

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Métallurgie.

Option : Métallurgie Physique.

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

Thème

**Causes et remèdes du manque de fusion dans
le soudage des pipelines**

Présenté par :

LADJIMI Ali

Proposé et dirigé par :

Pr. BOUMERZOUG Zakaria

Promotion : Juin 2017

Remerciement

Je remercie mon encadreur, le professeur BOUMERZOUG Zakaria qui m'a proposé ce thème de recherche et aussi de ses précieuses orientations.

Je remercie le directeur de COSDER Biskra et les ingénieurs de l'entreprise et en particulier :

- Monsieur Bouharide Mahfoud
- Monsieur Ben Salahe Hachem
- Monsieur Sahraoui Farid

Qui m'ont aidé pour effectuer une grande partie de mon travail expérimental.

Je remercie finalement mes enseignants et la direction du département de génie mécanique et le responsable du laboratoire de métallurgie, monsieur Deghiche.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail
A mes parents en témoignage de
tout mon amour.*

A toute ma famille.

A tous mes collègues et amis.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

SOUDAGE DE PIPELINE

I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition du soudage.....	2
I.3. Procédés de soudage.....	3
I.4. Soudage par fusion.....	4
I.5.1. Soudage à l'arc électrique.....	4
I.5.1.1. Généralités sur l'arc de soudage.....	4
I.5.1.2. Principe de soudage à l'arc électrique.....	4
I.5.1.3. Le soudage avec électrodes enrobées.....	5
I.5.1.4. Principe du procédé.....	5
I.5.1.5-Définition de l'électrode enrobée.....	6
I.5.1.6 Nature d'électrode enrobée de soudage d'arc.....	7
I.5.2.1 Soudage à l'arc gaz de protection procédé TIG.....	8
I.5.2.2 la figure 7 présente Principaux avantages et inconvénients du procédé TIG.....	8
I.5.2.3 Principe et œuvre du procédé.....	9
I.5.2.4. Les gaz de protection en TIG.....	10
I.5.3.1. le soudage semi-automatique sous protection gazeuse.....	10
I.5.3.2.En soudage MAG les mélanges gazeux types ternaires.....	10
II. Soudage des aciers à faible teneur en carbone.....	11
II.1. Introduction.....	11
II.2.Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	11
II.3. Le métal de base.....	12
II.4. La zone thermiquement effectuée (Z.A.T).....	12
II.5. Zone de liaison.....	13
II.6. La zone fondue.....	13
III.1. Morphologie de la zone de fusion.....	13

III.1. Effet des paramètres de soudage.....	15
III.2. Vitesse de soudage.....	15
III .3. Effet de la vitesse de refroidissement.....	15

CHAPITRE II

DEFAUTS DE SOUDAGE ET DEFAUT DU MANQUE DE FUSION

I. Les défauts des soudages.....	17
I. Les Fissures.....	17
I.1 Types de fissurations.....	18
I.1.1. Fissuration à chaud.....	18
I.1.2 Fissuration à froid.....	19
I.1.3.Orientation des fissures.....	20
I.3.1. Les fissures longitudinales.....	20
I.3.2. Les fissures transversales.....	21
I.4. Types de fissures par la direction.....	22
I.5. Causes et les moyens de prévention liés à la fissuration	23
II.1. Inclusions.....	23
II.2. Types d'inclusions.....	24
III. Retassures.....	24
IV. Défauts de surface.....	25
IV.1Morsures/Caniveaux.....	25
IV.2.Effondrements et trous.....	26
V. Défauts géométriques du cordon.....	27
V.1. Convexité et concavité.....	27
V.2. Débordements du cordon.....	28
VI. Dénivellement.....	28
VI.1. Définition dénivellement.....	28
VII. Défauts de pénétration.....	28
VII.1. Définition excès de pénétration.....	28
VII.2. Définition du manque de pénétration.....	29
VII.2.1Type manque de pénétration.....	30

VII.2.2	Manque de pénétration sans dénivellement.....	30
VII.2.3	Manque de pénétration dû à un dénivellement.....	30
VII.2.3	Manque de pénétration transversale.....	30
VII.2.4.	Causes possibles dans défaut excès de pénétration.....	31
VII.2.2	Méthodes de détection.....	31
VII.2.3	Méthodes de réparation.....	31
VII.2.4	Mesures préventives.....	31
VII.3.1	Causes possibles dans le défaut du manque de pénétration.....	32
VII.3.2	Mesures préventives.....	32
VII.3.4	Méthodes de détection.....	32
VII.3.5	Méthodes de réparation.....	32
VIII	Manque de fusion.....	32
VIII.1.	Introduction.....	32
VIII.2.	Définition.....	32
VIII.3.	Localisations possibles des manques de fusion.....	33
VIII.3.1	Le manque de fusion dû à un collage de point froid.....	34
VIII.3.2.	Type de Manque de fusion dû à un collage de point froid.....	34
VIII.3.2.1.	Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	34
VIII.3.2.1.	Définition.....	34
VIII.3.2.2	Causes possibles.....	35
VIII.3.2.3	Méthodes de détection.....	35
VIII.3.2.4	Méthodes de réparation.....	35
VIII.3.2.5	Mesures préventives.....	35
VIII.4.	Manque de fusion entre passes.....	35
VIII.4.1	Définition.....	35
VIII.4.2	Causes possibles et Méthodes de détection et Méthodes de réparation et Mesures préventives.....	36
VIII.5.	Le manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint.....	36
VIII.5.1.	Définition.....	36
VIII.5.2.	Type de Manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint.....	36
VIII.5.2.1	Manque de fusion à la racine de la soudure.....	36

VIII.5.2.2. Causes possibles.....	37
VIII.5.2.3. Méthodes de détection.....	37
VIII.5.2.4. Méthodes de réparation.....	37
VIII.5.2.5. Mesures préventives.....	37

CHAPITRE III

MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Introduction.....	39
I.1. Présentation de l'entreprise COSIDER Biskra.....	39
I.2. La diversité de l'activité à travers les filiales.....	39
II.1.Procédés de soudage à COSIDER.....	40
II .2.Soudage Manuel.....	42
II.3. Étapes du processus de soudage des pipelines.....	42
III. Identification du métal de base et du métal d'apport.....	46
III.1. Métal de base.....	46
III.2. Métal d'apport (les électrodes).....	47
III.3. Réalisation de joints de soudure à COSIDER.....	47
IV.1. Contrôles non destructifs(CND).....	47
IV.2. Principe.....	48
IV.2.1. Les sources de rayonnements.....	48
V.1. Prélèvement des échantillons.....	49
V.2.Contrôle par ressuage	49
V.2.1.Principe.....	49
V.2.2.Applications du contrôle par ressuage.....	50
V.2.3.Méthode de mise en œuvre du ressuage.....	50
VI.1.Examen métallographique.....	52
VI.2.1.Polissage.....	53
VI.2.2.Attaque chimique.....	53
VI.3.1.Analyse par le microduromètre (Microdureté Vickers).....	54
VI.3.2.Machine d'essai de microdureté.....	54
VI.3.3.Mode opératoire.....	55

VI.4. Diffraction des rayons X.....	56
VII.1 Essai de pliage.....	58

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATION

I. Introduction.....	61
I.1. Observation macrographique.....	61
I.1.1. Joint de soudure obtenu après chauffage et soudage sous un intervalle de courant électrique I= [100A.....150 A] et (V=75.kV).....	61
I.1.2. Joint de soudure obtenu sans préchauffage et courant électrique I= [100A.....150A] et (V=40...75kV).....	62
I.1.3. Joint de soudure obtenu sans préchauffage et courant électrique I= [50A...60A].....	62
I.1.4. Joint de soudure obtenu avec préchauffage et sous un intervalle de courant I= [50A...60A] et V= [24.kV].....	63
II. Observation microstructurale.....	64
II.1. Effet des conditions de soudage sur microstructure du joint soudé.....	64
II.2. Micrographie de zone de liaison.....	67
III- Observation radiographique du joint soudé.....	68
IV- Teste de ressuage.....	70
V.1. Test de pliage.....	70
VI.1. Mesure de Microdureté.....	71
VI .2. Echantillon soudé manuellement (avec et sans défaut) dans les trois zone.....	71
VII. Analyse par la diffraction des rayons X.....	72
VII.1. Echantillon soudé manuellement joint soudé et métal de base.....	72
VIII. Remèdes.....	76
Conclusion générale.....	77

Liste des tableaux

CHPITRE II : DEFAUTS DE SOUDAGE.

Tableau les Causes et les moyens de prévention liés à la fissuration.....23

Types d'inclusions : le tableau I.2 résume les types d'inclusion.....24

Le tableau 3 montre les types de défaut de manque de fusion et leur réparation.....38

CHAPITRE III : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES.

Tableau 1 : Caractéristiques de poste de soudage.....41

Tableau .2 : Composition chimique d'électrodes utilisées.....47

CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATION.

Tableau I : Evolution de la dureté en fonction des zones du joint soudé de X60.....71

Tableau II : Paramètre des cristallographiques obtenus à partir du diffractogramme de diffraction de rayons X de ZF.....74

Tableau II : Paramètres, des cristallographiques obtenus à partir du diffractogramme de diffraction de rayons X de MB.....74

Liste de figures

CHAPITRE I :

SOUDAGE DES PIPELINES.

Figure I.1 Joint de soudage.....	2
Figure I.2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.....	3
Figure I.3. Principe de soudage à l'arc électrique.....	5
Figure I .4. Principe d'un arc électrique.....	5
Figure I.5.Electrodes de soudage.....	6
Figure I.6 : Électrodes de soudage.....	8
Figure I.7 : Description du procédé.....	8
Figure I.8 : Principe de soudage TIG.....	9
Figure I.9 : Les différentes zones d'un assemblage soudé.....	12
Figure I.10 : Observation microscopique a 'un acier soudé.....	13
Figure I.11 : Cycle thermique en soudage et transformations structurales.....	14
Figure II.12 : Transformation des 'acier dans la zone réchauffée.....	15
Figure II.13 : Schéma du gradient de température en fonction de la vitesse de croissance montrant les modes de solidification possibles.....	16

CHPITRE II

DEFAUTS DE SOUDAGE

Figure II.1 : Schéma illustrant les différentes régions de la zone affectée thermiquement (ZAT) dans une soudure à passe unique et les défauts éventuels.....	17
Figure II.2 : Fissure de cratère.....	18
Figure II.3 : Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud.....	19
Figure II.4 : Type de fissures à froid.....	19
Figure II.5 : La fissure longitudinale.....	21
Figure II.6 : La fissure transversale.....	21
Figure II.7 : Les types de fissure.....	22
Figure II.8 : Défaut d'inclusions.....	23
Figure II.9 : Retassure.....	24

Figure II.10 : Radiographique et visuelle de retassure.....	25
Figure II.11 : Défauts de surface Morsures/Caniveaux.....	25
Figure II.12 : Types d'effondrements.....	26
Figure II.13 : Défaut de trou.....	26
Figure II.14 : Convexité et concavité.....	27
Figure II.15 : Surépaisseur.....	27
Figure II.16 : Débordement.....	28
Figure II.17 : Dénivellement.....	28
Figure II.18 : Excès de pénétration.....	29
Figure II.19 : Manque de pénétration.....	29
Figure II.20 : Manque de pénétration sans dénivellement.....	30
Figure II.21 : Manque de pénétration due à un dénivellement.....	30
Figure II.22 : Manque de pénétration transversale.....	31
Figure II.23 : Collage ou manque de fusion.....	33
Figure II.24 : Localisations possibles des manques de fusion.....	33
Figure II.25 : Manque de fusion dû à un collage de point.....	34
Figure II.26 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	34
Figure II.27 : Manque de fusion entre passes.....	35
Figure II.28 : Manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint.....	36
Figure II.29 : Manque de fusion à la racine de la soudure.....	37

CHAPITRE III :

MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure III.1 : Pipe au niveau de COSIDER.....	40
Figure III.2 : Poste de soudure à l'arc électrique.....	40
Figure III.3 : Soudage à l'arc électrique à COSIDER.....	42
Figure III.4 : Un joint de soudure obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique.....	42
Figure III.5 : Préparation du chanfrein.....	43
Figure III.6 : Types des chanfreins (chanfrein V, chanfrein X).....	43
Figure III.7 : Le chauffage de la pièce par le chalumeau.....	43
Figure III.8 : Séchoir des baguettes.....	44
Figure III.9 : La première passe de soudage.....	44

Figure III.10 : Le joint de soudure obtenu après soudage par la 2 ^{ème} passe (Fig.III.10.a), et la 3 ^{ème} passe (Fig.III.10.b), et la 4 ^{ème} passe (Fig.III.10.c).....	45
Figure III.11 : La finition du soudage après 4 passes de l'acier X60 soudé manuellement avec l'électrode enrobée.....	46
Figure III.12 : Certificat d'analyse de la composition chimique d'acier micro allié du type X60 suivant les normes API.....	46
Figure III.13 : Les baguettes de soudage.....	47
Figure III.14 : méthode et l'appareillage de contrôle radiographique.....	49
Figure III.15 : Prélèvement des échantillons.....	49
Figure III.16 : Application de pulvérisant.....	50
Figure III.17 : Application du révélateur.....	51
Figure III.18 : Joint de soudure après ressuage.....	51
Figure III.19 : Teste de ressuage sur les échantillons prélevés	52
Figure III.20 : Polisseuse.....	53
Figure III.22 : Microduromètre Vickers.....	55
Figure III.23 : Schéma représentatif d'un pénétrateur pyramidal.....	55
Figure III.24 : Localisation des Positions.....	56
Figure III.26 : Illustration d'un pic de diffraction.....	57
Figure III.27 : Diffractomètre BRUKER D8 ADVANCE AXS(XRD).....	57
Figure III.28 : Essai de pliage sur joint soudure.....	59
Figure III.30 : Teste de pliage échantillon avec manque de fusion dans la racine	59
Figure III.31 : Teste de pliage échantillon sans défaut de soudage.....	60

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET INTERPRETATION

Figure IV.1 : Macrographies de quelque joint de soudure obtenus pour les conditions suivantes : préchauffage et courant de soudage $I = [100A \dots 150A]$ et $V = [40 \dots 75V]$	61
Figure IV.2 : Macrographie de deux joints de soudure obtenus sans préchauffage et sans un intervalle de courant électrique $I = [100A \dots 150A]$ et $V = [40 \dots 75.kV]$	62
Figure IV.3 : Joint de soudure obtenu sans préchauffage et courant électrique $I = [50A \dots 70A]$	63
Figure IV.4 : Joint de soudure obtenu avec un préchauffage et sans intervalle de courant électrique $I = [50A \dots 70A]$ courant faible.....	64

Figure IV.5 : Joint de soudure obtenu après application de quatre passes (préchauffage et courant de soudage $I = [100A \dots 150.A]$).....	65
Figure IV.6 : Microstructures de la différente zone (a-f) du joint soudé.....	66
Figure IV.7 : Microstructure du joint soudé sous différentes conditions.....	67
Figure IV.8 : Microstructures de la zone de liaison du joint soudé sous différentes conditions.....	68
Figure IV.9 : Films radiographique au niveau du joint de soudure de pipeline.....	69
Figure IV.10 : Echantillons du joint soudé après application du test de ressuage.....	70
Figure .IV.11 : Eprouvettes après essai de pliage a : joint de soudure sans défaut b : joint de soudure avec défaut.....	70
Figure .IV.12 : Localisation des Positions.....	71
FigureIV.13 : Evolution de la dureté en fonction de la distance dans deux joint soudé (avec et sans défaut).....	72
Figure14 : Diffractogrammes de diffraction des rayons X de la zone fondue après soudage avec une vitesse moyenne.....	73
Figure IV.15 : Programme X Pert High Score montre les pics de ferrite et qui sont (110), (200) et (211).....	75
Figure VI.16 : Explosion d'un pipeline.....	76

Liste d'abréviation

ZAT : Zone affectée thermiquement.

ZF : Zone fondue.

MB : Métal de base.

WF : Widmenstätten de ferrite.

AF : Ferrite aciculaire.

PF: Ferrite polygonal.

GBF: Grain boundary ferrite.

TIG: Tungstène Inerte Gas.

G.T.A.W: Gas tungstène arc wading.

MIG : Métal Inerte Gaz.

MAG : Métal Active Gaz.

HAZ: ZAT: Heat Affected Zone.

I.1. Introduction :

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il s'adapte au mieux, aux formes de construction et aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [1].

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

I.2. Définition du soudage :

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties de pièces pour la continuité entre les pièces de mêmes nature ou différente, soit par chauffage (fusion), soit par pression, soit par les deux, Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport [2].

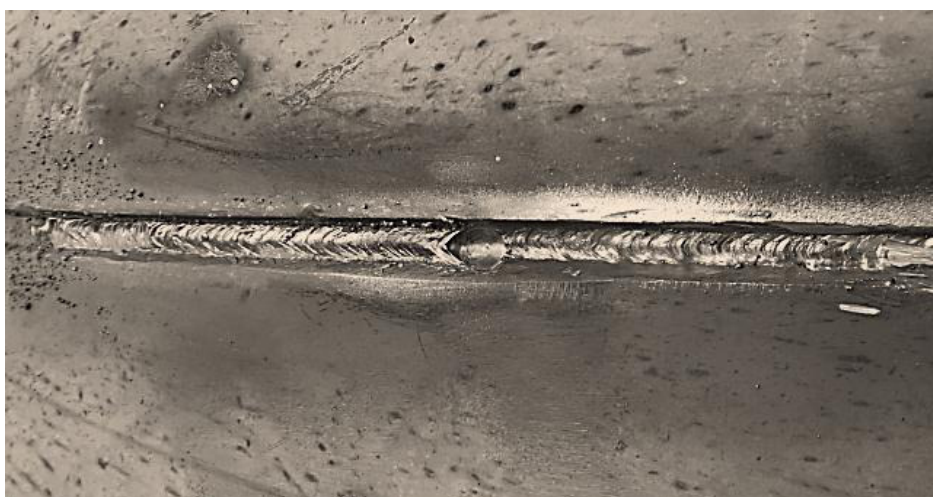


Figure I.1 : Joint de soudure [3] .

I.3. Procédés de soudage :

La figure I.2 présente l'organigramme des différents types de soudage

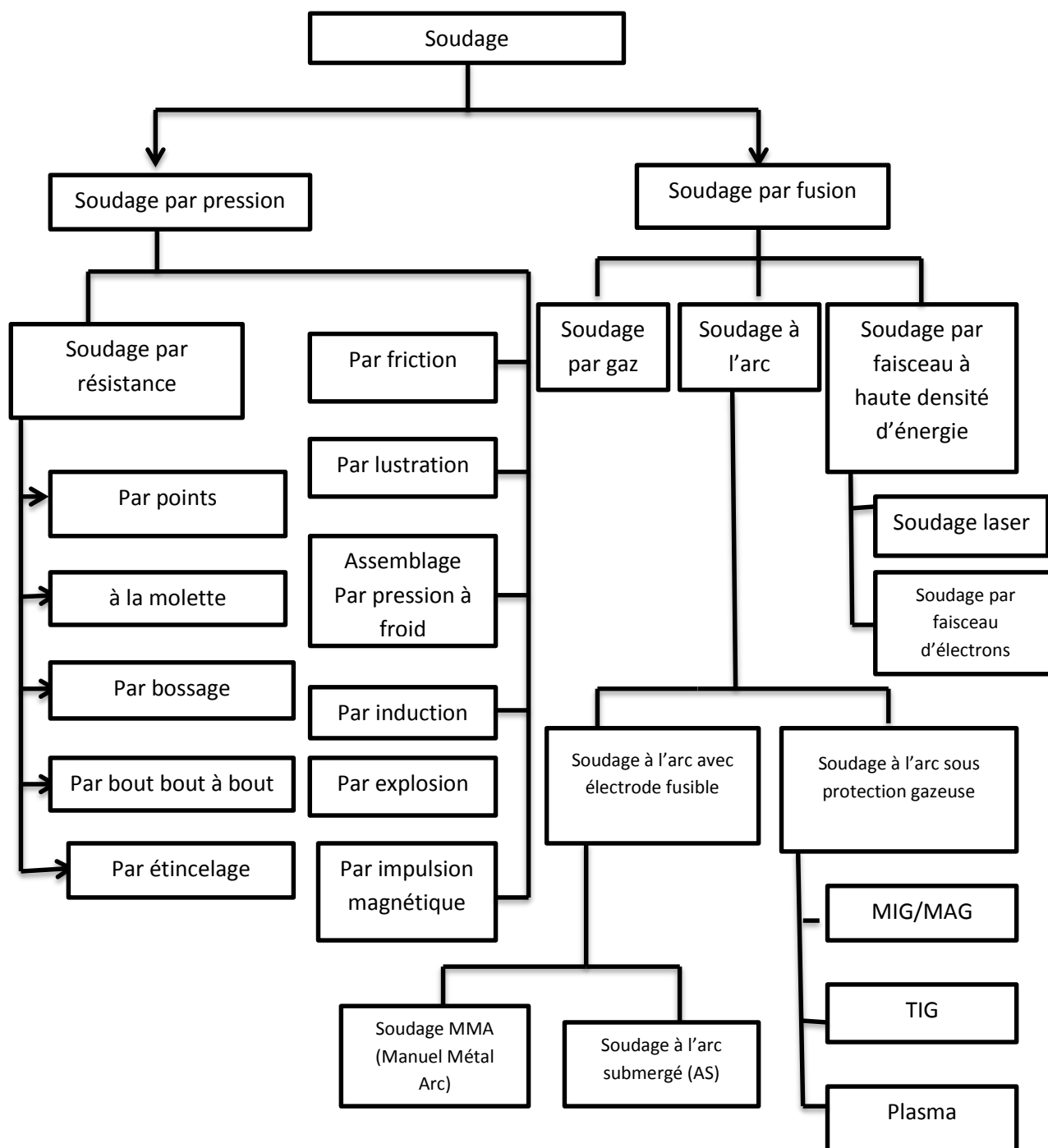


Figure I. 2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus [4].

