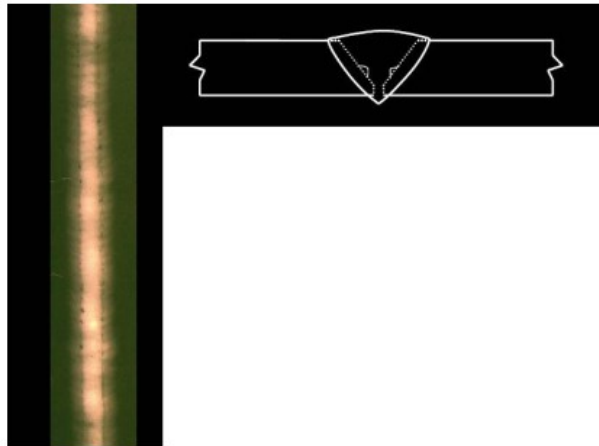


Figure 72 : L'image radiographique manque de fusion (sur les côtés des plaques).

13. Manque de fusion entre les passes

Zones de manque de fusion le long de la surface du cordon et aux abords de la passe de soudure. Normalement, c'est un manque de chaleur.

L'image radiographique révèle des petits points de densité plus sombre, quelques-uns avec de minces queues allongées enlignées dans le sens du soudage et non situé dans le centre de la largeur du cordon de soudure mais aux abords.

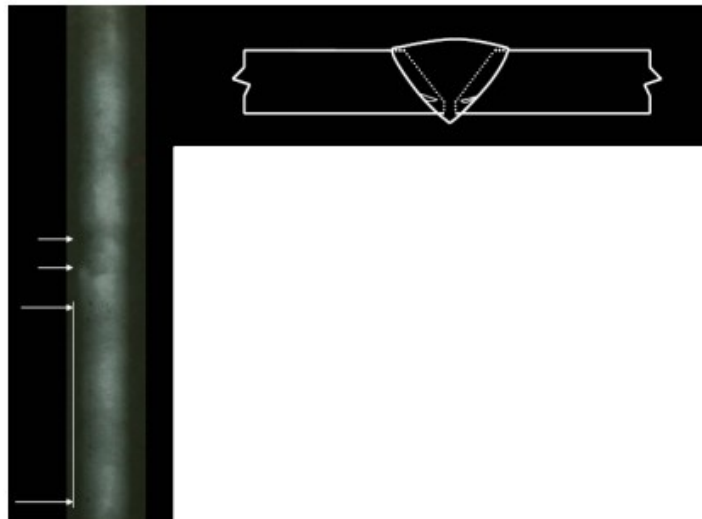


Figure 73 : L'image radiographique manque de fusion entre les passes.

14. Porosités dispersées

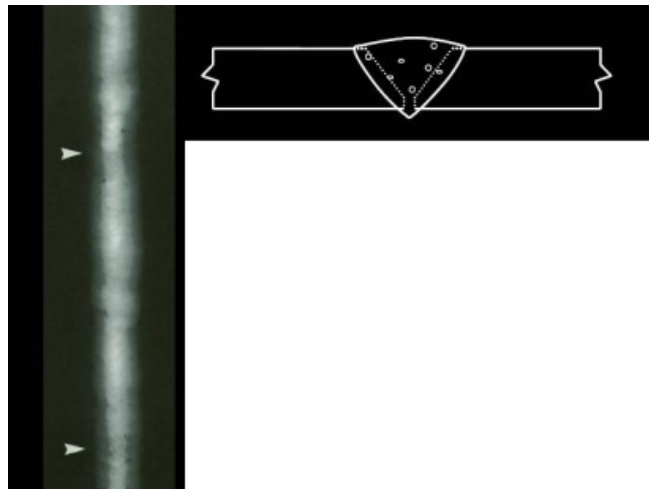


Figure 74 : L'image radiographique porosité dispersée.

15. Nids de Porosités ou soufflures agglomérées

Petites poches gazeuses rondes ou légèrement allongées regroupées ensemble (Fig.111.).

L'image radiographique révèle de petits points ronds allongés ou non, dont la densité est plus sombre, regroupés ensemble à divers endroits dans la zone soudée et de dimensions variées.

