

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Pipeline Dans L'environnement.	2
Figure I 2: Canalisation Aérienne	3
Figure I 3 : Canalisation Enterré	3
Figure I.4 : Etapes Caractéristiques Du Schéma De Laminage	7
Figure I.5 : Evolution Des Compositions Des Aciers Pour Tubes En Fonction De La Soudabilité	8
Figure I.6: Representation de la fabrication des pipelines spiraux	10
Figure I.7 : La Mise En Forme Des Tubes Par Le Procédé « UOE »	10
Figure I.8 : Machine d'expansion [6].	11
Figure I.9 : Soudage Des Tubes Par Le Procédé « Uoe »	11
Figure I.10: Fabrication des tubes sans soudures	12
Figure I.11: Revêtement fbe	13
Figure I.12 : Revêtement extérieur	14
Figure I.13 : Le Revêtement Extérieur Des Pipelines	15
Figure I.14: Revêtement En Résin Epoxy Liquide Pour Les Pipelines D'eau.....	16
Figure I.15 : La Courbe De Fiabilité Des Pipelines	17
Figure I.16 : Géométrie De Demi-Coquilles.	17
Figure I.17 : Opération De Soudages De Demi Coquilles (STT)	18
Figure I.18: Réparation Par Clock Spring [10].	18
Figure I.19 : Différentes Contraintes S'exerçant Sur Un Conduit	20

CHAPITRE II

Figure II.1 : schéma d'un cordon de soudure.	21
Figure II.2 : macrographie d'un cordon de soudure	21
Figure II.3 : Principe d'une soudure.....	21
Figure II.4 : Les différents procédés de soudage à l'arc électrique	23
Figure II.5 : Principe de la procédé du soudage SMAW.....	24
Figure II.6 : Principe de la procédé de soudage GTAW.	25
Figure II.7 : Principe de la procédé du soudage MIG/MAG	27
Figure II.8 : La géométrie d'un joint soudé bout à bout.....	29
Figure II.9 : Cycle thermique: cas du soudage mono passe.....	30
Figure II.10 : Cycle thermique pour le soudage multi passes.....	31
Figure II.11 Métallurgiques de sou: Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes.....	31
Figure II.12 : Etat quasi-stationnaire.....	33
Figure II.13 : Représentation schématique d'un joint soudé.	34
Figure II.14 : Transformations structurales dans la ZAT : représentation schématique et micrographies	35

LISTE DES FIGURES

Figure II 15 : Structure de weidmannsta	35
---	----

CHAPITRE III

Figure III.1 : Effet de l'intensité du courant sur la pénétration	36
Figure III.2 : Fissure sur un cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale	38
Figure III.3: Fissure de Gorge (Throat Cracks)	39
Figure III.4 : Fissure de Racine	39
Figure III.5 : Fissure de Cratère	40
Figure III.6 : Fissure au raccordement	40
Figure III.7: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)	41
Figure III.8 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking)	42
Figure III.9 : Fissure à chaud (ou de solidification)	42
Figure III.10 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement....	43
Figure III.11 : Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud	43
Figure III.12 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).....	44
Figure III.13 : Manque de pénétration et collage en bord de chanfrein	45
Figure III.14 : Les manques de fusion.....	46
Figure III.15 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	46
Figure III.16 : Manque de fusion entre passes.	46
Figure III.17: Manque de fusion à la racine de la soudure.....	47
Figure III.18 : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.	48
Figure III.19 : Inclusions gazeuses porosités de reprise.....	48
Figure III.20 : Inclusions gazeuses porosités uniformes	49
Figure III.21 : Inclusions de laitier.....	50
Figure III.22 : Inclusions de tungstène.....	51
Figure III.23 : Inclusions de cuivre.	51
Figure III.24 : Excès de pénétration	52
Figure III.25 : Surépaisseur	53
Figure III.26 : Concavité.	53
Figure III.27 : Débordements.	54
Figure III.28 : Morsures et caniveaux.	55
Figure III.29 : Défauts d'alignements	55
Figure III.30 : Projections sur le métal de base.....	56
Figure III.31 : Retassures	57
Figure III.32 : Préparation du joint des tubes d'épaisseurs inférieures à 3mm	60
Figure III.33 : Préparation du joint des tubes d'épaisseurs $2 \leq t \leq 20\text{mm}$	61
Figure III.34 : Préparation d'un joint V doubles pentes	61
Figure III.35 : Chanfreins en J	62
Figure III.36 : Chanfrein en J composés	62
Figure III.37 : Diagramme de seferian	64
Figure III.38 : Abaque thermique général de l'IRSID didactisme	68
Figure III.39 : Abaque thermique de BAUS et CHAPEAU	70