I.4. 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 plasma ;
- Soudage sous flux [5] ;

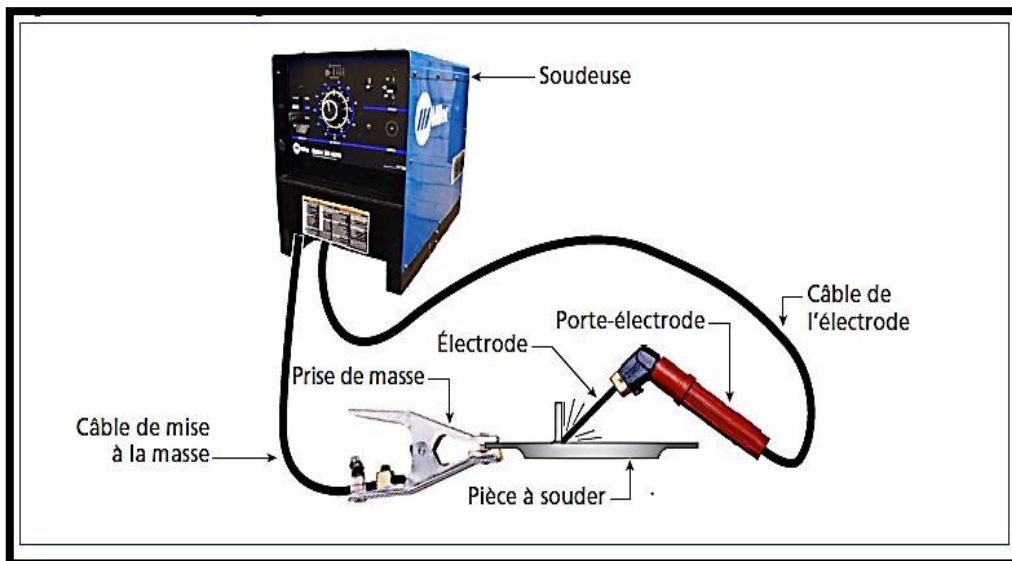
I.5.1. Soudage à l'arc électrique :

I.5.1.1. Généralités sur l'arc de soudage :

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisée par une densité de courant élevée et par une faible différence de potentiel. Par une décharge électrique on entend le passage du courant électrique à travers un milieu gazeux. Il Ya plusieurs formes ou types de décharges électrique : en arc, à lueur, par étincelles, décharges orageuse (éclaire) et autre elles par leurs durée, tension, intensité de courant et autres paramètres [5].

I.5.1.2. Principe de soudage à l'arc électrique :

Le terme (soudage à l'arc) définit un procédé de soudage par fusion des bords et addition d'un métal d'apport (souvent contenu dans l'électrode ou le fil –électrode). La chaleur de l'arc peut varier entre 3500°C et 5550°C. Le métal de base est fondu avec le métal d'apport, ce qui crée le bain de fusion. Lors du soudage à l'arc, le courant circule à travers un conducteur qui relie le poste de soudage à l'électrode. Il forme un arc électrique en traversant l'espace libre entre l'électrode et le métal de base, puis il poursuit sa course en passant par le câble de masse pour retourner au poste de soudage (FigI.3) [6].



FigureI.3. Principe de soudage à l'arc électrique [7].

Un arc électrique est donc un gaz ionisé dans lequel circule un courant électrique ; l'arc se forme entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder (FigI.4).

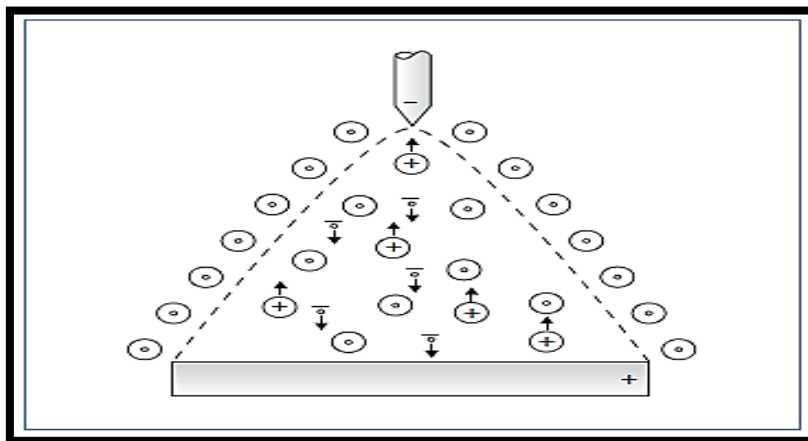


Figure I.4. Principe d'un arc électrique [7].

Dans un procédé de soudage à l'arc, on utilise aussi souvent un flux solide en poudre ou un gaz, qui sert à protéger le bain de fusion de l'air ambiant.

I.5.1.3. Le soudage avec électrodes enrobées :

I.5.1.4. Principe du procédé :

Un électrique établi entre une électrode et les bords des pièces à assembler, provoque leur fusion et crée un bain de métal liquide reçoit les gouttes de métal de l'électrode (FigI.5.).

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 (pole négatif) vers l'anode (pole positif) que constituent l'extrémité de l'électrode et l'impact de l'arc sur la pièce : la polarité est choisie ionisée ne représente qu'une faible part d'énergie calorifique mais irradie surtout des rayonnements électromagnétique (lumière visible, ultra violetes,). La tâche anodique et surtout la tache cathodique, ou se présente les ions positifs, fournissent ensemble l'essentiel de la chaleur. La tache anodique, bombardée par des électrons est par contre à une température plus haute (3500°C) que celle de la tache cathodique (2400°C). Cette situation est permanente en courant ; elle s'inverse à chaque alternance en alternance en courant alternatif. Le réamorçage s'obtient dans la mesure où l'anode, devenue cathode, reste suffisamment chaude pour devenir émettrice [8].

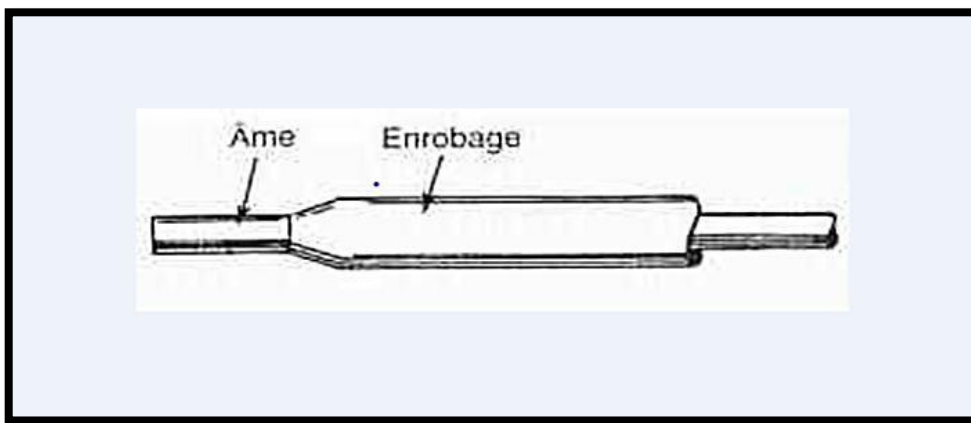


Figure I.5. Electrodes de soudage [7].

I.5.1.5-Définition de l'électrode enrobée :

L'électrode est constituée de deux parties distinctes :

- **L'âme** : partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure.
- **L'enrobage** : partie extérieure cylindrique de l'électrode. Il participe à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en générant une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. L'enrobage dépose, lors de sa fusion, un laitier protecteur sur le dessus du cordon de soudure. Ce laitier protège le bain de fusion de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.
- **L'enrobage a un rôle :**

- **Rôle électrique** : Les éléments chimiques de l'enrobage facilitent l'amorce, la stabilité et le maintien de l'arc.
- **Rôle métallurgique** : En fondant, l'enrobage apporte des éléments d'alliage indispensables à la formation d'une soudure saine et de qualité. De plus, après sa fusion, l'enrobage forme un liquide plus léger que le métal en fusion ; il surnage, formant ainsi une couche protectrice qui isole le bain de fusion de l'air ambiant, tout en donnant au cordon de soudure un bel aspect. En se solidifiant, le liquide en question forme un dépôt vitreux et dur à la surface du cordon. Ce dépôt, qu'on appelle laitier, doit être enlevé à l'aide d'un marteau à piquer une fois la soudure achevée.
- **Rôle chimique** : protège le métal contre l'action de l'air ambiant et refroidissement du cordon par formation d'un laitier.

I.5.1.6 Nature d'électrode enrobée de soudage d'arc :

L'électrode fond simultanément avec le métal de base et forme le cordon de soudure qui est recouvert d'un laitier protecteur plus léger que le métal. Le laitier remonte à la surface et forme une couche qui retarde la solidification du métal et le protège contre l'oxydation de l'air et un refroidissement trop rapide. La composition de l'enrobage varie en fonction des caractéristiques opératoires et des propriétés mécaniques souhaitées.

- **Type A (Acide)** : Oxydes de Fer, de Ferro Manganèse, Silicate...
- **Type O (Oxydant)** : Oxyde de Fer, Silicate de Fer, manganèse, Ferro-alliages...
- **Type B (Beziq)**: Carbonate de Calcium, spath-fluor, Ferro-alleges.
- **Type C (Cellulosique)** : matières organiques et cellulose.
- **Type R (Rutile)** : oxyde de titane (95%) ou mélange d'oxyde de titane (50%) et d'oxyde de fer (50%) [9].

La figure I.6 présente Électrodes de soudage.



Figure I.6 : Électrodes de soudage [10].

I.5.2.1 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 réparation 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 [11].

I.5.2.2 la figure I.7 présente Principaux avantages et inconvénients du procédé TIG :

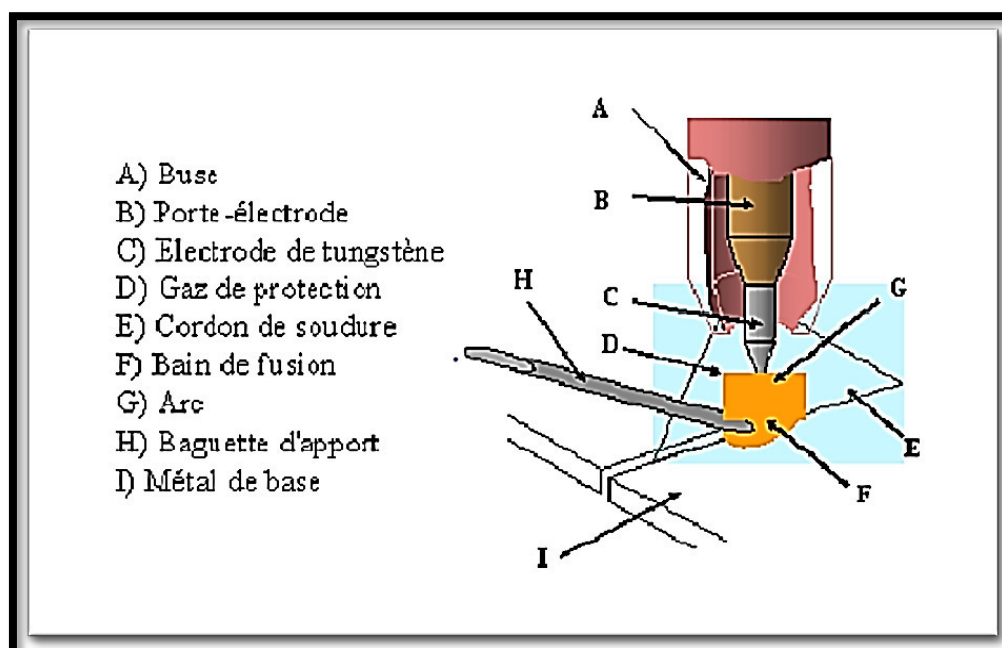


Figure I.7 : Description du procédé [12].

I.5.2.3 Principe et œuvre du procédé :

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène Inerte Gas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) gas tungstène arc wading) (FigI.8.).

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 [13].

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 [14].

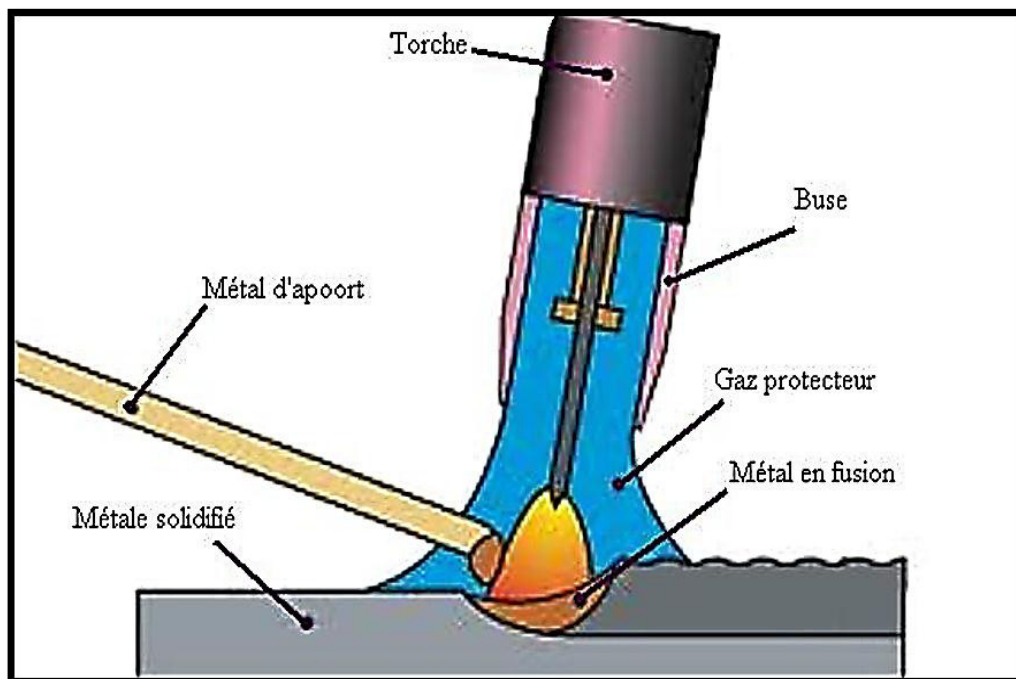


Figure I.8 : Principe de soudage TIG [14].

I.5.2.4. 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. Quant aux mélanges (généralement à 25%, 50% ou 70% hélium dans l'argon), ils sont destinés à réaliser un compromis performance-prix [15].

I.5.3.1. le soudage semi-automatique sous protection gazeuse :

MIG ou MAG est un procédé de soudage arc sous protection gazeuse qui consiste à établir un arc entre la pièce à souder – cathode (pôle négatif) – et un fil continu – anode (pôle positif) – dévidée par un dispositif approprié. MIG signifie Métal Inerte Gaz et MAG Métal Active Gaz. En fait il s'agit du même procédé qui se différencie par le caractère chimique de l'atmosphère contrôlée. Si durant de nombreuses années, il y avait confusion dans l'interprétation de ces procédés, la norme européenne EN 439 concernant la codification des gaz de protection utilisés en soudage permet de préciser la différence d'interprétation. Cette norme a pour objet de classer les gaz de protection en fonction de leurs caractéristiques chimiques.

Les puretés de gaz et la précision des mélanges sont également spécifiées. La dénomination MIG est attribuée aux gaz ou mélanges gazeux dont le caractère chimique contrôlé est inerte c'est à dire qu'il n'y a pas de réaction avec le métal fondu.

Les matériaux concernés sont les alliages légers ou les bases Nickel par exemple qui utilisent des gaz pratiquement inertes (Arcal Ni 15 et Arcal Ni 32). Pour l'assemblage des aciers non faiblement ou fortement alliés, on utilisera une protection gazeuse active d'où l'appellation MAG. Parmi les gaz actifs, on discernera les gaz oxydants : apport de dioxyde de carbone et/ou d'oxygène et les gaz réducteurs : hydrogène.

I.5.3.2. En soudage MAG les mélanges gazeux types ternaires :

- argon/Dioxyde de carbone/hydrogène ou quaternaires
- argon/Dioxyde de carbone/hydrogène/hélium sont

Définis comme gaz oxydant du fait que le gaz réducteur est toujours en plus faible proportion. Dans ces procédés, l'électrode est fusible et sert de métal d'apport.

Le gaz de protection doit protéger le bain de fusion de l'air ambiant, favoriser le transfert des gouttes de métal en fusion et stabiliser la racine de l'arc. La fusion du fil et le transfert du métal dans l'arc s'effectuent de différentes façons et sont directement influencés par le type de gaz ou mélanges gazeux utilisés ainsi que par les paramètres tension – intensité [16].





II. Soudage des aciers à faible teneur en carbone :

II.1. Introduction :

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise couramment les procédés de soudage. Les techniques de soudage sont en pleine évolution. Ces techniques assurent la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques [14].

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

La figure I.9 montre les différentes zones d'un joint soudé. Les plus importantes zones sont :

-  Métal de base.
-  Zone affectée thermiquement.
-  Zone de liaison.
-  Zone fondue.

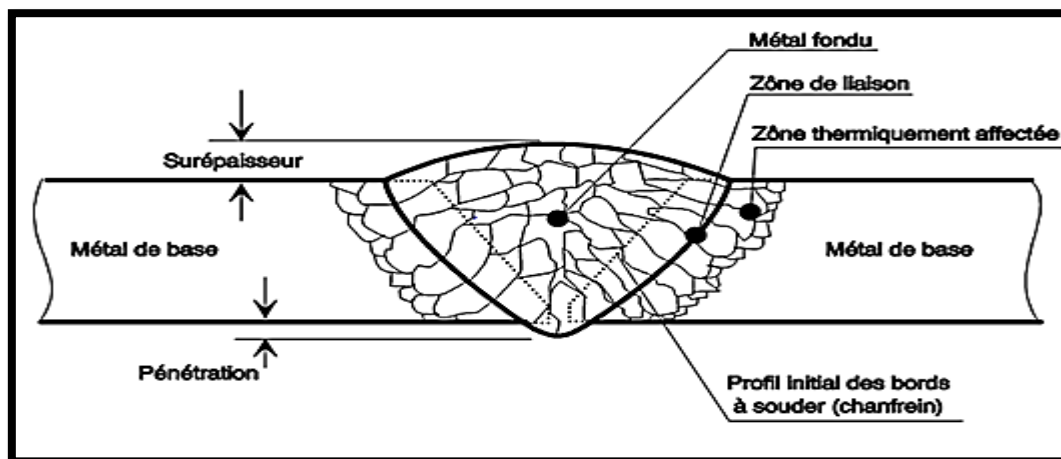


Figure I.9 : Les différentes zones d'un assemblage soudé [18].

II.3. 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 [17].

II.4. La zone affectée thermiquement (Z.A.T) :

C'est partie du métal de base qui n'a pas affectée 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 allotropique de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique [17].

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 :

- zone de surchauffe.
- zone austénitique.

- zone partiellement austénitisée [17].

II.5. Zone de liaison :

Zone marquant la frontière entre la zone fondue et la zone affectée 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 (FigI.10.) [17].

II.6. La zone fondue :

C'est la région ou 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 [17].