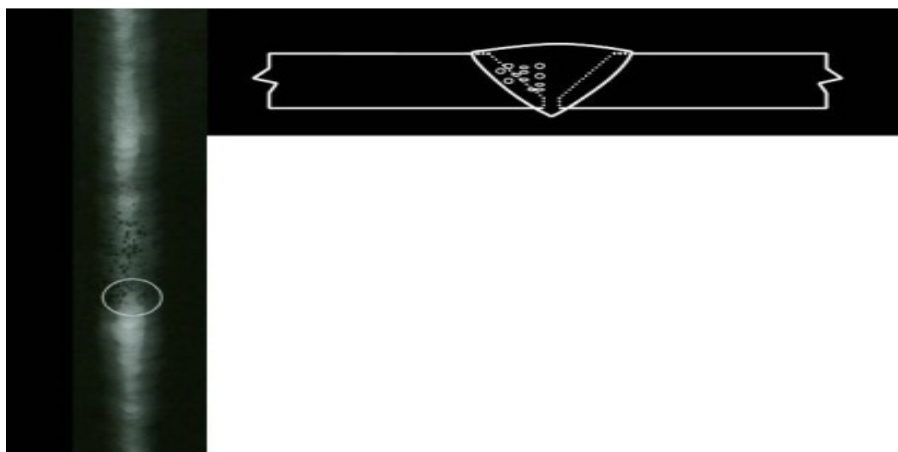


Figure 75 : L'image radiographique nid de porosité ou soufflure agglomérée.

16. Porosités ou soufflures enlignées la racine du joint :

Petites poches d'air rondes ou légèrement allongées, alignées et regroupées tout le long du joint

dans le centre de la largeur de la photo rayon x

L'image radiographique révèle de petits points ronds allongés ou non, dont la densité est plus sombre, alignés en ligne droite dans le centre de la zone soudée.



Figure 76 : L'image radiographique porosité ou soufflure enlignée la racine du joint.

17. Fissures transversales



Figure 77 : L'image radiographique fissure transversale.

- Une fracture dans le métal déposé qui traverse la soudure.
L'image radiographique révèle parfois des lignes en formes de spirales ou de plûmes, dont la densité est plus sombre, qui traverse perpendiculairement la largeur de la zone soudée.

18. Fissures longitudinales

Une fracture dans le métal déposé dans le sens de la longueur de la soudure (Fig.114.).

L'image radiographique révèle des lignes en formes de spirales ou de plûmes, dont la densité est plus sombre, qui longe la longueur de la soudure en plein centre.

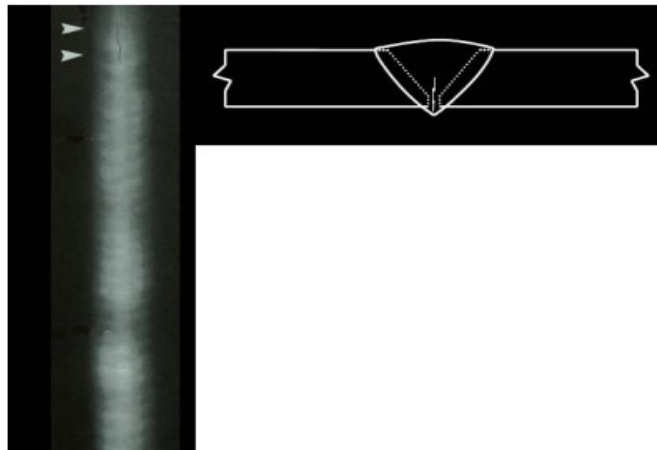


Figure 78 : L'image radiographique fissure longitudinale.

III. Les remèdes

Il y a 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 ducordon de soudure par chauffage afin d'éliminer le maximum de fissures



Figure 79 : Traitement d'un cordon de soudure par chauffage.

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



Figure 80 :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 81 : Enlèvement de la matière du cordon de soudure.

Conclusion

L'objectif de ce mémoire de master avait par but est l'étude des défauts desoudage dans les pipelines en acier

A partir de ce travail, on a trouvé que :

- Plusieurs types de défauts sont observés dans pipelines, comme :(Fissure, Cavités, Inclusion solide, Manque de fusion et de pénétration, défautsde forme, défauts divers).
- Les techniques de détection des défauts s'effectuent par un control visuel etpar 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