LISTE DES FIGURES

Figure III.40 : Principe de contrôle visuel	71
Figure III.41 : Ressuage	71
Figure III.42 : Schéma montre le principe de contrôle par ultrason.	72
Figure III.43 : Principe de contrôle par radiographie.....	73
Figure III.44 : Principe du contrôle magnétoscopique.	74

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Résumé sur la différence entre PSL1 et PSL2..	4
Tableau I.2 : composition chimique des pipelines.	5
Tableau I.3 traction pour PSL1	6
Tableau.I.4 Traction pour PSL2	6

CHAPITRE II

Tableau II.1 : l'énergie nominale (En) en fonction du diamètre de l'électrode, la vitesse de soudage Vs	29
---	----

CHAPITRE III

Tableau III.1 : L'influence des paramètres du soudage sur le cordon de soudage	37
Tableau III.2 : l'intensité en fonction de diamètre de l'électrode	58
Tableau III.3 : choix de courant du soudage	59
Tableau III.4 : Le choix du diamètre des électrodes en tungstène	59
Tableau III.5 : Choix du diamètre du fil et l'intensité	60
Tableau III.6 : Des exemples sur la TSN.	65
Tableau III.7 : Indice de soudabilité en fonction de Céq	65
Tableau III. 8 : Diamètre des électrodes en fonction de la température de préchauffage	66
Tableau III.9 : Le coefficient K souvent le type de joint	67
Tableau III.10 : Le coefficient K souvent l'angle des chanfreins	67
Tableau III.11 : principaux défauts et tolérances selon les normes ISO5817 ET EN 1090-2.	75

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATION

PSL:	Pipes Steel Line
TNR :	La température de non recristallisation de l'austénite
API:	American Petroleum Institute
BWRA:	British welding research association
TSN:	Thermic Severity Number
Pmc:	Pression critique
SAW:	Submerged arc welding
FBE:	Fusion Bonded Epoxy
MDPE :	Polyéthylène de Milieu-densité
HDPE :	polyéthylène à haute densité
SMAW :	Shielded metal arc welding
GTAW :	Gas–tungsten arc welding
TIG :	Tungsten Inert Gas
M.I.G :	Métal inert gaz
M.A.G :	Métal active gaz
ZAT :	Zone Affectée Thermiquement
CND :	Contrôle non destructif
MB :	métal de base
MD :	métal d'apport
MMA :	électrode enrobée
ZAC :	Zones Affectées par la chaleur
IRSID :	L'Institut de Recherche de la SIDérurgie française.

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

P:	Phosphore
S:	Soufre
Cr:	Crome
Ni:	Nickel
Nb :	Niobium
V:	Vanadium
Mo:	Molybdène
Cu:	Cuivre
Al:	Aluminium
Ti :	Titane
B:	Bor
C:	Carbone
Mn:	Magnésiums
Fe :	Fer
Si :	Silicium
CO :	Cobalt
E :	L'énergie de soudage
U :	La tension électrique.
I :	l'intensité du courant électrique.
θ :	Température
Δ t0201 :	Temps de passage entre deux températures
Ø:	Diamètre

LISTE DES SYMBOLES

Ec :	Energie corrigée.
Eq :	Energie équivalente.
Δt :	la vitesse de refroidissement.
Ed :	L'énergie dissipée.
T p :	La température de préchauffage.
e :	Epaisseur moyenne des tôles.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	I
DEDICACE	II
RESUME	III
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTE DES ABREVIATIONS	X
LISTE DES SYMBOLES	XI
SOMMAIRE	XIII