La (figureI.10) montre la zone fondue (WM) et la ZAT (HAZ).

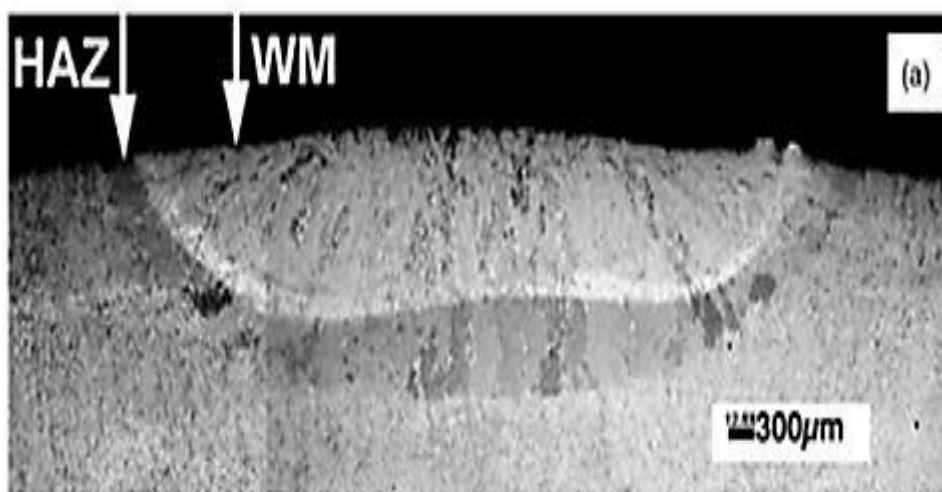


Figure I.10 : Observation microscopique a 'un acier soudé [18].

III. Morphologie de la zone de fusion :

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont liées aux paramètres technologiques du procédé, et les mouvements du bain de fusion.

Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermo physiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques, convectifs, chimiques et électromagnétiques interdépendants selon la nature du procédé utilisé [19].

Aux abords immédiats de la zone fondue, le métal de base subit les effets du cycle thermique de soudage qui provoque des transformations liées à la température maximale atteinte et aux conditions de refroidissement du joint soudé. (FigI.11) synthétise ces transformations :

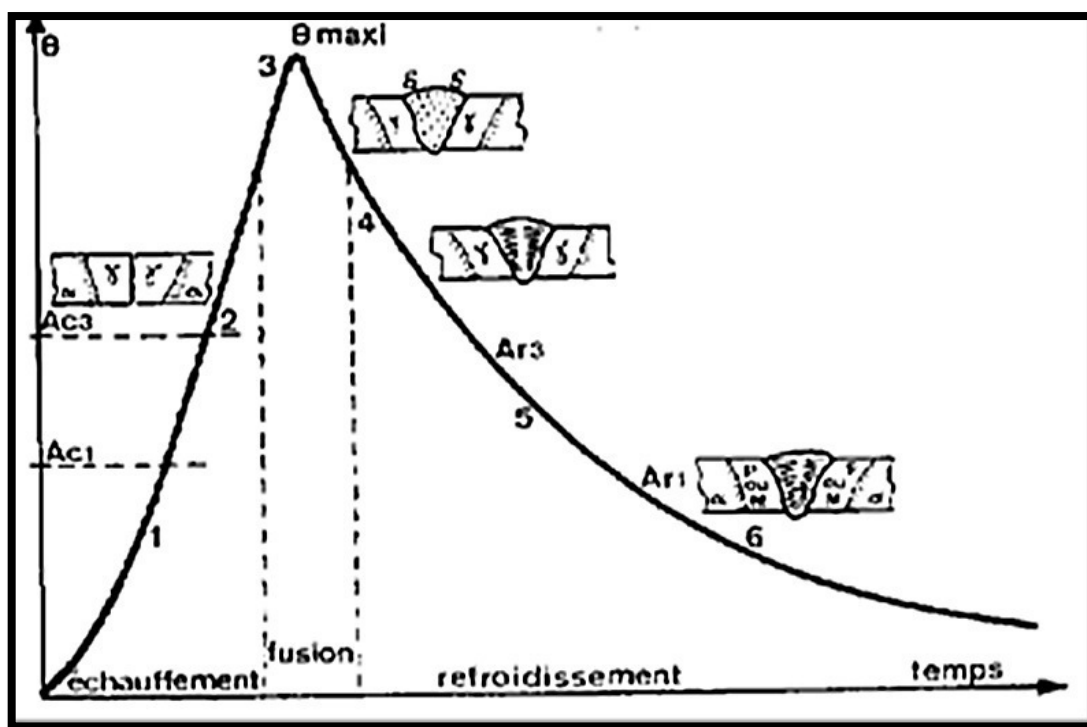


Figure I.11 : Cycle thermique en soudage et transformations structurales [20].

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

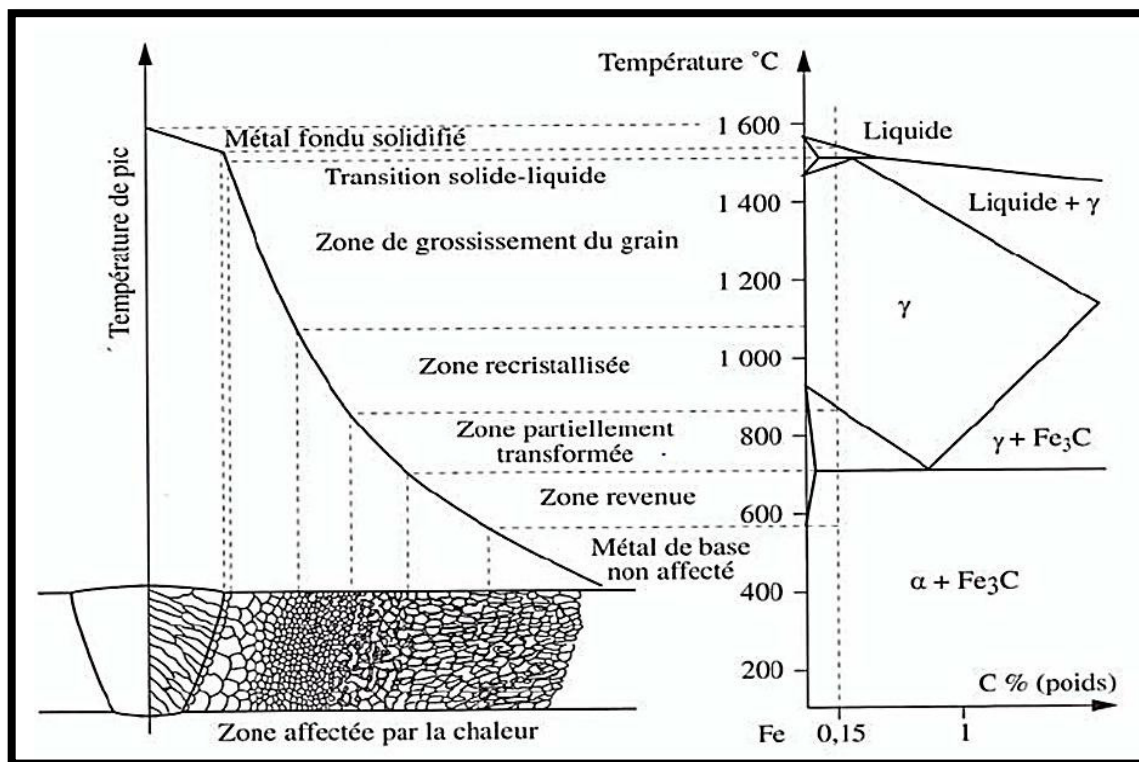


Figure I.12 : Transformation de l'acier dans la zone réchauffée [20].

III.1. Effet des paramètres de soudage :

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure. L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres puissance et vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement [21].

III.2. Vitesse de soudage :

La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion.

En augmentant la vitesse de soudage, on diminue la largeur du cordon, la surépaisseur, la pénétration et la dilution. Les vitesses de soudage sont réglables sur une très grande gamme, de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres par minute [21].

III.3. Effet de la vitesse de refroidissement :

L'effet cumulé de G et de R gouverne le mode de croissance et donc la forme de la sous structure de solidification. Le produit $G \times R$ est équivalent à une vitesse de refroidissement exprimé en °C/s et par conséquent plus $G \times R$ sera important et plus les structures cellulaires,

dendritiques colonnaires ou même dendritiques équiaxes seront fines, l'espacement entre les bras des dendrites est aussi influencé par la vitesse de refroidissement, une faible vitesse favorisant un espacement plus grand et donc un effet de grossissement de la sous structure.

L'effet du gradient de température G et de la vitesse de solidification R sur la morphologie de la sous structure sont résumés dans le schéma suivant (FigI.13).

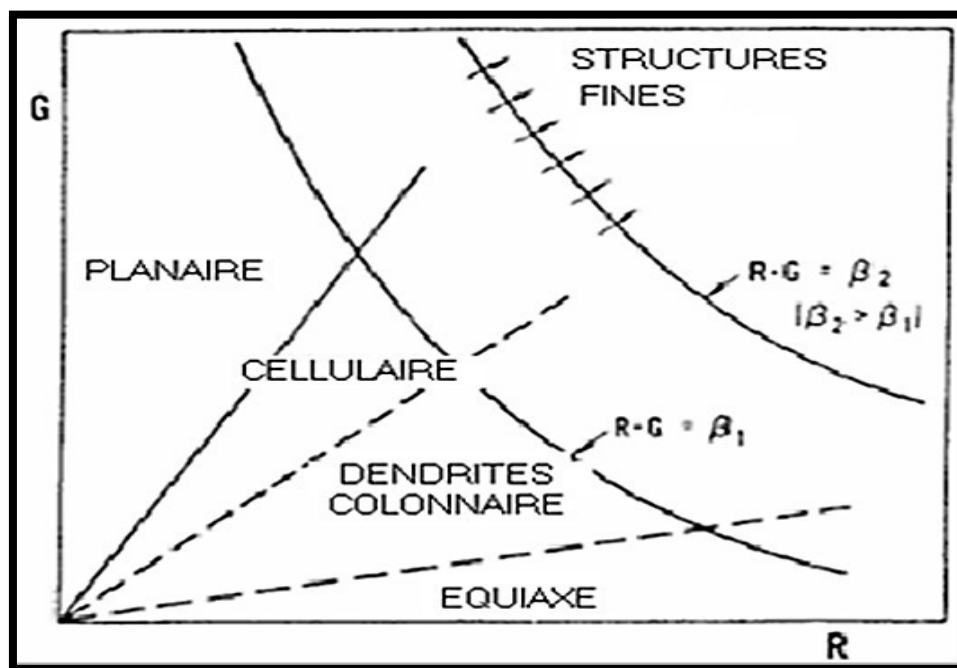


Figure I.13 : Schéma du gradient de température en fonction de la vitesse de croissance montrant les modes de solidification possibles [22].

I. Les défauts des soudages :

Introduction :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. (La figure II.1) montre les différents défauts observés dans un joint de soudure. Commençons d'abord par les fissurations [23].

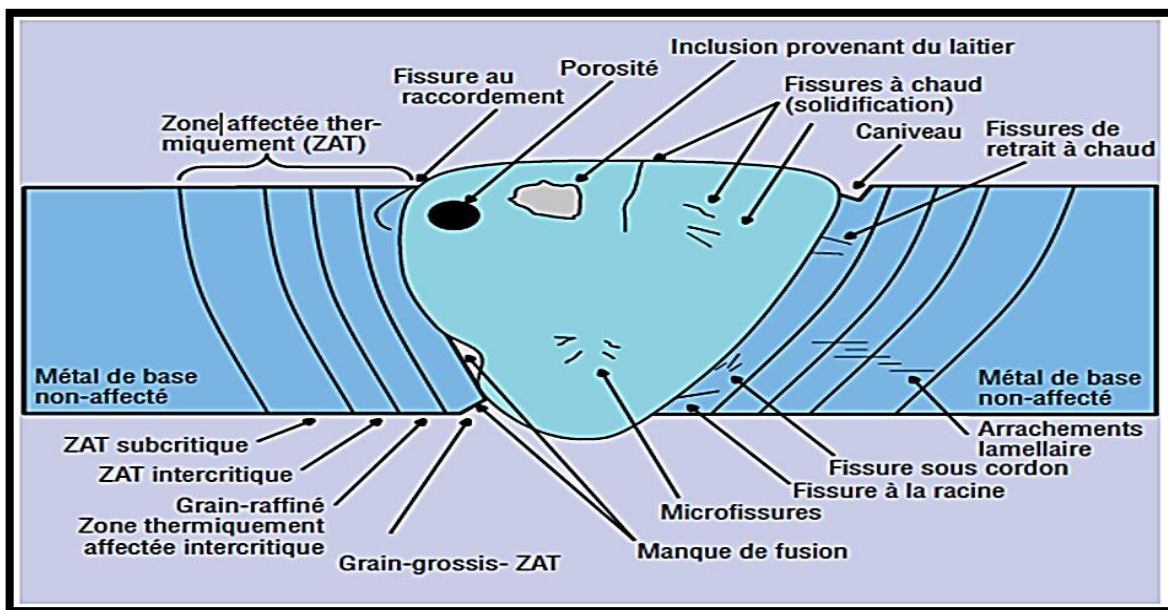


Figure II.1 : Schéma illustrant les différentes régions de la zone affectée thermiquement (ZAT) dans une soudure à passe unique et les défauts éventuels [24].

I. Les Fissures :

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 [25].

I.1 Types de fissurations :

I.1.1. Fissuration à chaud :

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Si on doit souder un métal à risque, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique. Par ailleurs, le métal d'apport doit être compatible avec le métal de base et le cordon de soudure doit être suffisamment large.

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure (FigII.2).

On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal [26].

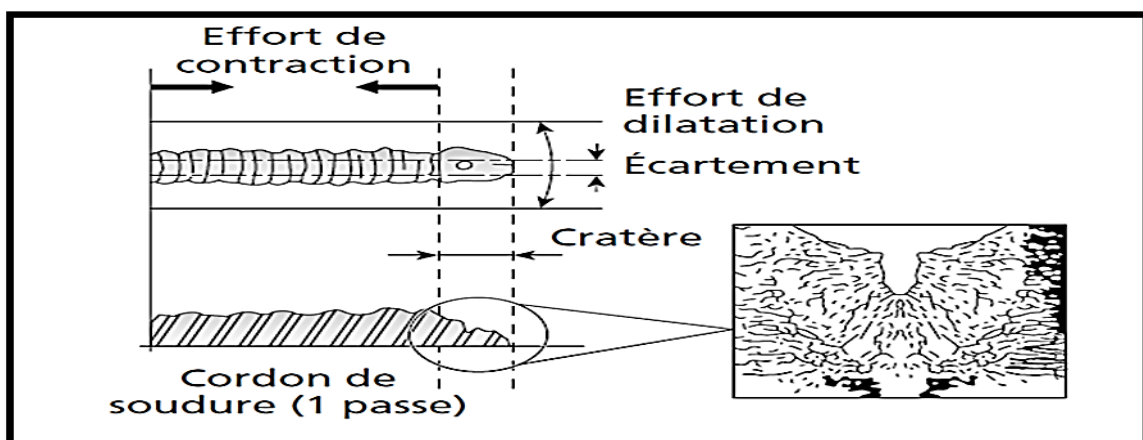


Figure II.2 : Fissure de cratère [23].

La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud, car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques (FigII.3).

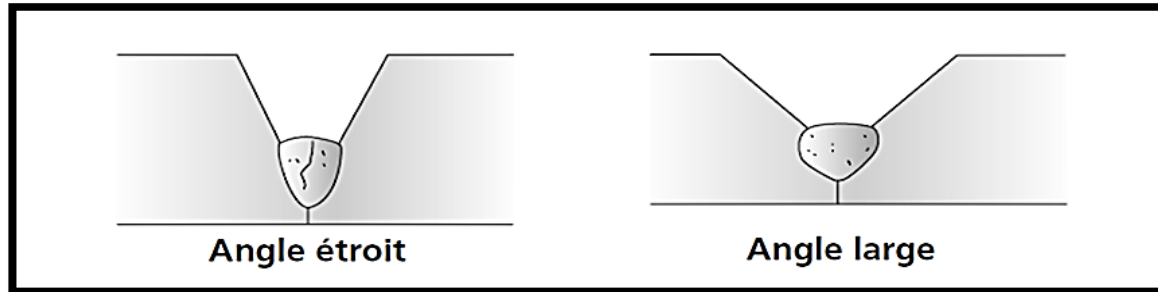


Figure II.3 : Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud [23]

I.2. Fissuration à froid :

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZTA (FigII.4) et elle est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid [23].

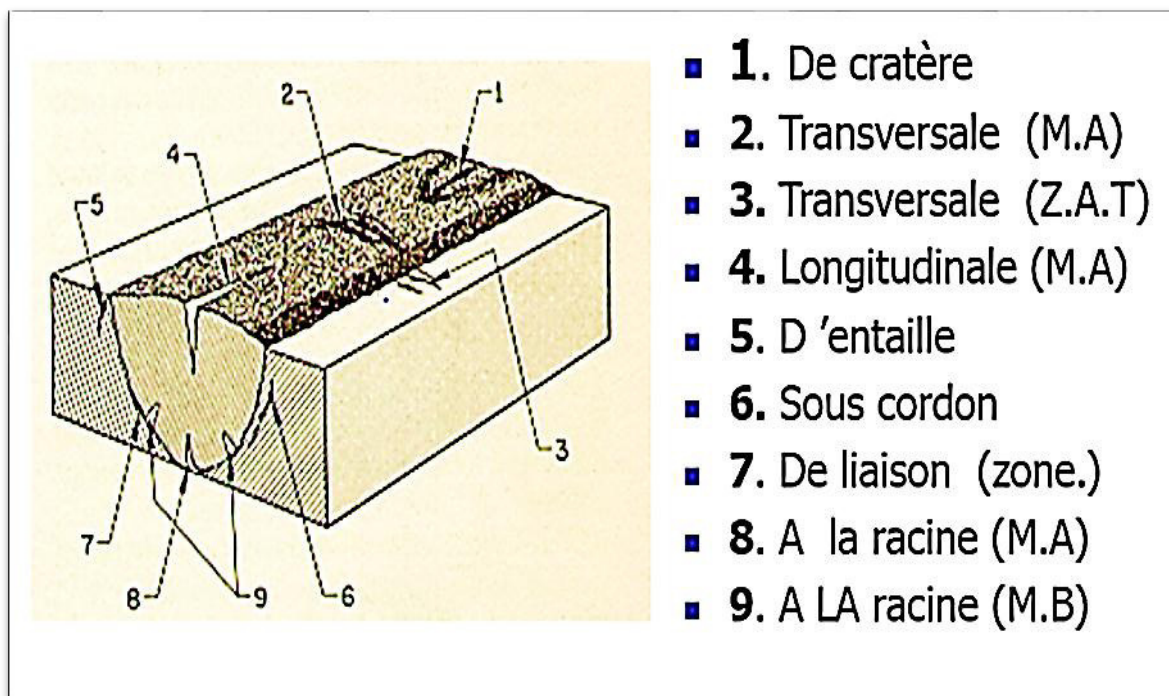


Figure II.4 : Type de fissures à froid [28].

Plusieurs facteurs influent sur la vulnérabilité d'une pièce à la fissuration à froid, dont les suivants :

- la trempabilité reliée au carbone équivalent ;
- la présence d'hydrogène due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;
- l'humidité dans l'air ;
- le refroidissement rapide de la pièce ;
- la présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.).

La meilleure prévention de la fissuration à froid est un préchauffage approprié des pièces à souder afin d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce (le préchauffage doit atteindre au moins 100 °C, soit la température d'ébullition de l'eau). On peut aussi choisir des électrodes préchauffées à basse teneur en hydrogène (basiques). On prend soin de refroidir les pièces susceptibles de fissuration à froid très lentement pour éviter l'apparition de tensions internes favorisant l'apparition de fissures [25].

I.3. Orientation des fissures :

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales, en fonction de leur orientation. Quand une fissure est parallèle à l'axe de la soudure, elle est appelée fissure longitudinale, peu importe qu'il s'agisse d'une fissure centrale dans le métal fondu ou une fissure dans la zone de jonction du métal de base affectée par la chaleur [30].

I.3.1. 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 [30].

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous (FigII.5).

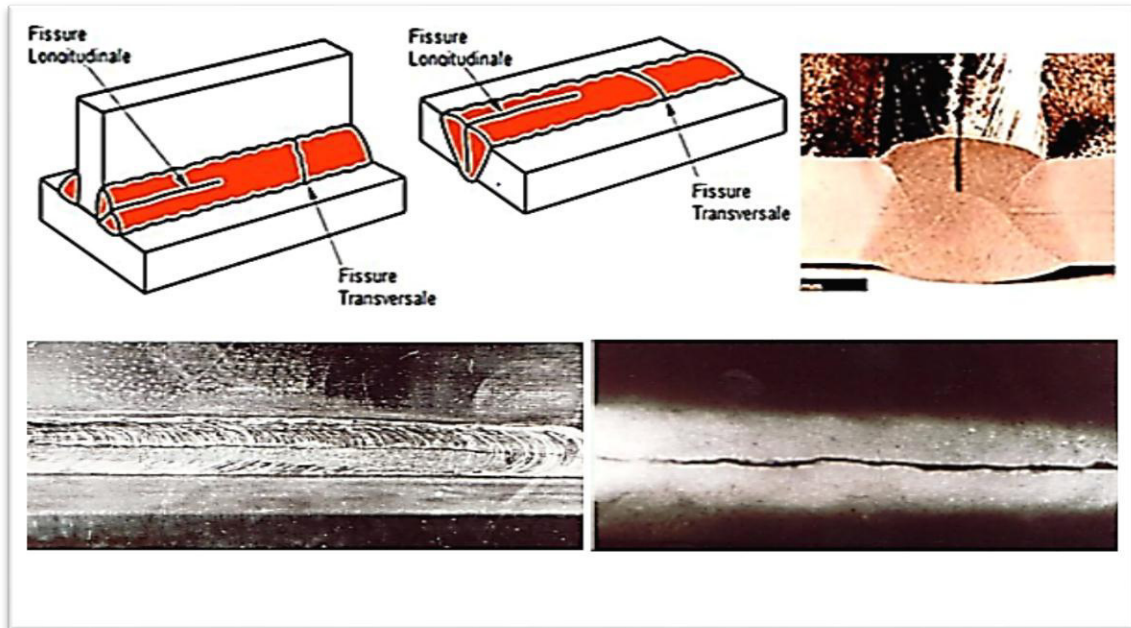


Figure II.5 : La fissure longitudinale [30].

I.3.2. 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 (FigII.6) [26].

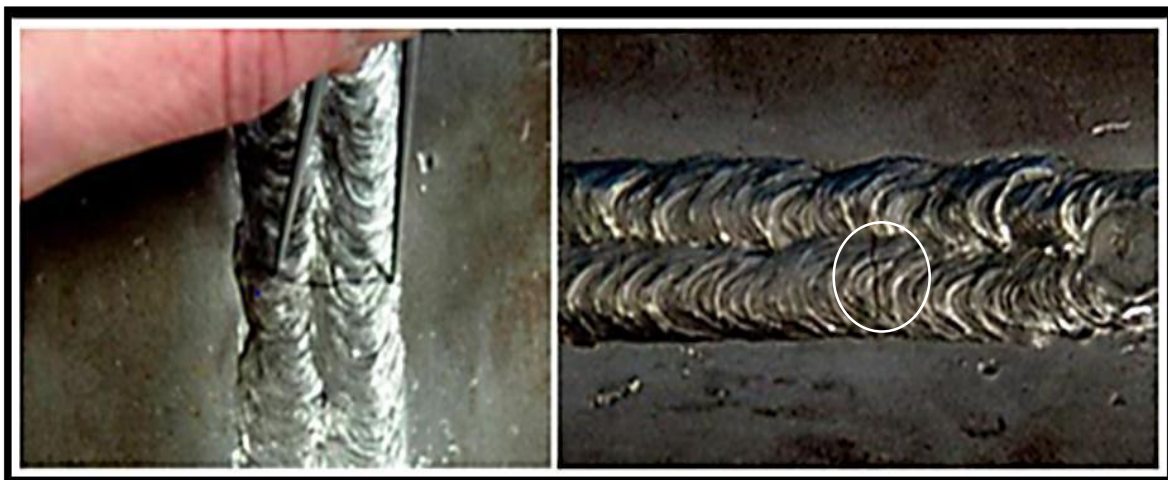


Figure II.6 : La fissure transversale [30].

I.4.Types de fissures par la direction :

La figure II.7 résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

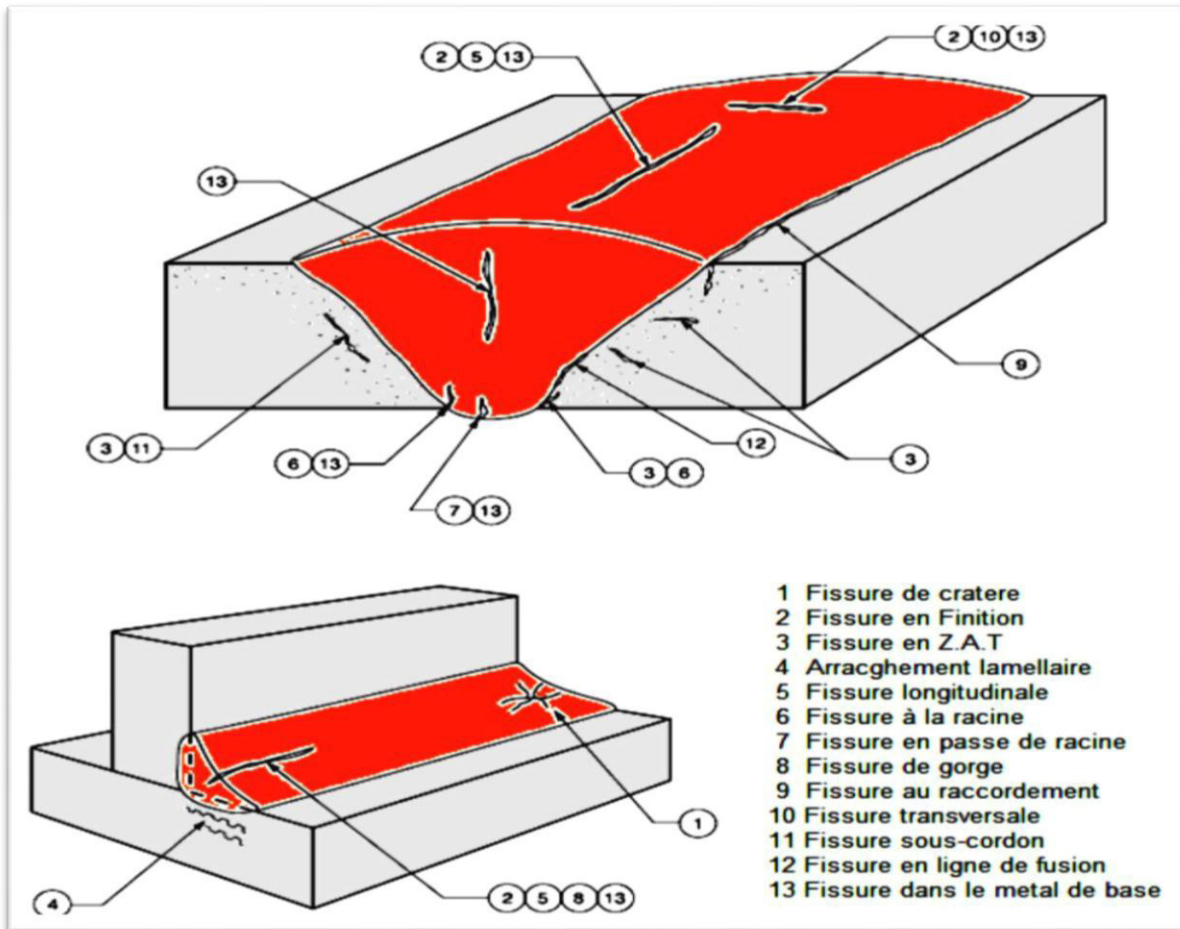


Figure II.7 : Les types de fissure [28].

I.5. Tableau présentant les Causes et les moyens de prévention liés à la fissuration [25] :

	Causes	Moyens de prévention
Fissuration à chaud	<ul style="list-style-type: none"> - Joints trop étroits - Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) - Métal d'apport incompatible avec le métal de base - Cordon trop petit - Trop de retrait durant ou après le soudage 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne mesure des angles des chanfreins - Préchauffage et chauffage en cours de soudure - Bon choix du métal d'apport - Refroidissement lent - Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) - Cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin - En cas de retrait, léger retour en arrière et ajustement de la procédure de soudage
Fissuration à froid	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrogène coincé dans la soudure - Tensions internes résiduelles importantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Préchauffage et chauffage en cours de soudure - Refroidissement lent - Utilisation d'électrodes basiques - Entreposage des électrodes dans un four, au chaud - Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) - Dessoudage (au besoin)

II.1. Inclusions :

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (FigII.8) [26].

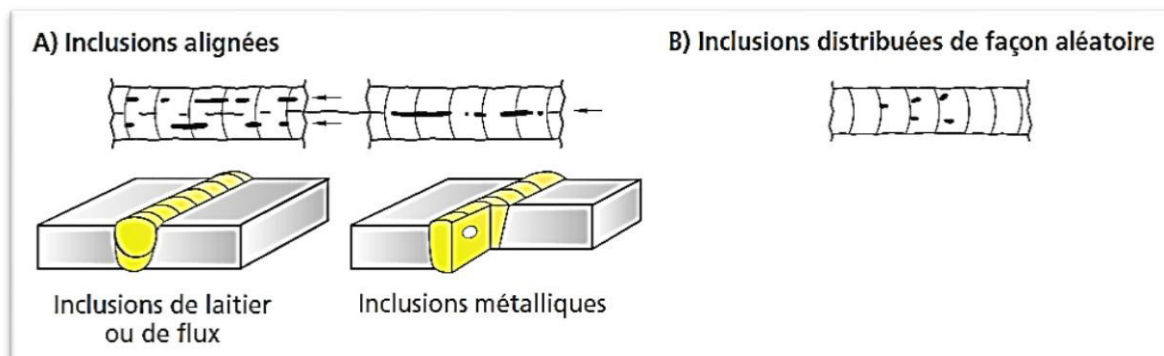


Figure II.8 : Défaut d'inclusions [23].

II.2. Types d'inclusions : le tableau I.2 résume les types d'inclusion.

Tableau I.2 types d'inclusion [26].

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières)
Inclusion de laitier	Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion de flux	Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification
Inclusion métallique	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger)

III.1.Retassures et criques de solidification :

À la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (FigII.9). Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une **retassure à la racine** apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une **retassure de cratère** est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante [25].

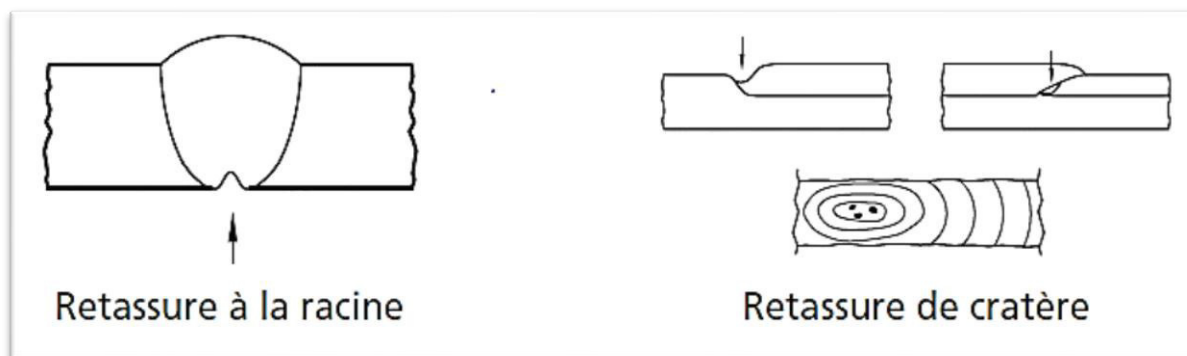


Figure II.9 : Retassure [26].

Image radiographique et visuelle présentées le défaut de retassure :

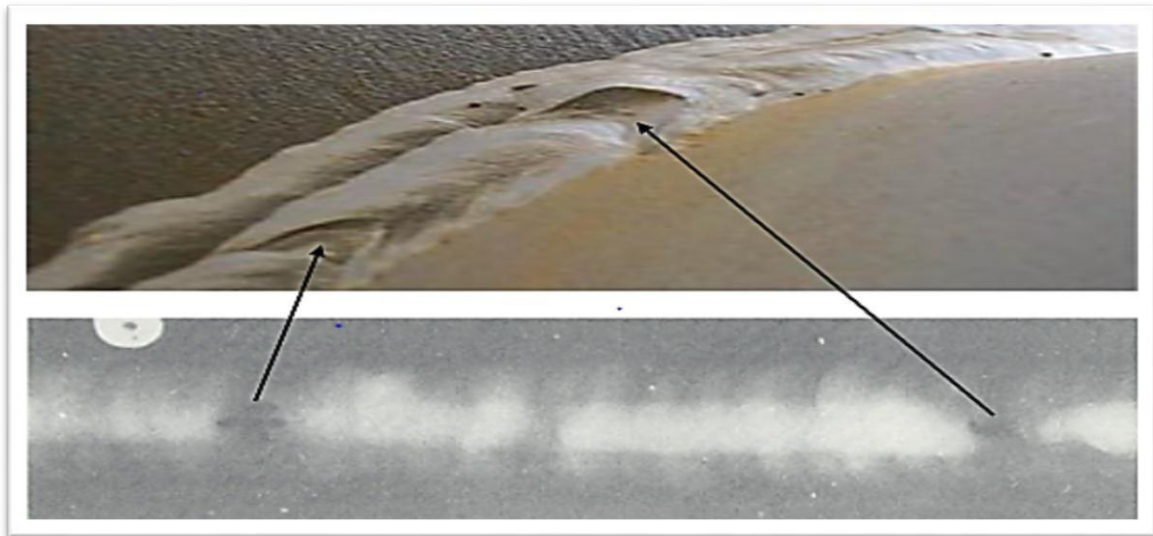


Figure II.10 : Radiographique et visuelle de retassure [28].

IV. Défauts de surface :

IV.1 Morsures/Caniveaux :

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (FigII.11). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut [26].

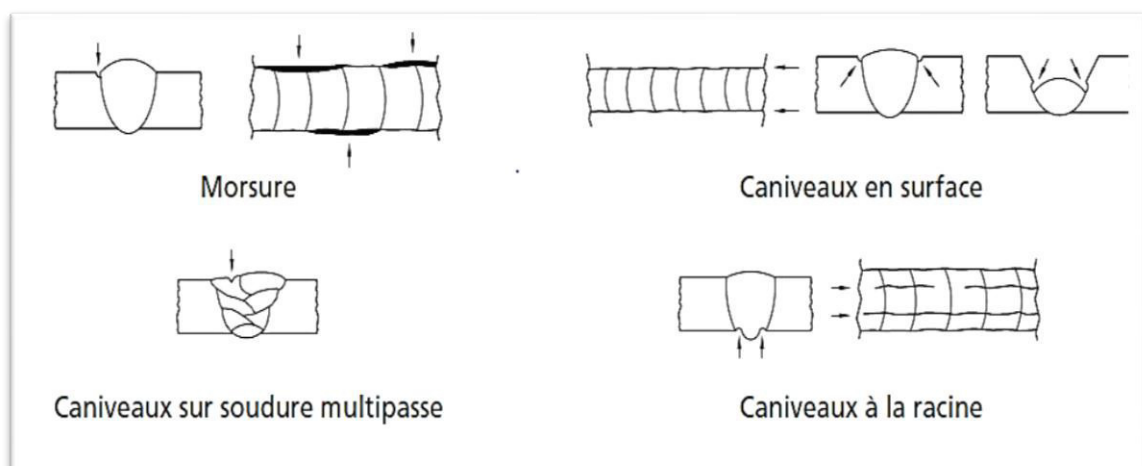


Figure II.11 : Défauts de surface Morsures/Caniveaux [26].

IV.2.Effondrements et trous :

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (FigII.12).

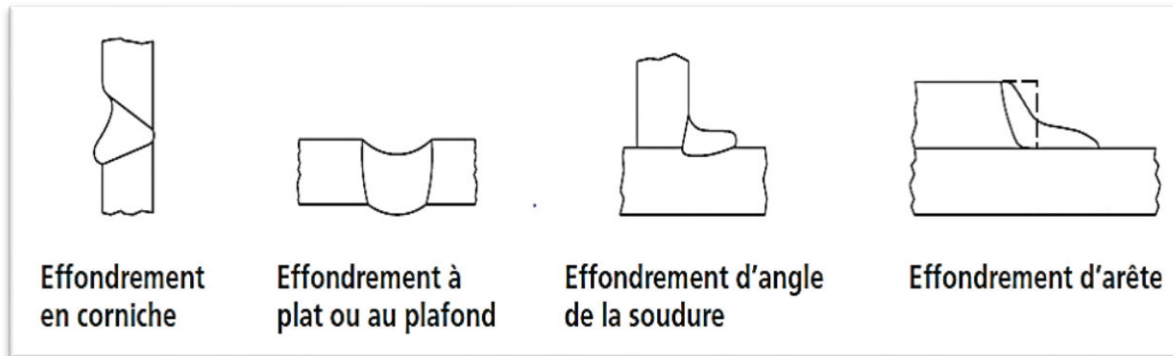


Figure II.12 : Types d'effondrements [23].

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou (FigII.13), 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 [23].

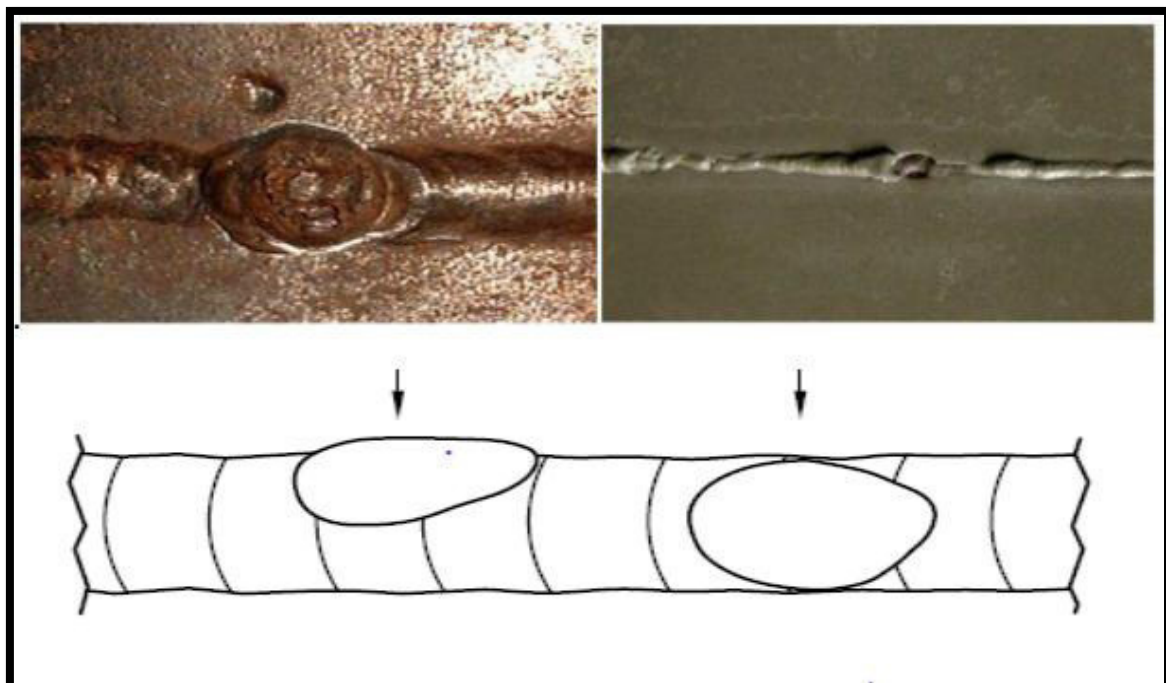


Figure II.13 : Défaut de trou [29].

V. Défauts géométriques du cordon :

V.1. Convexité et concavité :

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (FigII.14).