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

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES PIPELINES

Introduction	2
I.1 Définition	3
I.2 Composantes de pipelines	3
I.3 Caractéristiques des tubes	3
I.4 Grades	4
I.5 Exigences matérielles	5
I.5.1 Propriétés Chimique	5
I.5.2 Propriétés mécaniques	5
I.5.2.1 Propriétés de traction	5
I.6 Laminage	7
I.7 La soudabilité	8
I.8 Fabrication des tubes	9
I.8.1 Familles de tubes	9
I.8.2 Tubes soudés en spirale	9
I.8.3 Les tubes soudés sous forme longitudinale	10
I.8.4 Les tube réalisé sans soudure	12
I.9 Revêtement des tubes	12
I.9.1 Revêtements extérieurs	12
I.9.1.1 Revêtement Fusion Bonded Epoxy	12
I.9.1.2 Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches	13
I.9.1.3 Revêtements par l'émail de goudron (Coal tar enamel coatings)	14

SOMMAIRE

I.9.1.4 revêtements par bande (Tape coatings).....	14
I.9.1.5 revêtements par un plastic Rétractable a la chaleur (Heat-shrinkable plastic coatings).....	15
I.9.2 Revêtements intérieurs	15
I.10 Défauts rencontrés dans les canalisations	16
I.11 Méthodes de réparation des tubes	17
I.11.1 Réparation par demi-coquilles soudées	17
I.11.2 Réparation par Clock spring	18
I.12 Avantages de pipelines	19
I.13 contraintes exerçant sur les conduites	19
I.13.1 Sollicitation d'un réseau	19
I.13.2 sources de contrainte circonférentielle	20
I.13.3 sources des contraintes longitudinales	20

CHAPITRE II GENERALITES SUR LE SOUDAGE

Introduction	21
II.1 Définition	21
I.2 Procédés de soudage :	22
II.3 Les procédures de soudage des pipelines	23
II.3.1 Soudage à l'arc électrique	23
II.3.1.1 Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée	23
II.3.1.2 Soudage à l'arc électrique type TIG (Tungsten inert gas).....	25
II.3.1.3. Les procédés de soudage MIG/MAG	26
II.3.2 Les paramètres du soudage	27
II.3.2.1 L'intensité du courant de soudage	27
II.3.2.2. La tension du soudage	28
II.3.2.3. Energie nominale et vitesse de soudage	28
II.4 La géométrie d'un joint soudée bout à bout des tubes	29
II.4.1. Composition d'un chanfrein en bout de tube	29
II.4.1.1 Le chanfreinage	29
II.4.1.2 Le dressage	29
II.4.1.3 Le délardage intérieur	29
II.5 Aspect thermique du soudage	30
II.5.1 Cycle thermique du soudage mono passe	30
II.5.2 Cycle thermique du soudage multi passes	31
II.6. Aspects métallurgiques du soudage	33

SOMMAIRE

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Introduction	36
III.1 L'influence des paramètres de soudage	36
III.1.1 L'influence de la tension	36
III.1.2 L'influence de L'intensité	36
III.1.3 L'Influence du diamètre de fil utilisé	36
III.1.4 L'influence Vitesse de déplacement	37
III.2 Les défauts des soudages	37
III.2.1 Les fissures	37
III.2.2 Types des fissures.....	39
III.2.2.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks)	39
III.2.2.2 Fissures de Racine.....	39
III.2.2.3 Fissures de Cratère	39
III.2.2.4 Fissures au raccordement	40
III.2.2.5 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)	41
III.2.2.6 Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	41
III.2.3 Fissure à chaud (ou de solidification).....	42
III.2.4 Fissures à froid	43
III.2.5 Manque de pénétration	45
III.2.6 Manque de fusion	45
III.2.6.1 Manque de fusion dans le flanc de la soudure	46
III.2.6.2 Manque de fusion entre passes.....	46
III.2.6.3 Manque de fusion à la racine de la soudure	47
III.2.7 Inclusion gazeuses.....	47
III.2.7.1 Porosités vermiculaires	48
III.2.7.2 Porosités de reprise	48
III.2.7.3 Porosités uniformes.....	49
III.2.8 Inclusion solides	50
III.2.8.1 Inclusions de laitier	50
III.2.8.2 Inclusions de tungstène	51
III.2.8.3 Inclusions de cuivre	51
III.2.9 Excès de pénétration.....	52
III.2.10 Surépaisseur ou convexité excessive.....	53
III.2.11 Effondrements ou concavité excessive.....	53
III.2.12 Débordement du cordon	54