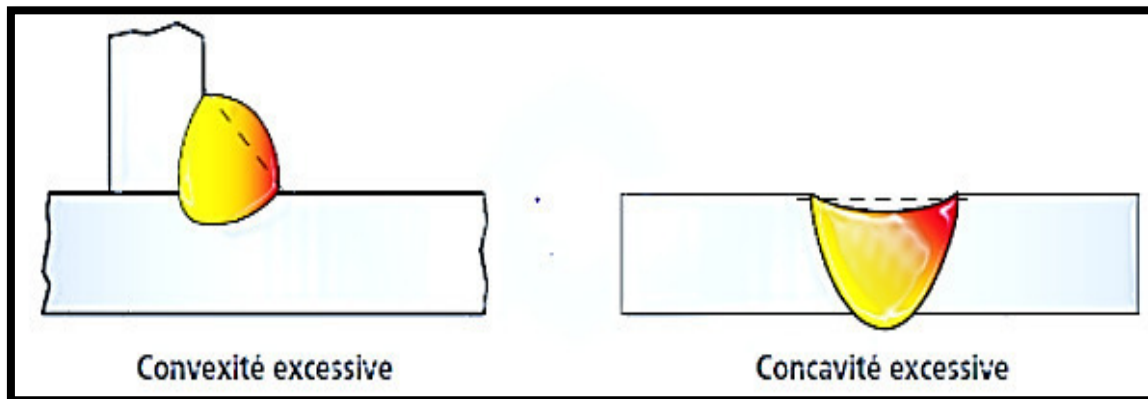


Figure II.14 : Convexité et concavité [23].

Aussi, une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure II.15). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu [26].

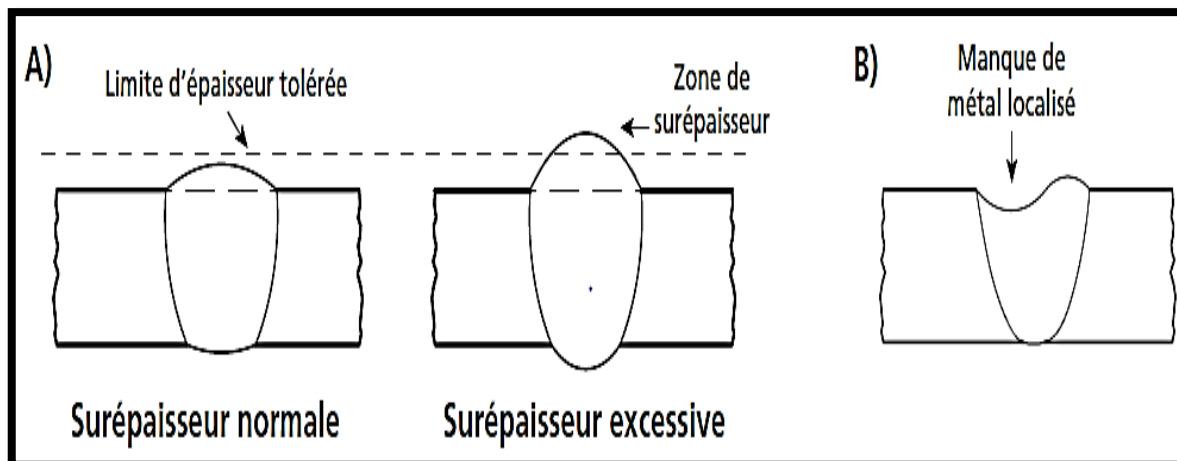


Figure II.15 : Surépaisseur [23].

V.2. Débordements du cordon :

Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier (FigII.16) [23].

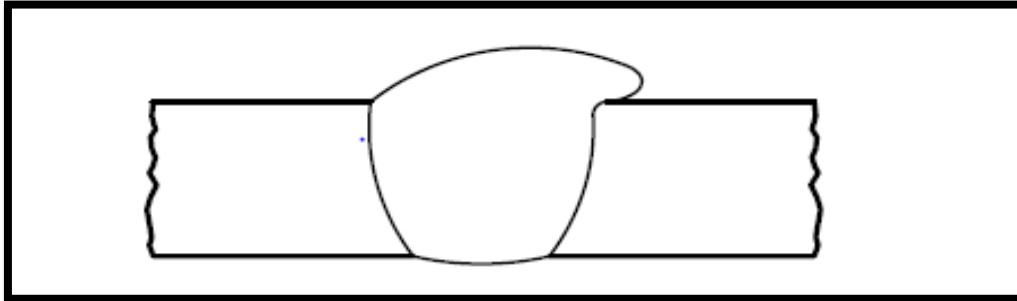


Figure II.16 : Débordement [28].

VI.1. Définition dénivèlement :

Un alignement incorrect des bords à souder dans une soudure bout à bout. Ceci mène à des contraintes locales qui peuvent surtout être nocives en sollicitations cycliques (fatigue) (FigII.17.).

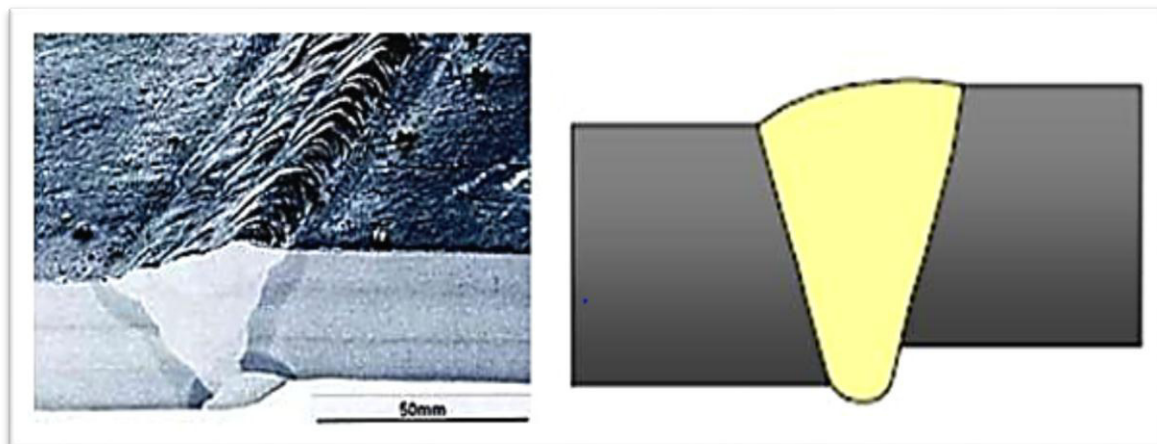


Figure II.17 : Dénivèlement [15].

VII. Défauts de pénétration :

VII.1. Définition excès de pénétration :

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multipasse, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé (FigII.18) [23].

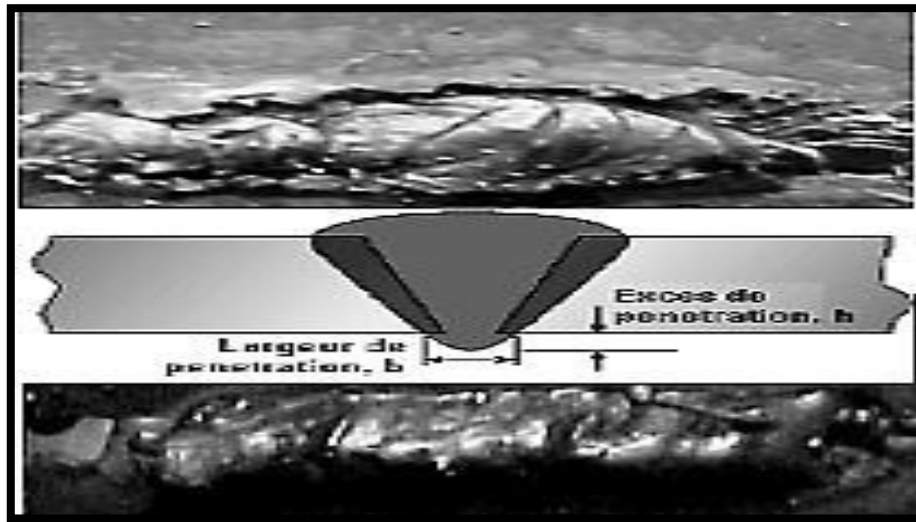


Figure II.18 : Excès de pénétration [31].

VII.2. Définition du manque de pénétration :

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci (Fig.II.19). Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure [23].

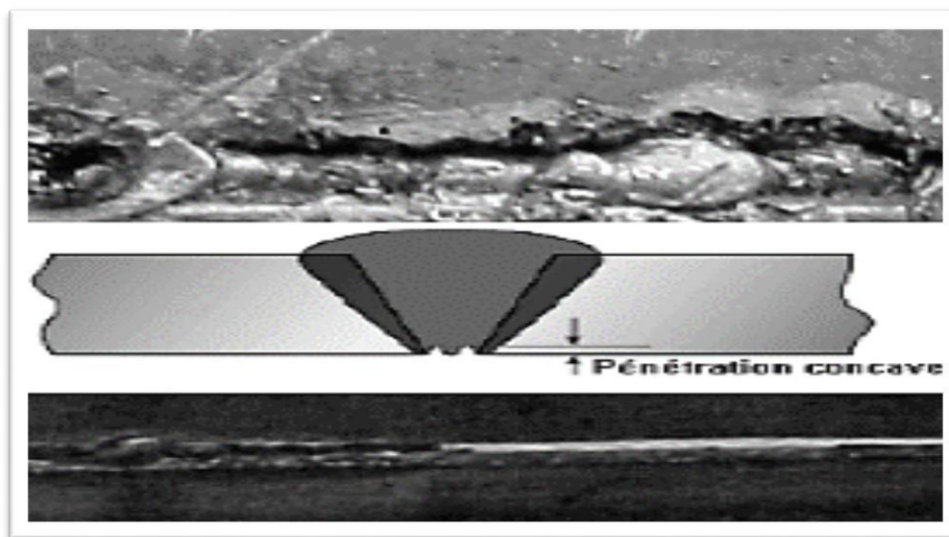


Figure II.19 : Manque de pénétration [31].

VII.2.1 Type manque de pénétration :

VII.2.2 Manque de pénétration sans dénivèlement

Un manque de pénétration sans dénivèlement se définit comme le manque de remplissage de la racine de la soudure. Cette condition est représentée schématiquement à la (Fig. II.20).

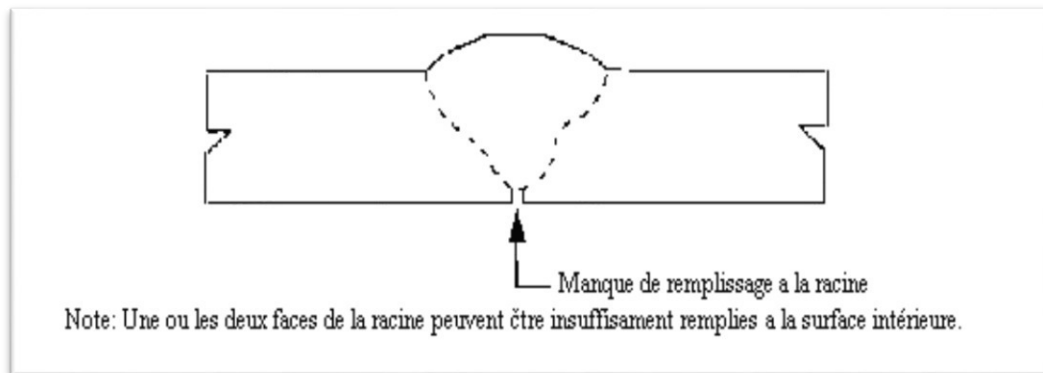


Figure II.20 : Manque de pénétration sans dénivèlement [29].

VII.2.3 Manque de pénétration dû à un dénivèlement :

Un manque de pénétration dû à un dénivèlement se définit comme la condition existante lorsqu'un bord de la racine est apparent (ou non lié) suite à un mauvais alignement des joints de tubes ou raccords adjacents. Cette condition est représentée schématiquement à la (Fig.II.21).

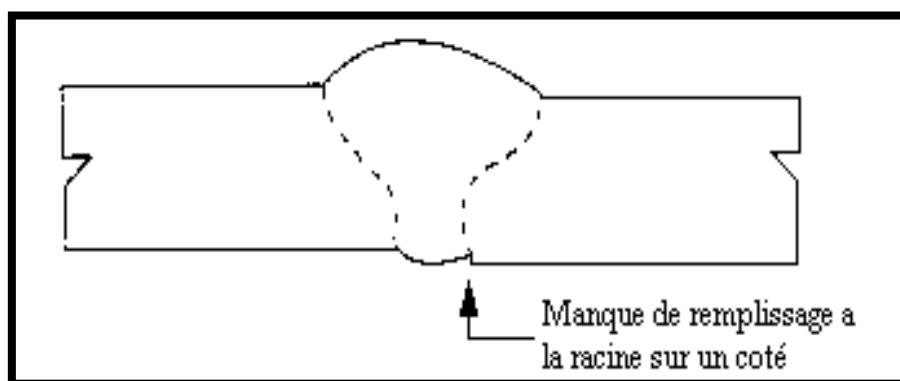


Figure II.21 : Manque de pénétration due à un dénivèlement [29].

VII.2.3 Manque de pénétration transversale :

Le manque de pénétration transversale se définit comme une imperfection subsurface entre la première passe intérieure et la première passe extérieure qui est causée par un manque

de pénétration des talons verticaux. Cette condition est représentée schématiquement à la (Fig. II.22).

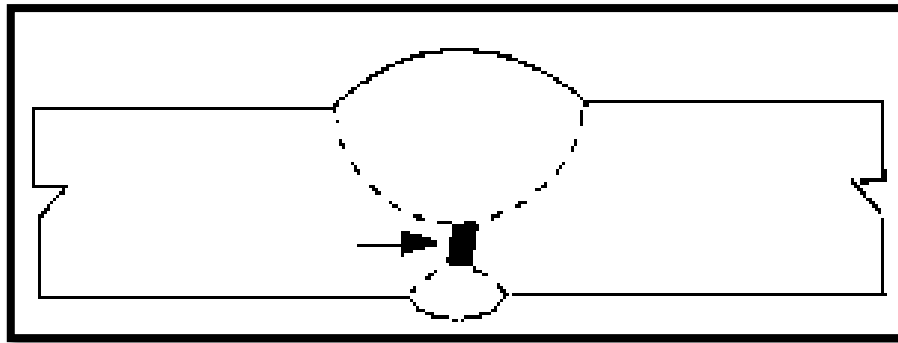


Figure II.22 : Manque de pénétration transversale [29].

VII.2.4. Causes possibles dans les défauts à excès de pénétration :

- Vitesse de soudage trop faible.
- Intensité du courant trop forte.
- Mauvaise préparation des bords.
- Trop de distance entre les pièces.
- Arc trop court.
- Manque d'expérience du soudeur.
- Jeu entre l'anneau-support et le métal de base lors du soudage sur anneau-support.

VII.2.2 Méthodes de détection :

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

VII.2.3 Méthodes de réparation :

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

VII.2.4 Mesures préventives :

- Diminuer l'écartement.
- Lors d'utilisation d'anneau supports, limiter le jeu.
- Adapter la vitesse de soudage et l'apport énergétique (Augmenter la vitesse).
- Éloigner la torche.
- Rapprocher les pièces.

VII.3.1 Causes possibles dans le défaut du manque de pénétration :

- Vitesse d'avance trop élevée.
- Intensité du courant trop faible.
- Chanfrein trop étroit ou absent.
- Métal de base trop épais et froid.

VII.3.2 Mesures préventives :

- Diminuer la vitesse.
- Augmenter l'intensité.
- Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces.
- S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée [23].

VII.3.4 Méthodes de détection :

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

VII.3.5 Méthodes de réparation :

- Eliminer le métal d'apport à partir de la face la plus accessible et réparer par soudage [23].

VIII .Manque de fusion :

VIII.1. Introduction :

Ce type de défaut est le plus couramment rencontré dans les travaux des soudures et notre travail se base sur l'étudier de ce phénomène et donner les causes et les remèdes pour corriger ces types d'imperfection.

VIII.2. Définition :

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure (Fig. II.23).

Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut.

Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons X puisqu'il n'a que deux dimensions. On le retrouve plus fréquemment avec le procédé GMAW. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs [23].

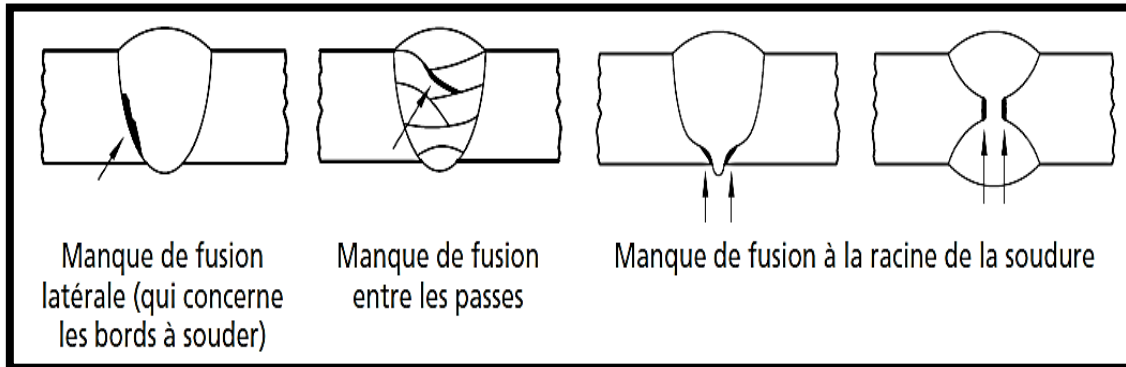


Figure II.23 : Collage ou manque de fusion [23].

VIII.3. Localisations possibles des manques de fusion :

Des manques de fusion peuvent apparaître (Fig. II.24) :

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

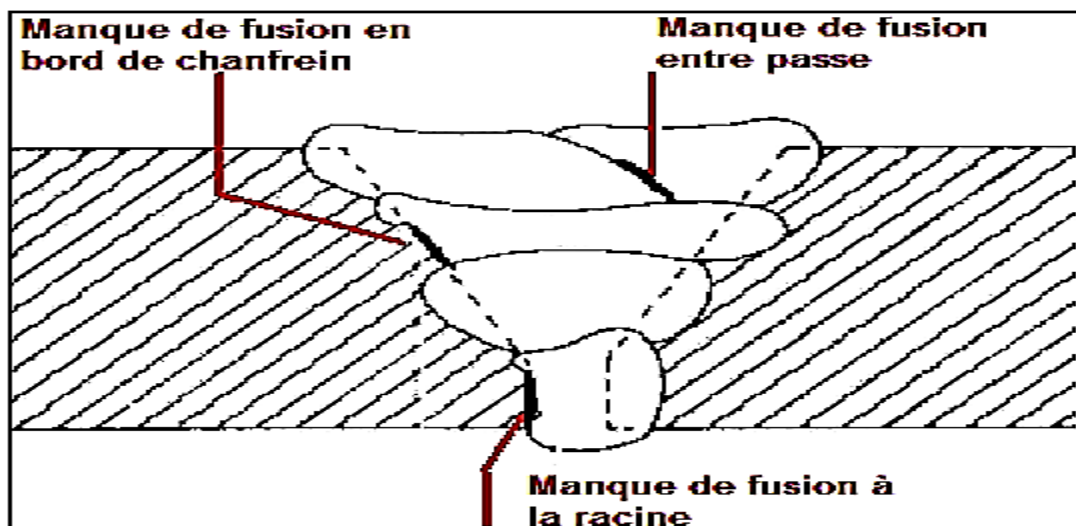


Figure II.24 : Localisations possibles des manques de fusion [28].

VIII.3.1 Le manque de fusion dû à un collage de point froid :

Se définit comme une imperfection entre deux cordons de soudure adjacents ou entre le métal de soudure et le métal de base qui n'est pas libre à la surface. Cette condition est représentée schématiquement à la (Fig. II.25) [29].

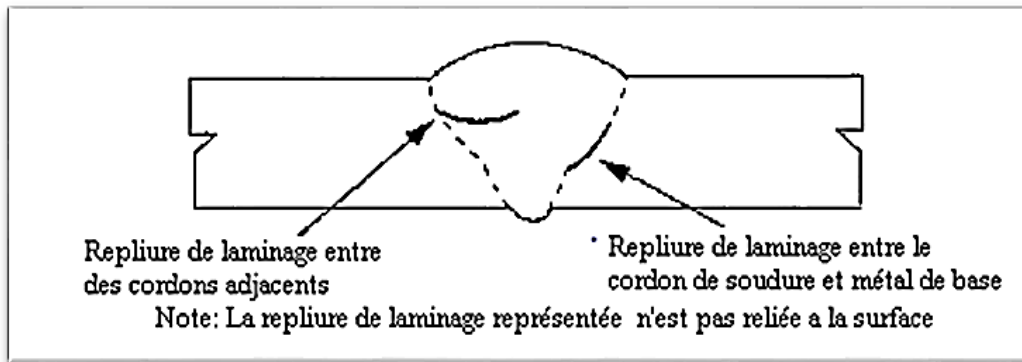


Figure II.25 : Manque de fusion dû à un collage de point [29].

VIII.3.2. Type de Manque de fusion dû à un collage de point froid :

VIII.3.2.1. Manque de fusion dans le flanc de la soudure :

VIII.3.2.1. Définition :

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (FigII.26)

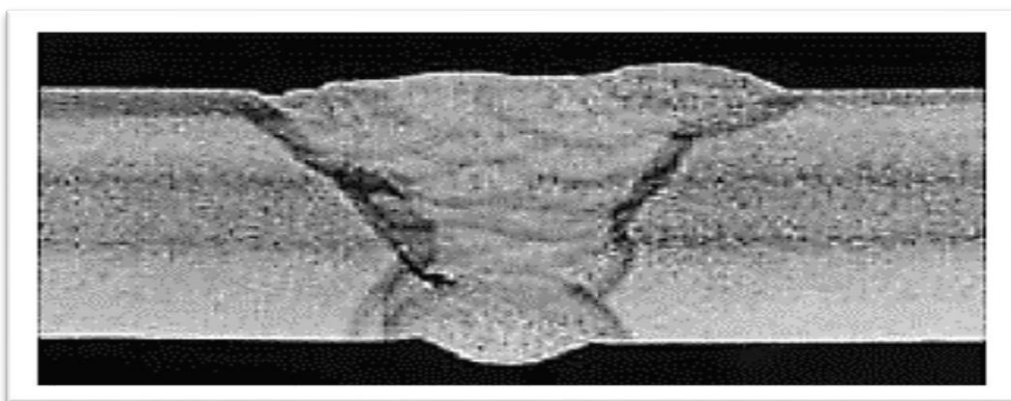


Figure II.26 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure [27].

VIII.3.2.2 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 [23].

VIII.3.2.3 Méthodes de détection :

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

VIII.3.2.4 Méthodes de réparation :

- Eliminer la partie défectueuse et ressouder.

VIII.3.2.5 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 [30].

VIII.4. Manque de fusion entre passes :

VIII.4.1 Définition :

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (FigII.27).

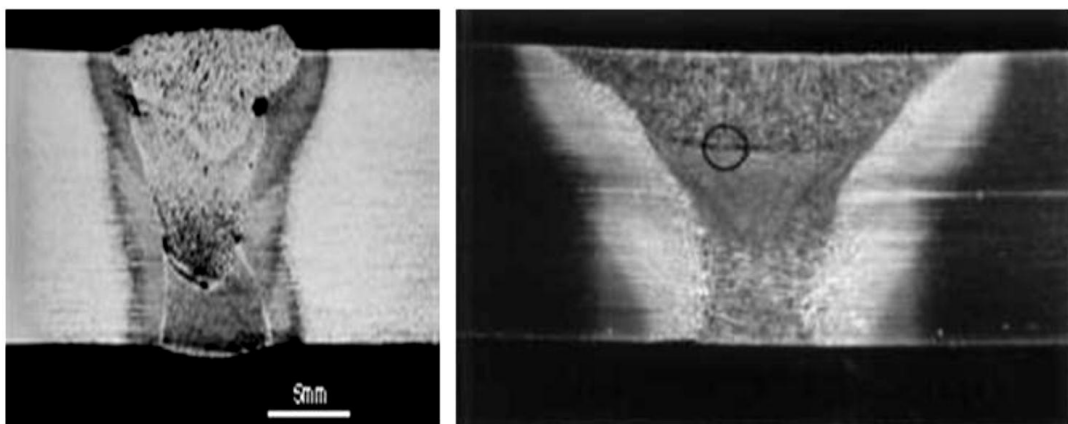


Figure II.27 : Manque de fusion entre passes [28].

VIII.4.2 Causes possibles et méthodes de détection et méthodes de réparation et mesures préventives :

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

VIII.5. Le manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint :

VIII.5.1. Définition :

Se définit comme une imperfection superficielle entre le métal de soudure et le métal de base qui est libre à la surface. Cette condition est représentée schématiquement à la (FigII.28) [29].

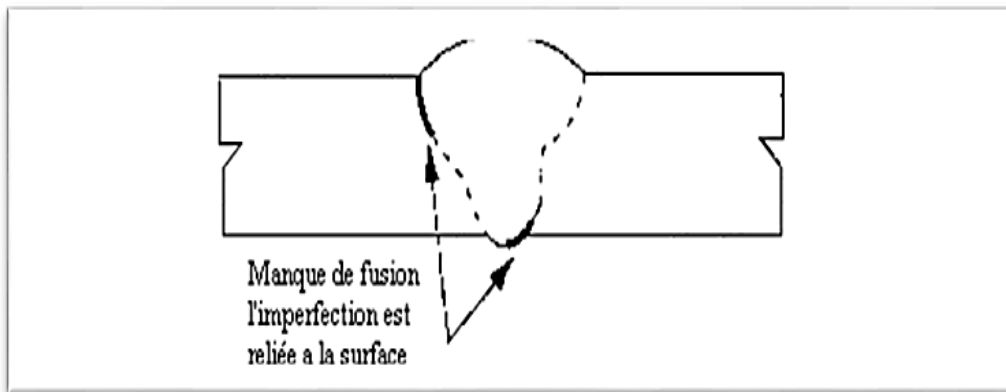


Figure II.28 : Manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint [29].

VIII.5.2. Type de Manque de fusion à la passe de fond au en haut du joint :

VIII.5.2.1 Manque de fusion à la racine de la soudure :

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 (FigII.29).

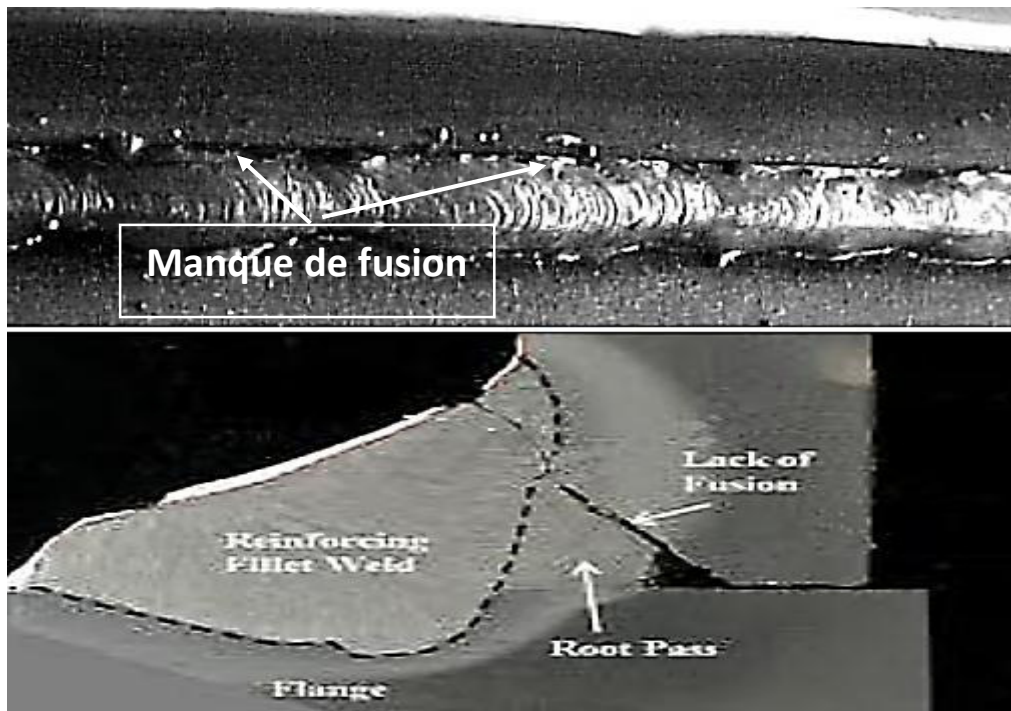


Figure II.29 : Manque de fusion à la racine de la soudure [31]

VIII.5.2.2. 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 [26].

VIII.5.2.3. 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.

VIII.5.2.4. 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.

VIII.5.2.5. Mesures préventives :

- Idem Manque de fusion dans le flanc de la soudure et surtout spécialement soigner préparation (écartement, méplat,...) [23].

Le tableau 3 montre les types de défaut de manque de fusion et leur réparation :

Paragraphe	Type d'Imperfection	Criteres de Rejet
9.3.1	Manque de Pénétration (IP) sans dénivèlement (Fig. 13)	A - Indication individuelle > 25 mm B - Longueur globale > 25 mm dans une longueur de 300 mm C - Longueur globale > 8% de la longueur soudée dans toute soudure de longueur < 300 mm
9.3.2	Manque de Pénétration (IPD) dû à un dénivèlement (Fig. 14)	A - Indication individuelle > 50 mm B - Longueur globale > 75 mm dans une longueur de 300 mm
9.3.3	Manque de Pénétration (ICP) Transversale (Fig. 15)	A - Indication individuelle > 50 mm B - Longueur globale > 50 mm dans une longueur de 300 mm
9.3.4	Manque de Fusion (IF) (Fig. 16)	A - Indication individuelle > 25 mm B - Longueur globale > 25 mm dans une longueur de 300 mm C - Longueur globale > 8% de la longueur soudée dans toute soudure de longueur < 300 mm
9.3.5	Manque de Fusion (IFD) dû à un collage de point froid (Fig. 17)	A - Indication individuelle > 50 mm dans une longueur de 300 mm B - Longueur globale > 50 mm dans une longueur de 300 mm C - Longueur globale > 8% de la longueur soudée
9.3.6	Concavité interne (IC) (Fig. 18)	Les criteres relatifs au perçage s'appliquent aux concavités internes dont la densité est > à celle du métal de base
9.3.7	Perçage (BT) Tube de Ø ≥ 60,3 mm (2")	A - Dimension max. > 6 mm et densité > à celle du métal de base adjacent le plus mince B - Dimension max. > épaisseur la plus mince et densité > à celle du métal de base adjacent le plus mince C - Somme des Dimensions max. dont la densité est supérieure à celle du métal de base > à 13 mm dans une longueur de 300 mm ou la longueur soudée totale (prendre la plus faible de ces 2 dernieres valeurs)
	Perçage (BT) Tube de Ø < 60,3 mm (2")	A - Dimension max. > 6 mm et densité > à celle du métal de base adjacent le plus mince B - Dimension max. > épaisseur la plus mince et densité > à celle du métal de base adjacent le plus mince C - Plus d'un Perçage est present et densité de n'importe quel perçage est > à celle du métal de base adjacent le plus mince
9.3.8	Inclusions de Laitier Tube de Ø ≥ 60,3 mm (2") ESI = Inclusion de laitier allongée (1) ISI = Inclusion de laitier individuelle Note (1) : Des indications d'ESI parallèles séparées approximativement par la largeur de la passe de fond (voies de roulage) seront considérées comme une seule indication à moins que la largeur de l'une d'elles >(0,8 mm). Dans ce cas, elles seront considérées comme des indications indépendantes.	A - Longueur d'une ESI > 25 mm B - Longueur globale des ESI > 50 mm dans une longueur de 300 mm C - Largeur d'une ESI > 1,6 mm D - Longueur globale des ISI > 13 mm dans une longueur de 300 mm E - Largeur d'une ISI > 3 mm F - Plus de 4 ISI de largeur max. ≤ 3mm dans toute soudure de longueur < 300 mm G - La longueur globale des ESI et ISI > à 8% de la longueur de soudure
	Inclusions de Laitier Tube de Ø < 60,3 mm (2") ESI = Inclusion de laitier allongée (1) ISI = Inclusion de laitier individuelle	A - Longueur d'ESI > 3 fois l'épaisseur de la plus mince des épaisseurs de parois soudées B - Largeur d'une ESI > 1,6 mm C - Longueur globale d'ESI > 2 fois l'épaisseur de la plus mince des épaisseurs nominales de parois la largeur dépasse la moitié de l'épaisseur de la plus mince des épaisseurs nominales de parois D - La longueur globale des ESI et ISI > à 8% de la longueur de soudure
9.3.9	Porosité Individuelle (ou Eparse)	A - La taille d'un pore individuel dépasse 3 mm B - La taille d'un pore individuel dépasse 25% de l'épaisseur de paroi la plus mince C - La répartition de porosité éparsée dépasse la concentration permise aux figures 19 et 20
	Porosités Groupées en Nids	A - Le diamètre du nid dépasse 13 mm B - Longueur globale de nids de porosités > 13 mm dans une longueur continue de 300 mm C - Un pore individuel au sein d'un nid est > 2 mm
	Porosité de cordon creux	A - La longueur individuelle d'un cordon creux dépasse 13 mm B - Longueur globale de cordons creux > 50 mm dans toute longueur continue de 300 mm C - Des indications individuelles, chacune > 6 mm sont séparées de moins de 50 mm. D - La longueur globale des indications de cordons creux > 8% longueur de soudure.
9.3.10	Fissures Note : Les fissures à cratère peu profond ou en étoile se situent aux points d'arrêt des cordons de soudure et résultent des contractions du métal de soudure pendant la solidification.	A - Si la fissure, indépendamment de sa taille ou de son emplacement dans la soudure, n'est pas une fissure à cratère peu profond ou en étoile. B - La fissure est une fissure à cratère peu profond ou en étoile dont la longueur > 4 mm.
9.3.11	Caniveaux EU = Caniveaux Externe EI = Caniveaux Internes Note : Voir au paragraphe 9.7 les normes d'acceptation pour les caniveaux quand on fait appel à des mesures visuelles et mécaniques.	A - La longueur globale des indications de caniveaux (Internes et externes) , dans n'importe quelle combinaison, sur toute longueur de soudure continue de 300 mm dépasse 50 mm. B - La longueur globale des indications de caniveau (Interne et externe) , dans n'importe quelle combinaison, dépasse un sixième de la longueur de soudure.
9.3.12	Accumulation d'Imperfections Note: A l'exception du manque de pénétration dû à un dénivèlement et des caniveaux	A - La longueur globale des indications sur toute longueur de soudure de 300 mm > 50 mm. B - La longueur globale des indications dépasse 8% de la longueur de soudure.

Tableau I.3 : Types d'imperfection et leurs réparations [32]

Introduction :

Ce chapitre présente le soudage a COSIDER, le prélèvement et la préparation des échantillons, ainsi les techniques de caractérisation utilisées dans notre travail de recherche.

I.1. Présentation de l'entreprise COSIDER Biskra :

Cosider a été créé le 1er janvier 1979 sous forme de société d'économie mixte par la Société nationale sidérurgique (SNS) et le groupe danois Christiani et Nielsen.

En 1982, elle devient filiale à 100% de la SNS suite au rachat par cette dernière des actions du partenaire danois. Une fois transformée en société par actions, suite à l'application de la loi portant autonomie financière des entreprises publiques en 1989, elle a su exploiter diverses opportunités lui permettant, contrairement à ses concurrents, d'intervenir dans des activités autres que le bâtiment et les travaux publics. Ce qui fait, aujourd'hui, de COSIDER le plus grand groupe algérien du BTPH avec un capital social de 4,335,000,000 de dinars, un chiffre d'affaires (2004) de 22,550 millions de dinars et un effectif total, toutes catégories confondues, de 14,228 agents. Ses réalisations mettent à son actif le plus grand nombre de barrages, hydrauliques construits ainsi que le plus grand palmarès dans la pose de pipelines [33].

I.2. La diversité de l'activité à travers les filiales :

Détenteur à 100% du capital de ses neuf filiales, le groupe COSIDER a la particularité d'intervenir dans des domaines aussi nombreux que divers. A travers sa filiale COSIDER Travaux publics, il lui est permis d'intervenir dans les travaux d'ouvrages souterrains et maritimes, routes et autoroutes, aérodromes et ouvrages d'art. Sa deuxième filiale, COSIDER Construction, intervient, elle, dans le bâtiment, le génie civil industriel et les ouvrages d'art dans les stations d'épuration et de traitement des eaux. La filiale Canalisations assure la construction de pipelines (Fig.42.), des canalisations hydrauliques et diverses installations hydrauliques. La quatrième filiale active pour la production, la transformation et la commercialisation des matériaux de carrières dont les agrégats pour le béton. La cinquième est la filiale Alrem spécialisée dans la maintenance et la rénovation des matériels de travaux publics et la commercialisation de pièces de rechange. Alsim, elle, intervient dans la réhabilitation des équipements, notamment la chaudronnerie, la réalisation de charpentes métalliques et de coffrage pour le bâtiment. Cometal agit dans le négoce de produits sidérurgiques, COSIDER Promotion dans la conception, la réalisation et la vente de logements, et enfin Agral qui intervient dans la mise en valeur des terres et l'industrie agroalimentaire [33].



Figure III.1 : Pipe au niveau de COSIDER.

II.1.Procédés de soudage à COSIDER :

On note qu'au niveau de l'entreprise COSIDER, il utilise généralement le soudage à l'arc électrique. Le soudage a pour but de tester les vannes et aussi de souder plusieurs tubes en acier. Les caractéristiques de ce poste de soudure (Fig.III.2) sont indiquées dans le tableau 1.



Figure III.2 : Poste de soudure à l'arc électrique.

Tableau 1 : Caractéristiques de poste de soudage [25] :

Mode de soudage	Plage de courant de soudage	Puissance nominale	Tension à vide max.	Courant génératrice nominal	Moteur	Contenance en carburant
CC/DC	55 – 500 A (Modèles CC) 15 – 500 A (Modèles CC/CV)	Modèles export : 300 A, 32 Volts DC facteur de marche 100% 430 A, 37 Volts DC facteur de marche 60%	95 v	Standard Monophasé, 4 kVA/kW, 34/17 A,120/240 V AC, 50/60 Hz Option puissance génératrice triphasée*	Perkins 404D-22 refroidissement aère, à quatre cylindre, Moteur Diesel 32,6 HP	95 L
CV/DC (Modèles CC/CV uniquement)	14 – 40 V	300 A,29Volts DC (CV) facteur de marche 100% 430 A,36Volts DC (CV) facteur de marche 60% Autres modèles : 400 A, 36 Volts DC facteur de marche 100% 450 A, 38 Volts DC facteur de marche 60% 500 A, 30 Volts DC (CC),34 Volts DC (CV)	56 v	Monophasé/Tr iphasé, 12/15 kVA/kW, 50/36 A,120/240 V AC,60 Hz En plus de la puissance génératrice 4 kVA/kW standard		

On note qu'à COSIDER, il existe deux types de soudage, le soudage manuel et le soudage automatique ou semi-automatique.

II .2.Soudage Manuel :

Durant mon stage pratique à COSIDER CANALISATION on a réalisé la continuité de deux tubes d'acier X60 par assemblage en utilisant le soudage à l'arc électrique, selon le procédé de « soudage avec électrodes enrobées » (Fig.III.3).



Figure III.3 : Soudage à l'arc électrique à COSIDER.

Plusieurs joints de soudure ont été obtenus (Fig.III.4).



Figure III.4 : Un joint de soudure obtenu par le procédé de soudage à l'arc électrique.

II.3. Étapes du processus de soudage des pipelines :

➤ 1^{ère} Étape :

Préparation du chanfrein :

Cette étape vient juste avant le soudage et qui est très nécessaire pour le dépôt du métal d'apport (Fig.III.5.).



Figure III.5 : Préparation du chanfrein.

La figure III.6 montre les types des chanfreins.

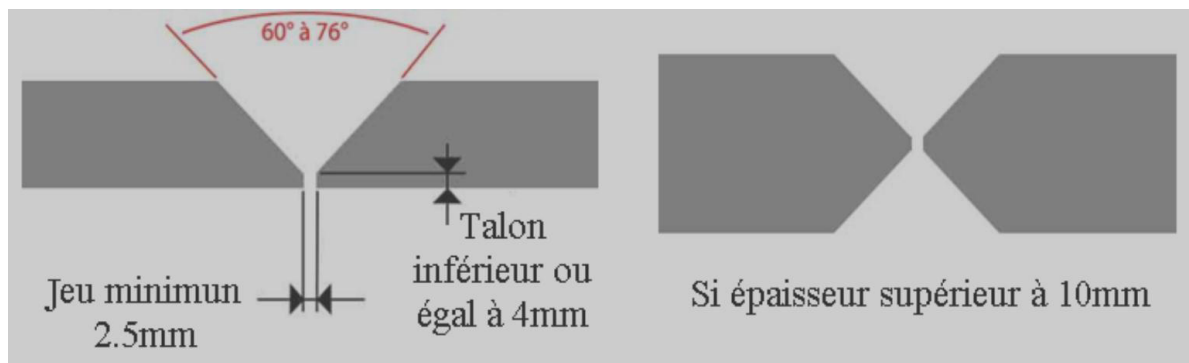


Figure III.6 : Types des chanfreins (chanfrein V, chanfrein X) [31].