SOMMAIRE

III.2.14 Défauts d'alignement	55
III.2.15 Projections	56
III.2.16 Retassures et criques de solidification.....	57
III.3 Solutions et mesures préventives.....	58
III.3.1 Réglage des Paramètres du soudage.....	58
III.3.1.1 Électrode enrobée (MMA)	58
III.3.1.2 Procédés TIG	59
III.3.2 La préparation des joints	60
III.3.2.1 Gamme d'épaisseur $t \leq 3\text{mm}$	60
III.3.2.2 Gamme d'épaisseur $2 \leq t \leq 20\text{mm}$	60
III.3.2.3 Gamme d'épaisseur $20\text{mm} \leq t$	61
III.3.3 Calcul de la température de préchauffage	63
III.3.3.1 Méthode seferien.....	63
III.3.3.2 Méthode BWRA	64
III.3.4 Calcul de la vitesse de refroidissement	67
III.3.4.1 Méthode de l'irsid	67
III.3.4.2 Méthode baus et chapeau	69
III.4. Contrôle des cordons par (CND) :	70
III.4.1 Contrôle visuel	70
III.4.2 Contrôle par ressuage	71
III.4.3 Contrôle par ultrasons	72
III.4.4 Contrôle par radiographie.....	73
III.4.5 Contrôle magnétoscopique	74
III.5 Les critères d'acceptation des défauts de soudure	74
Conclusion générale	78
Références bibliographique	79

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Sur chaque kilomètre de conduite de diamètre 1420 mm, la longueur des soudures exécutées en usine est de 2 Km et celle de leur assemblage est de 0,4 Km. C'est pourquoi, il n'est pas toujours possible d'assurer la stabilité et la bonne qualité des joints de soudure, il y a toujours la possibilité qu'une partie des défauts des joints, non détectés par les contrôles, constitue un danger potentiel pour l'intégrité de la conduite. Les joints de soudure sont sollicités par des chargements complexes durant le transport, le bardage des tubes, la construction et l'exploitation de la conduite. D'autre part, la demande croissante en tubes impose des vitesses de soudage qui atteignent plus de 180 m/h en usine et l'emploi de soudage à multi arcs sous flux. Les modifications les plus importantes de la structure et des propriétés du métal de base résultant de l'échauffement et du refroidissement dans la zone adjacente au cordon sont : la diminution de la plasticité, de la résilience et l'accroissement de la tendance à la formation des fissures à froid et à chaud. Les matériaux de soudage et les processus de thermo-déformations ayant lieu lors du soudage des tubes provoquent l'hétérogénéité des propriétés mécaniques de la ZAT, où plus de 85% des ruptures des oléoducs sont observées. La capacité portante des joints dépend de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques, de la qualité de la forme du cordon, de l'épaisseur relative des sous couches. A cette hétérogénéité s'ajoutent les concentrations de contraintes et les déformations qui réduisent d'avantage la capacité portante des joints de soudures. Ces concentrations dépendent de la présence des défauts technologiques, des formes insatisfaisantes des cordons et d'assemblages incorrects des tubes.

Le but de ce mémoire de master est d'étudier les différents critères de la qualité des joints soudés sur les pipelines en service.

Le manuscrit est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une généralité des pipelines et les différentes contraintes exercées sur les pipelines.

Le deuxième chapitre est réservé aux généralités sur le soudage.