➤ 2^{ème} Étape :

Chauffer la pièce à 120°C par le chalumeau et aussi la baguette, afin d'éliminer l'humidité.



Figure III.7 : Le chauffage de la pièce par le chalumeau.

On note qu'un séchoir spécial est utilisé pour extraire l'humidité des baguettes (Fig.III.8)



Figure III.8 : Séchoir des baguettes

➤ **3^{ème} Étape :**

Souder la pièce par l'arc électrique à trois étapes différentes :

Etape 1 : Normalement, pendant le procédé de soudage le fil de la baguette est relié au pôle positif(+) et la masse (-) à la pièce.

Cependant, pour le début de soudage du pipe, on inverse les pôles du poste de soudure c'est-à-dire (le moins (-) devient le plus (+) et le plus (+) devient le moins (-), pour faire pénétrer l'arc dans le joint de soudure par la baguette. (Fig. III.9) :



Figure III.9 : La première passe de soudage

➤ **3^{ème} Etape :**

Dans cette étape, on remet les pôles à leurs position initial, c'est-à-dire le (+) avec le (+) et le (-) avec (-), et ensuite on charge le joint de soudure par baguette (on effectue plusieurs passes et qui dépendent de l'épaisseur du pipeline 1, 2,3...). (Fig. III.10)

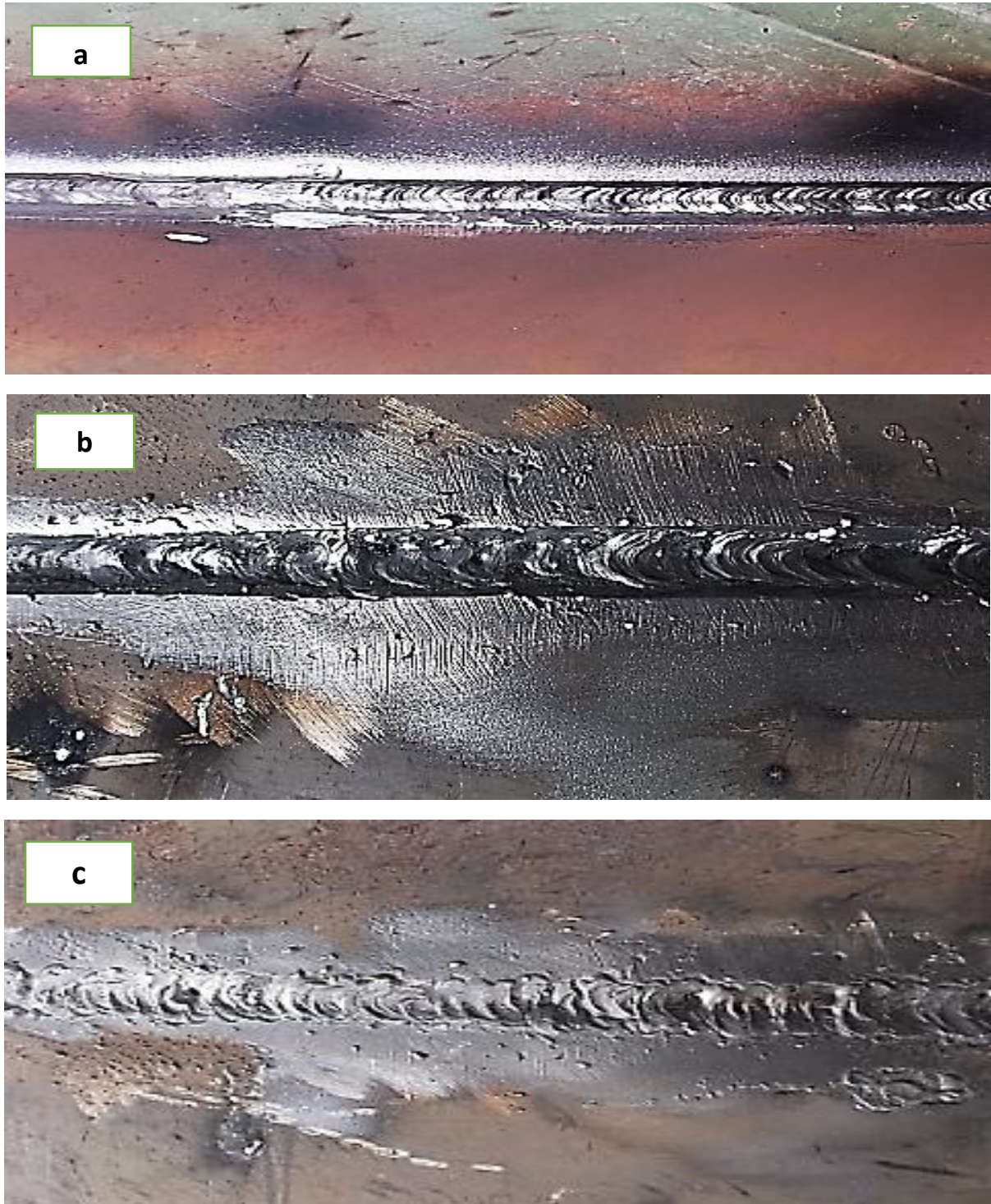


Figure III.10 : Le joint de soudure obtenu après soudage par la 2^{ème} passe (Fig. a), et la 3^{ème} passe (Fig. b), et la 4^{ème} passe (Fig. c).

➤ 4^{ème} Etape (finition) :

Le soudeur déposé une couche très fine par le procédé de soudage pour avoir un joint de soudure fini.



Figure III.11 : La finition du soudage après 4 passes de l'acier X60 soudé manuellement avec l'électrode enrobée.

III. Identification du métal de base et du métal d'apport :

III.1. Métal de base :

Le métal de base est un acier au carbone de type 5L grade X60 selon la norme API.

La figure III.12 illustre le certificat d'analyse de la composition de cet acier selon la norme API.

CERTIFICATE OF ANALYSIS									
N°: 968	Date: 08/05/08								
Ref. Alloy:	Operator: ADEM ÜNAL								
Customer: 07/071	Order: 07/071								
This is to certify that the goods									
Goods: 083 K Ø 609,6 X 12,7 mm	Sample: X 60 Cast: HEAT NO: 812298-2 Qt:								
have this chemical analysis:									
	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mb%	Ni%	Co%
Report	0.095	0.190	1.390	0.013	0.005	0.029	0.038	0.005	0.004
Reference	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Al%	Be%	Cu%	Nb%	Ti%	V%	W%	N%	Fe%
Report	0.048	0.000	0.026	0.042	0.016	0.046	0.010	0.004	98.039
Reference	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Notes : This chemical analysis is done according to ASTM A 751 standard by optical emission vacuum spectrometric analysis technique. / Bu kimyasal analiz ASTM A 751 standardına göre optik emisyon spektrel analiz tekniği ile yapılmıştır.									
Q.C. manager :									

Figure III.12 : Certificat d'analyse de la composition chimique d'acier micro allié du type X60 suivant les normes API

III.2. Métal d'apport (les électrodes) :

Le tableau 2 rassemble la composition chimique des électrodes utilisées.

Tableau .2 : Composition chimique d'électrodes utilisées [35].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo
0.05	0.32	0.87	0.013	0.006	0.03	0.71	0.039	0.01	0.01

La figure III.13 montre les baguettes utilisées



FigureIII.13 : Les baguettes de soudage.

III.3. Réalisation de joints de soudure à COSIDER :

Pour avoir des joints de soudure contenant des défauts et surtout le manque de fusion, on a appliqué différents courants électrique.

On a remarqué que ce défaut, se forme pour des faibles courants, de même, l'absence d'un préchauffage a aussi un effet sur la formation de défaut de manque de fusion.

IV.1. Contrôles non destructifs(CND) :

La technique la plus utilisés à COSIDER est le contrôle par la radiographie.

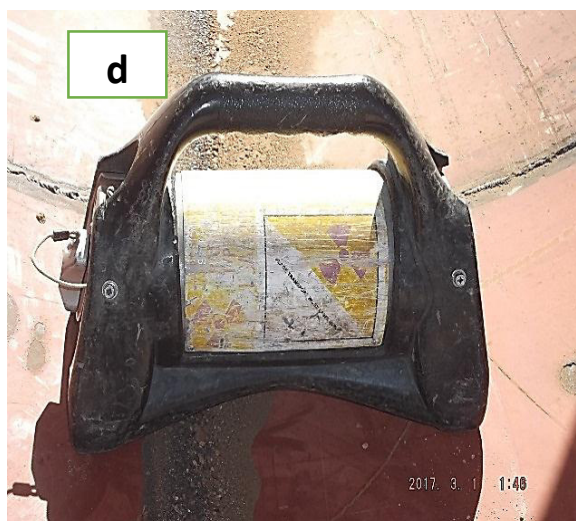
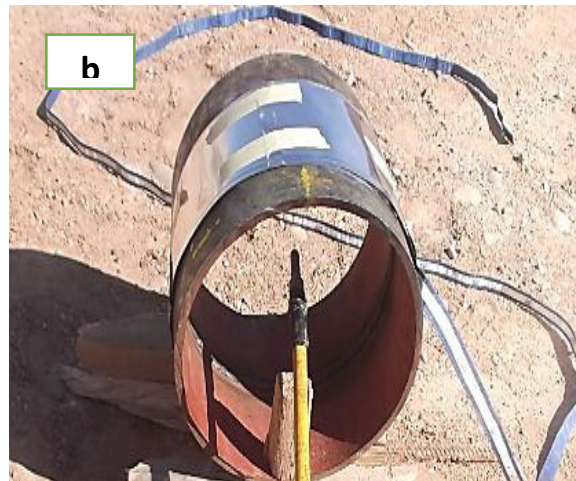
La radiographie industrielle est un essai de contrôle non destructif qui permet de mettre en évidence des hétérogénéités physique (craques, retassures, inclusion, etc...) ou chimiques (ségrégations majeures d'éléments de numéros atomiques très différents) par absorption différentielle de rayons X et qui impressionnent une émulsion photographique. La lecture des différences de noircissement au négatoscope permet de détecter et d'identifier les défauts.

IV.2. Principe :

Le principe du contrôle radiographique est de placer l'objet à contrôler entre une source de rayonnement (X ou gamma) et une émulsion photographique (Films Radiographique). Le noircissement du film (après développement) dépend de la quantité de rayonnement reçu par le film.

IV.2.1. Les sources de rayonnements :

Les sources de rayonnements ionisants sont choisies en fonction de la nature des matériaux à contrôler, de l'épaisseur traversée, de la qualité d'image demandée et des conditions technique de réalisation (Fig.III.14).



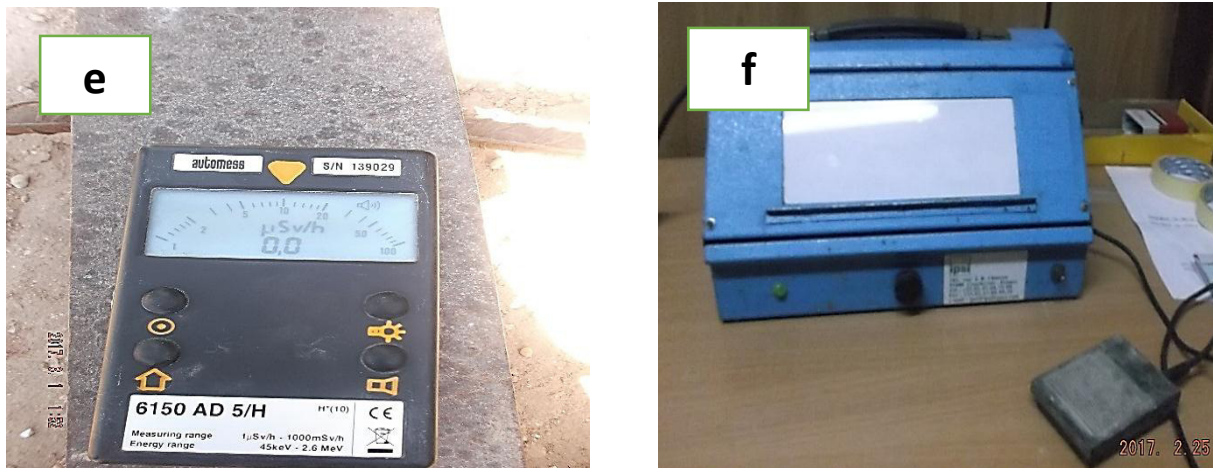


Figure III.14 : Méthode et l'appareillage de contrôle radiographique (a) le film Radiographique (b) position le film Radiographique de l'échantillon (c) d'installation de radiographie (d) porte sources (e) mesure de la propagation du rayonnement (f) détecteur optique.

V.1. Prélèvement des échantillons :

Afin d'étudier les défauts de soudure des cordons de soudage, nous avons prélevé quelques échantillons. Le prélèvement est effectué par tronçonnage en utilisant une meule comme le montre (Fig. III.15).



Figure III.15 : Prélèvement des échantillons.

V.2. Contrôle par ressuage :

V.2.1. Principe :

Le contrôle par ressuage permet de détecter des défauts de compacité, parfois très fins, débouchant en surface et non obstrués (fissures, porosités, replis, manque de liaison) sur des

matériaux métalliques non poreux et non absorbants. Ce contrôle est réalisé à l'aide de produits (les pénétrants) à très faible tension superficielle qui pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface. Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces, l'apparition visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts [35].

V.2.2.Applications du contrôle par ressuage :

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

V.2.3.Méthode de mise en œuvre du ressuage :

1^{ère} étape- Nettoyage rigoureux et efficace avec brosse métallique et dégraissage soigné avec solvant volatil non chloré de la surface de la pièce à contrôler. Vérification du séchage complet de la pièce à contrôler.

2^{ème} étape- Application par pulvérisation (ou application au pinceau de soie) du liquide pénétrant (pré ou post émulsionné) coloré, fluorescent ou mixte sur toute la surface à examiner.



FigureIII.16 : Application de pulvérisant

3^{ème} étape d'imprégnation (de 15 à 40 minutes) du pénétrant par capillarité dans les défauts débouchant.

4^{eme}) étape - Application d'un émulateur hydrophile (à diluer dans l'eau) lors de l'utilisation d'un pénétrant post émulsionné avec émulateur hydrophile.

5^{eme}) étape - Application par pulvérisation du révélateur à sec ou en suspension dans un solvant volatil en une couche mince et uniforme. Le révélateur pompe le pénétrant resté dans les discontinuités des défauts débouchant. Des taches colorées apparaissent à l'endroit des défauts.



Figure III.17 : Application du révélateur.

5^{eme}) étape-Interprétation du ressuage dans un délai de 7 à 30 minutes après application du révélateur sous un éclairage de 500 lux minimum pour les pénétrants colorés ou mixtes. Interprétation sous éclairage ultraviolet pour les pénétrants fluorescents et mixtes.



Figure III.18 : Joint de soudure après ressuage.

La (figure III.19) montre le test de ressuage appliqué sur nos échantillons prélevés.

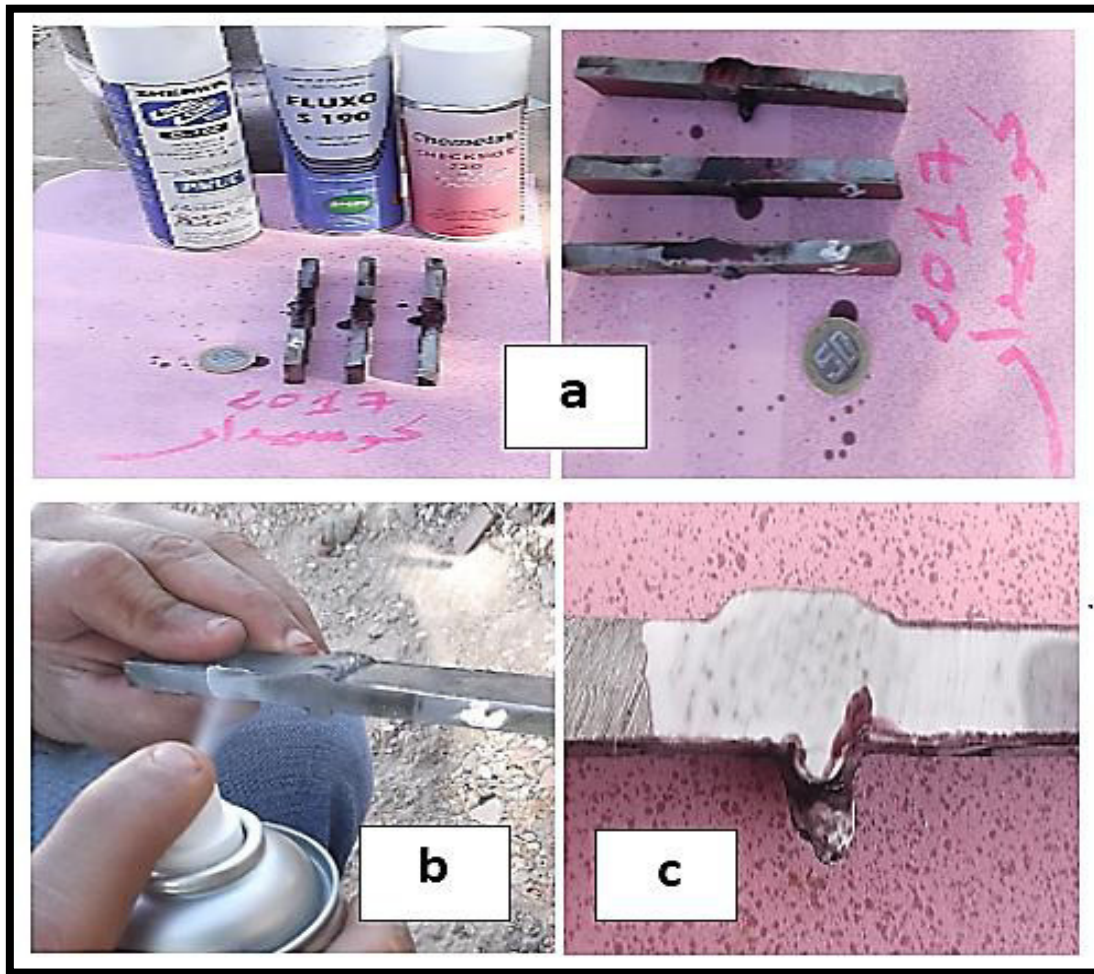


Figure III.19 : Teste de ressuage sur les échantillons prélevés :

- a –avant le test.
- b –application du révélateur.
- c –résultat de ressuage.

VI.1.Examen métallographique :

L'examen métallographique a pour principal but la mise en évidence de la structure de l'échantillon. Après avoir effectué l'opération de polissage et attaque, il est nécessaire de procéder à une analyse métallographique (macrographique et micrographique). L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. Nous allons détailler chacune de ces opérations.

VI.2.1.Polissage :

Après le découpage, nous passons les échantillons sur une polisseuse à disque abrasif (Fig.III.20). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir.

Dans un premier temps, nous faisons un pré-polissage qu'il s'effectue en plusieurs étapes avec des disques à grains abrasifs de plus en plus fins (180, 400,1200) qui tourne avec une vitesse de 150 tr/mn, cette opération se fait sous eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

Le polissage de finition est un polissage à la pâte diamantée, cette pâte est répartie sur le disque. Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés de tout résidu à l'aide d'un solvant approprié tel que l'éthanol, puis séchés.



Figure III.20 : Polisseuse.

VI.2.2.Attaque chimique :

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants.

Le réactif chimique utilisé pour notre acier (acier faiblement allié) est le Nital 4 % (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol) une fois étalée sur la surface de l'échantillon, un temps de maintien de 20 à 25 secondes est respecté ; cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée.

VI.3.1. Analyse par le microduromètre (Microdureté Vickers) :

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur.

Du point de vue scientifique on peut séparer les essais de dureté des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelque fois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe à définir des propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants.

Les mesures de microdureté, pour donner des résultats satisfaisants doivent être faites en précisant tous les paramètres, charge appliquée, vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage).

Les structures micrographiques nécessitent des précautions multiples, comme l'élimination des vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme de diamant, caractéristiques optiques, précision mécanique).

Dans ces conditions, la microdureté permet d'obtenir des résultats extrêmement intéressants.

VI.3.2. Machine d'essai de microdureté :

C'est un microduromètre pour dureté Vickers de marque 'LEITZ DURIMET' (Fig. III.21) avec une charge de 0,05N à 20N. On utilise pour cette essai un diamant en forme de pyramide, à base carré angle au sommet entre faces opposées 136° (Fig. III.22) ; profondeur de pénétration égale à (1/7) de la diagonale de l'empreinte.