Le troisième chapitre est réservé aux :

- Identifier les défauts de soudage et leurs causes, remèdes
- Les solutions et les mesures préventive du soudage.
- Contrôlés de la qualité des cordons de soudures.
- Les critères d'acceptation des défauts de soudure

CHAPITRE I

GENERALITES SUR

LES PIPELINES

Introduction

Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour, acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz, sur de longues distances. Ces conduites de transport, constituent des constructions coûteuses, dues à la quantité et à la qualité de l'acier des tubes. Généralement enterrés, quelquefois, inaccessibles à l'examen, assurant leur fonction de production et de transport, se faisant même parfois oublier, les gazoducs et oléoducs baignent dans un milieu particulièrement agressif, du fait de son hétérogénéité et du grand nombre d'impuretés qu'il contient. L'économie mondiale des coûts supplémentaires importants, de plus peut avoir des conséquences désastreuses surtout lorsqu'il entraîne l'arrêt de l'exploitation d'ouvrages de transport.



Figure I.1 : Pipeline dans l'environnement [4].

I.1 Définition

Un pipeline ou une canalisation enterrée ou aérienne transport des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol [2]. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances [1].



Figure I.2: Canalisation aérienne [9]



Figure I.3 : Canalisation enterré [20]

I.2 Composantes de pipelines

Un pipeline est un système de transport complexe. Il inclut des composantes tel que pipe, essayages (valves, couplages, etc.), crique et structures de sortie, pompes (pour le liquide) ou compresseurs (pour le gaz) et équipement auxiliaire (débitmètres, cochons, transducteurs, systèmes de protection de cathodique et systèmes de contrôle automatiques en incluant des ordinateurs et contrôleurs logiques programmables) [19].

I.3 Caractéristiques des tubes

La plupart des pipelines sont faits d'acier, bien que le plastique et l'aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel. Les pipelines d'acier est fabriqué en soudant de courtes sections de tuyaux (20 m) les uns aux autres. Après la radioscopie de l'assemblage, le tuyau est ensuite enveloppé d'une couche protectrice avant d'être enterré. Tous les pipelines, sans exception, font l'objet d'une inspection en plus d'être soumis à une épreuve de pression avant leur utilisation. Ces caractéristiques principales (diamètres, épaisseur, type d'acier, spécifications de construction, température et pression d'exploitation...) sont régies par tout un ensemble de règles et font l'objet de multiples calculs et de compromis économiques. Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits à acheminer, de leur viscosité et de leur densité, de façon à réaliser un compromis économique entre la puissance des stations de pompage ou de compression à installer et l'importance de l'investissement total

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES PIPELINES

à réaliser. Lorsque les considérations technico-économiques ont ainsi permis de fixer le diamètre, et d'ailleurs également la pression de service, on calcule l'épaisseur en fonction de cette pression de service ou des conditions de pose lesquelles parfois imposent des caractéristiques dimensionnelles plus sévères. Les autorités administratives des différents pays responsables de la sécurité des populations dont le territoire est traversé par les pipelines, ne restent pas indifférentes à ces calculs qui déterminent le niveau de sûreté de l'installation. Dans la plupart des pays où l'on pose des pipelines, des règlements fixent les lois générales que doivent suivre les constructeurs et les installateurs. Ces réglementations reposent sur les notions de pression maximum de service, de coefficient de sécurité et d'autres conditions de construction comme le mode d'inspection des tubes, les modalités des essais sous pression devant être menés à bien avant la mise en service de toute canalisation, les dispositions spéciales de protection à prendre contre les fuites dans les zones où celles-ci auraient des conséquences particulièrement dangereuses) [3].

I.4 Grades

Les grades couverts par la présente spécification sont les grades standard A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 et X80; et les notes intermédiaires (notes Supérieurs à X42, intermédiaires à deux standards séquentiels agréés par l'acheteur et le fabricant). Le tube PSL 1 peut être fourni dans les classes A25 à X70. Le tube PSL 2 peut être fourni dans les catégories B à X80. L'acier de classe II (CI II) est rephosphorisé et a probablement Meilleures propriétés d'enfilage que la classe I (CI I). Parce que la classe II (CI II) a une teneur en phosphore supérieure à celle de la classe I (CI I), il peut être un peu plus difficile à plier [13].

Tableau I.1 : Résumé sur la différence entre PSL1 et PSL2 [13].

Parameter	PSL 1	PSL 2
Grade range	A25 through X70	B through X80
Type of Pipe Ends	Plain-end, threaded-end; belled-end; special coupling pipe	Plain-end
Seam welding	All methods; continuous welding limited to Grade A25	All methods except continuous and laser welding
Electric welds: welder frequency	No minimum	100 kHz minimum
Heat treatment of electric welds	Required for grades > X42	Required for all grades (B through X80)
Chemistry: max C for seamless pipe	0.28% for grades $\geq$ B	0.24%
Chemistry: max C for welded pipe	0.26% for grades $\geq$ B	0.22%
Chemistry: max P	0.030% for grades $\geq$ A	0.025%
Chemistry: max S	0.030%	0.015%
Yield Strength, Maximum	None	Maximum for each grade
UTS, Maximum	None	Maximum for each grade

I.5 Exigences matérielles

I.5.1 Propriétés Chimique

Le développement des transports à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grand diamètre, exploités à des pressions plus élevées. Pour éviter d'atteindre des épaisseurs difficiles à souder et faire des économies d'acier, des nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques sont améliorées. C'est ainsi qu'on a vu apparaître les grades X60, X65, X70, X80 et même X100 [13]. Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes : aciers au carbone faiblement alliés et aciers à faible teneur en carbone. Dans le premier groupe on trouve les aciers X42 à X52 (selon API) renfermant jusqu'à **0,3 % C, 1,6 % Mn, 0,7 % Si**. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers faiblement alliés à basse teneur en carbone X56, X50, X65, X70 renfermant **0,12 % C, 0,45 % Si, 0,25 % S, 1,9 % Mn, 0,1 % V, 0,1 % Nb, 0,015 % Al**. Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinée à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier de laminage contrôlé [3].

Tableau I.2 : composition chimique des pipelines [15].

API Grade	Steel Alloying Approach
X120	AF/Bainite/Martensite, C <0.10, Mn<2.0, Si<0.40, Nb<0.06, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B, Pcm≤0.25
X100	AF/Bainite, C<0.06, Mn<2.0, Si<0.40, Nb<0.06, Cu, Ni, Cr, Mo, V, Pcm≤0.23
X80	F/AF, C≤0.06, Mn<1.70, Si<0.40, Nb≤0.10, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B, Pcm≤0.18
	F/AF, C≤0.06, Mn<1.70, Si<0.40, Nb≤0.10, Cu, Ni, Cr, Mo, V, B, Pcm≤0.21
X70	D/t<50: F/AF, C≤0.06, Mn≤1.65, Si<0.40, Nb≤0.10 only, or Nb+Mo, Pcm≤0.18 or 0.21
	D/t>50: F/P, C≤0.10, Mn≤1.65, Si<0.40, Nb≤0.065 only, or Nb+V, Pcm≤0.20
X65	F/P, C≤0.10, Mn≤1.65, Si<0.40, Nb≤0.065 only, or Nb+V≤0.15 Pcm≤0.23
X60	F/P, C≤0.10, Mn≤1.50, Si<0.40, Nb≤0.065 only, or Nb+V≤0.12, Pcm≤0.23
X52	F/P, C≤0.10, Mn≤1.20, Si<0.40, Nb≤0.050 only, Pcm≤0.17
X42	F/P, C≤0.10, Mn≤1.00, Si<0.40, Nb≤0.050 only, Pcm≤0.16
API 5LB	F/P, C≤0.20, Mn≤1.00, Si<0.40, Pcm≤0.16

I.5.2 Propriétés mécaniques

I.5.2.1 Propriétés de traction

PSL I Grades A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, et X70 doivent être conformes aux exigences de traction spécifiées dans tableau.I.3.

PSL 2 Grades B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, Et X80 doivent être conformes aux exigences de traction spécifiées dans tableau.I.4.