➤ La formule de la Dureté Vickers : **$HV = 1854.4/d^2$ [Kg/mm²]**

Démonstration :

$$HV = F.0,102/A$$

$$A = d^2/2\cos 22^\circ = d^2/2\sin 136^\circ / 2 = d^2/1,854(\text{mm}^2)$$

Donc

$$HV = 0.102.F.1.854/d^2$$

P ou F : charge appliquée

d : moyenne des deux diagonales de l'empreinte (μm)

La charge appliquée dans notre test est : **100.g**



Figure III.22 : Microduromètre Vickers.

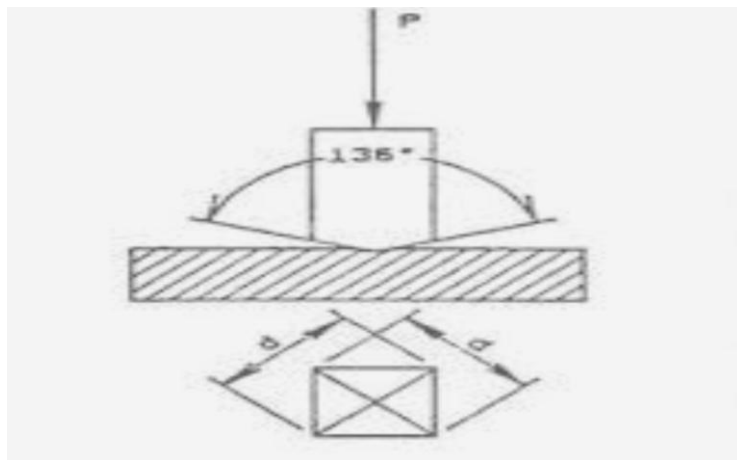


Figure III.23 : Schéma représentatif d'un pénétrateur pyramidal.

VI.3.3.Mode opératoire :

Pour conclure à des résultats satisfaisants, on prend deux positions sur chaque éprouvette, la première sur la passe de finition et la deuxième sur la racine, avec un pas de 1 mm Ce qui nous permis de voir l'influence de la température de soudage sur la dureté du cordon.

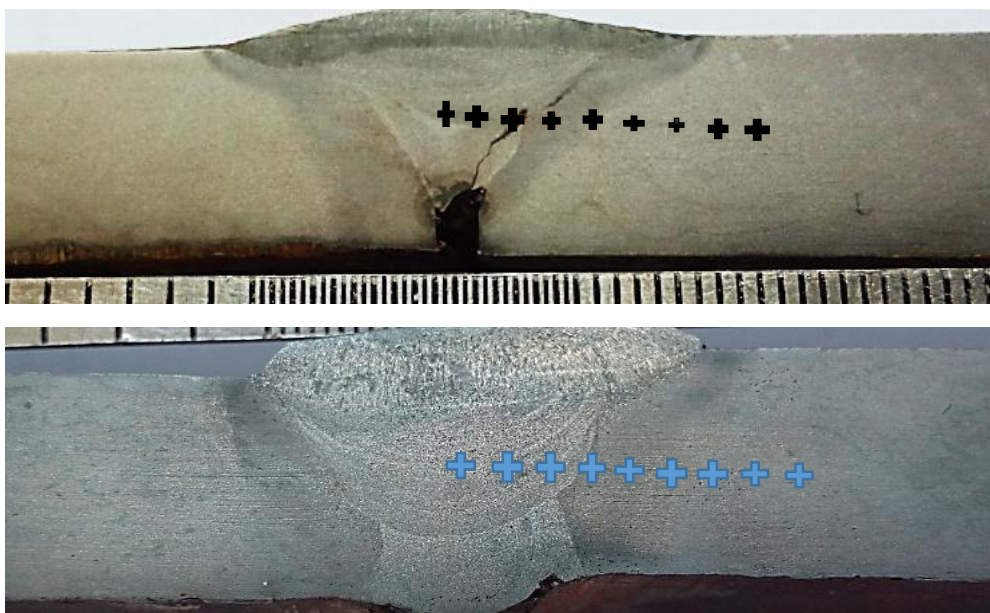


Figure III.24 : Localisation des Positions.

VI.4. Diffraction des rayons X :

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 0.01 et 10 Å. Mais le domaine utilisé pour la caractérisation des matériaux est 0.1-10Å. La diffraction des rayons X est un phénomène de diffusion cohérente qui se produit lorsqu'ils interagissent avec la matière organisée. L'onde diffractée résulte de l'interférence des ondes diffusées par chaque atome. Elle dépend donc de la structure cristallographique. Lorsqu'un faisceau incident de rayons X monochromatiques est focalisé sur l'échantillon à caractériser, il interagit avec le nuage électronique des atomes. Si l'échantillon présente une structure cristalline il peut y avoir un phénomène de diffraction selon la condition de Bragg.

Nous avons utilisé le diffractomètre automatisé (D8 ADVANCE 08), lié à un micro-ordinateur. Celui-ci est caractérisé par la source de la radiation CuK , ayant une longueur d'onde de 1,541838 Å, avec une tension de 40 KV, un courant de 40 mA et une anticathode de cuivre en filtre de Nickel.

Lors d'une analyse par cette technique, un faisceau de rayons X, émis par une source, est envoyé sur l'échantillon à analyser sous un angle et un détecteur reçoit le faisceau de rayons X diffracté par cet échantillon et enregistre l'intensité en fonction de l'angle de diffraction (Fig.III.25).

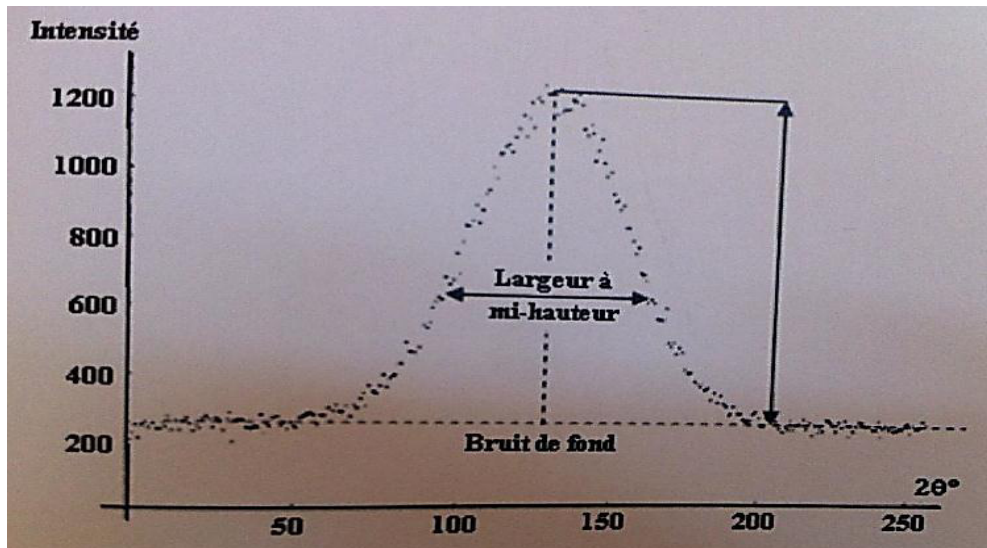


Figure III.25 : Illustration d'un pic de diffraction

L'analyse des spectres de rayons X permet d'obtenir des informations sur :

- La ou les phases cristallines (position des pics) ;
- La taille des cristallites (largeur des pics à mi-hauteur) ;
- Les défauts d'empilement (forme de pics) ;
- L'orientation des cristallites (absence ou présence de réflexions).

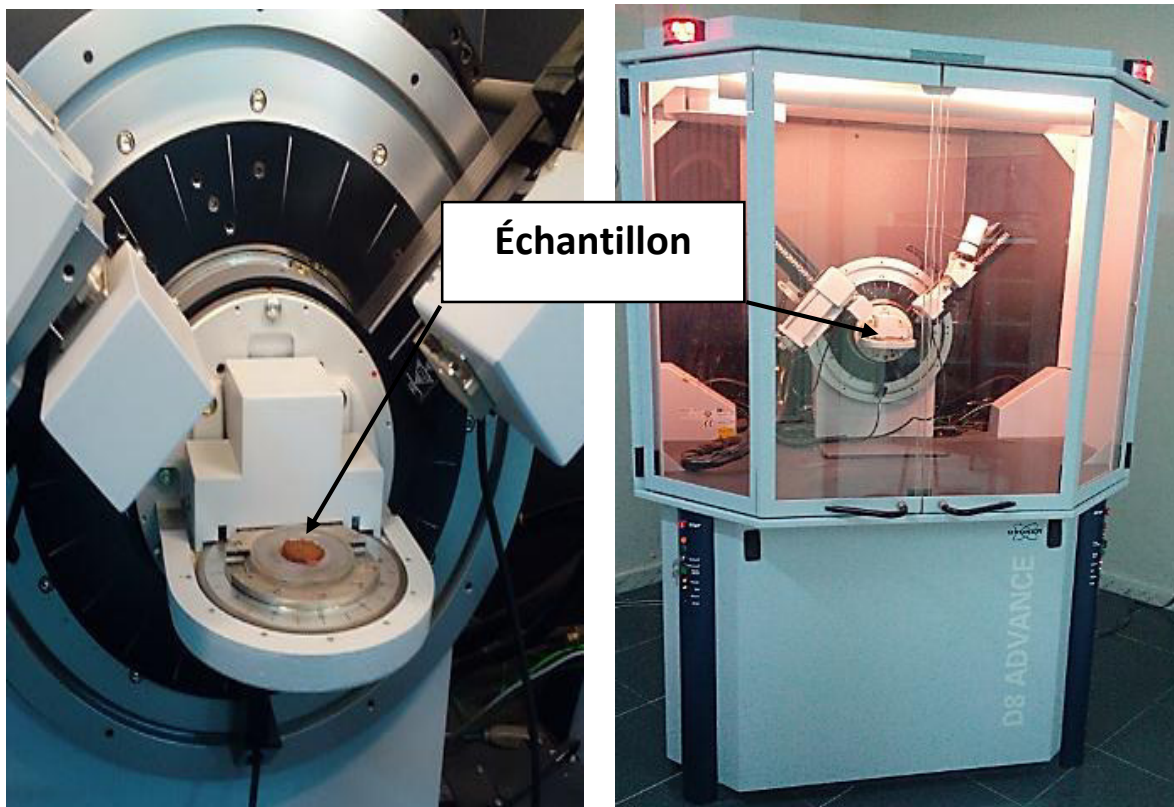


Figure III.26 : Diffractionmètre BRUKER D8 ADVANCE AXS(XRD).

Cette technique est donc particulièrement intéressante pour l'investigation structurale des matériaux poly cristallins.

Un matériau polycristalin est formé d'une multitude de grains, chacun d'entre eux étant en fait un monocristal constitué d'un empilement régulier d'atomes. Ce Page 89 empilement peut être décrit par des ensembles de plans cristallins définis par une distance d_{hkl} qui dépende des indices de MILLER. Cette distance est mesurable par a diffraction des rayons X grâce à la loi de BRAGG.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\Theta$$

- ✚ n : 1,2,... ordre de la diffracté,
- ✚ λ : La longueur d'onde du faisceau diffracté.
- ✚ d_{hkl} : est la distance entre les plans cristallins parallèles.
- ✚ Θ : L'angle d'incidence du faisceau des Rayons X.

VII.1Essai de pliage :

Les essais de pliage généralement exécutés uniquement sur les soudures bout à bout, afin de déterminer la qualité de la zone de soudure en ouvrant et en élargissant des défauts existants. Le manque de ductilité peut également causer un défaut dans un spécimen d'essai.

Les échantillons pour les essais de pliage sont découpés sur les zones de soudures, par tout moyen et sont usinés aux dimensions indiquées dans les normes. La surépaisseur de la soudure doit être enlevée sur les deux côtés avant ou après l'aplatissement de l'échantillon. Un décapage sévère et un marquage, ou tout autre moyen adapté, sont nécessaires pour identifier l'emplacement de la soudure. Il peut également s'avérer nécessaire de marquer le spécimen pour identifier chacune des faces de la soudure (endroit et envers), afin d'éviter toute confusion après l'aplatissement.

Lorsque l'essai de pliage est terminé, on recherche toutes imperfections ou ouvertures de la surface de tension du spécimen.et on doit se référer aux exigences en matière de résultats aux normes appliquées.

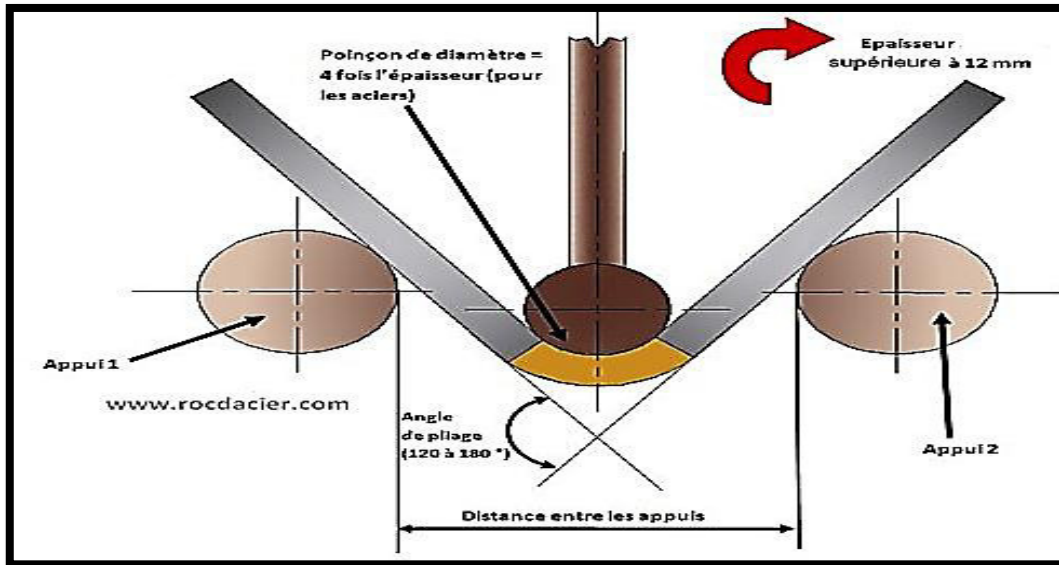


Figure III.27 : Essai de pliage sur joint soudure.

La figure III.29 et aussi la figure III.30 présentent le test de pliage appliqué sur notre échantillon soudé.



Figure III.29 : Teste de pliage échantillon avec manque de fusion dans la racine .



Figure III.30 : Teste de pliage échantillon sans défaut de soudage.

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était l'étude du manque de fusion dans un joint de soudure d'un acier X60 utilisé dans le transport du gaz.

Pour aboutir à notre objectif on a effectué plusieurs soudure sous différentes conditions c'est-à-dire avec et sans préchauffage et aussi avec variation du courant électrique lors du soudage. Plusieurs techniques de caractérisations ont été utilisées :

- Microscopie optique.
- Radiographie gamma.
- Diffraction des rayons X.
- Ressuage.
- Microdureté.
- Test de pliage.

Nos principaux résultats sont :

Le défaut de manque de fusion apparait pour les faibles courants de soudage et aussi l'absence d'un préchauffage avant le soudage.

D'autres défauts ont été observés tels que :

- ✚ Manque de pénétrations.
- ✚ La formation de la goutte.
- ✚ L'inclusion.

Différentes phases ont été observées sur chaque zone du soudé.

Perspectives :

- Etude de formation du manque de fusion dans un autre procédé de soudage.
- Application du test de compression sur la pipe contenant un manque de fusion.

المخلص

ان الهدف من هذه المذكرة هو دراسة النقص في الذوبان عند حدود التلحيم لفلو لاذ X60 الذي يستعمل في انبوب نقل الغاز على مستوى مؤسسة كوسيدار بسكرة. ومن نتائج الدراسة ان الخطاء يتكون عند تيار كهربائي اثناء التلحيم ضعيف وغياب التسخين الابتدائي قبل التلحيم.

Abstract

The objective of this dissertation was to study the lack of fusion in welded joint of steel X60 used in gas transport. From this study, we have observed that this defect formed under low electric current of welding and it is due to the absence of heating of tube before its welding.

Résumé

L'objectif de ce mémoire était l'étude du manque de fusion d'un acier X60 utilisé dans le transport de gaz. A travers cette étude, on a pu mettre en évidence ce défaut qui se forme sous un faible courant électrique de soudage et aussi l'absence de préchauffage avant le soudage de pipe.

Références

- [1].S.BENSAADA.D.FEILACHI. <<TECHOLOGIE>> .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].M.KBENCHARIF. (WLDING INSPCTION) procédé de soudage. VINCOTTE INTERNATIONAL ALGRIE. MAI 2007.
- [4].KLAS.WEMAN procédés de soudage Photo de couverture : © tumpikuja – istockphoto.com © Dunod, Paris, 2012 ISBN 978-2-10-057810-8
- [5] V.RYBARCOV, (le soudage et le coupage des métaux) 2^e EDITION .1983. EDITION MIR. MOSCOU
- [6] R.BAUS.W.CHAPRAU, application de soudage aux constructions ,1979
- [7]. Procédés de soudage (manuels et semi-automatiques) • Chapitre 2
- [8] DOCUMENT DE L'INDUSTRIE. COSIDER. CANALISATION.BISKRA.
- [9] G.HICKS « Conception des assemblages soudées » édition Ayrolle année.
- [10] KLAS.WEMAN. Guide de soudage. PROCÉDÉS DE SOUDAGE © Dunod, Paris, 2012 ISBN 978-2-10-057810-8
- [11]SAF-AIR LIQUIDE, Procédés TIG. et plasma, Ed.1-SUY 542/20/2000.
- [12] Technologie des assemblages. Laboratoire Multimatériaux et Interfaces Bât. Berthollet – 3^{ème} étage olivier.dezellus@univ-lyon1.fr 04 72 44 83 86
- [13]Guide de soudage, Soudage l'arc sous gaz de protection TIG ,MIG ,MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
- [14] R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOUT1995.
- [15] VARIANTE DE BROCEE TIG PAR MPULSION, Soudage électrique à l'électrode réfractaire ; publications Centre de Soudage de Cheraga.
- [16]Document de COSIDER Sommaire Gaz Expert - Rôle et choix du gaz de protection Soudage à l'arc électrique Sous protection gazeuse
- [17]. H.GRANJON. «Bases métallurgiques de soudage » 2^{ème} édition. publications de soudage et de ses applications Paris .1995.

- [18]. S.S. BABU, J.W. ELMER, J.M. VITEK, S.A. DAVID «Time-resolved X-ray diffraction investigation of primary weld solidification in Fe-C-Al-Mn steel welds», Acta Materially 50 (2002), p: 4763–4781.
- [19]R. BLONDEAU, «Métallurgie et mécanique du soudage, » Hermès Science publication, Paris (2001), p.50-67.
- [20] .J.BARRALIS et G.MAEDER «Précis de Métallurgie (élaboration- structures-propriétés et normalisation» 5ème Edition Nathan (1990).
- [21] .C. FERDINAND « Mise en œuvre et caractérisation d’assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d’alliages de titane réfractaires » thèse doctorale de l’institut national polytechnique de Toulouse, novembre 2005.
- [22] A. F. GIAMEI, E. H. KRAFT, F. D. LEMKEY, «New trends in Materials Processing, American Society for Metals», Metals Park, OH (1976), p 48.
- [23] Documents (PDF) Défauts de soudure • Chapitre 6.
- [24] Documents (PDF) Métallographie des soudures 08.08 / 62340409. Printed in Denmark by Rosendahls Bogtrykkeri - 51
- [25]Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- [26] Documents Technique COSIDER Biskra 2014.
- [27] Document PDF Le soudage- le visuel.
- [28] (GTP) ENTREPRISE NATIONALE DE GRANDS TRAVAUX PETROLIERS
CENTRE DE SOUDURE ET D ’EXPERTISE - ARZEW
- [29]API Institut Américain du Pétrole H. Charles Price, Président George K. Hickox, Vice-Président Frank R. Or, Secrétaire
- [30]Documents Yamani Institute of Technology
- [31] M.K BENCHARIF .EXEMEN VISUEL du défaut de soudage Algérie MAI 2007
- [32] M.K BENCHARIF .EXEMEN RADIOGAPHIQUE des soudures. Algérie MAI 2007.
- [33] site internet. WWW.algerie-dz
- [34].Catalogue baguette soudeur de l’industrie. COSIDER Canalisation. Biskra 2012.
- [35].Document Control .CNV CSIDER BISKRA 2014.