Autres qualités intermédiaires aux notes énumérées entre X42 et X80 doivent être conformes aux exigences de traction convenues entre l'acheteur et le fabricant, et les exigences doivent

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES PIPELINES

être conformes à celles qui sont indiquées dans le tableau.I.3 (pour PSL 1) ou tableau.I.4 (pour la canalisation PSL2).

Pour les tubes expansés à froid, le rapport de la limite d'élasticité du corps et la résistance à la traction finale du corps de chaque tuyau d'essai sur lequel la limite d'élasticité corporelle et la résistance à la traction déterminée, ne doit pas dépasser 0,93. La limite d'élasticité doit être la contrainte de traction nécessaire pour produire un allongement total de 0,5% de la longueur de mesure déterminée par un extensomètre. Lorsque l'allongement est enregistré ou signalé, l'enregistrement ou le rapport doit indiquer la largeur nominale de l'éprouvette lorsque la bande les spécimens sont utilisés et le diamètre et la longueur du calibre Des éprouvettes à barres rondes sont utilisées, ou doivent être Les spécimens sont utilisés. Pour les tuyaux de catégorie A25, le fabricant Peut certifier que les matériaux fournis ont été testés et satisfait aux exigences mécaniques du grade A25 [13].

Tableau I.3 traction pour PSL1

(1)	(2)		(3)		(4)
Grade	Yield Strength, Minimum		Ultimate Tensile Strength, Minimum		Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	
A25	25,000	(172)	45,000	(310)	a
A	30,000	(207)	48,000	(331)	a
B	35,000	(241)	60,000	(414)	a
X42	42,000	(290)	60,000	(414)	a
X46	46,000	(317)	63,000	(434)	a
X52	52,000	(359)	66,000	(455)	a
X56	56,000	(386)	71,000	(490)	a
X60	60,000	(414)	75,000	(517)	a
X65	65,000	(448)	77,000	(531)	a
X70	70,000	(483)	82,000	(565)	a

Tableau.I.4 Traction pour PSL2

(1)	(2)		(3)		(4)		(5)		(6)
Grade	Yield Strength, Minimum		Yield Strength, Maximum ^b		Ultimate Tensile Strength, Minimum		Ultimate Tensile Strength, Maximum ^c		Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	
B	35,000	(241)	65,000 ^d	(448)	60,000	(414)	110,000	(758)	a
X42	42,000	(290)	72,000	(496)	60,000	(414)	110,000	(758)	a
X46	46,000	(317)	76,000	(524)	63,000	(434)	110,000	(758)	a
X52	52,000	(359)	77,000	(531)	66,000	(455)	110,000	(758)	a
X56	56,000	(386)	79,000	(544)	71,000	(490)	110,000	(758)	a
X60	60,000	(414)	82,000	(565)	75,000	(517)	110,000	(758)	a
X65	65,000	(448)	87,000	(600)	77,000	(531)	110,000	(758)	a
X70	70,000	(483)	90,000	(621)	82,000	(565)	110,000	(758)	a
X80	80,000	(552)	100,000 ^e	(690)	90,000	(621)	120,000	(827)	a

I.6 Laminage

Le laminage est conduit en deux temps .la première étape est effectuée à haute température. L'austénite recrystallise vite et de manière homogène. Une part très importante de la réduction d'épaisseur de la brame est appliquée dans ce domaine. au fur et à mesure que la température baisse, la recrystallisation devient de plus en plus difficile. en maîtrisant bien la température et le temps entre chaque passe ,on aboutit à une austénite recrystallisée fine et homogène .Au cours de l'étape suivante, on amène progressivement la tôle à l'épaisseur désirée, et on confère à l'austénite de bonnes caractéristiques en vue du changement de phase $\gamma \rightarrow \alpha$. la dernière phase du laminage, pratiquée en dessous de la température T_{NR} de non recrystallisation de l'austénite, permet d'écrouir cette phase. L'écrouissage de l'austénite favorise la germination de nombreux grains de ferrite et affiner la microstructure finale [8] .

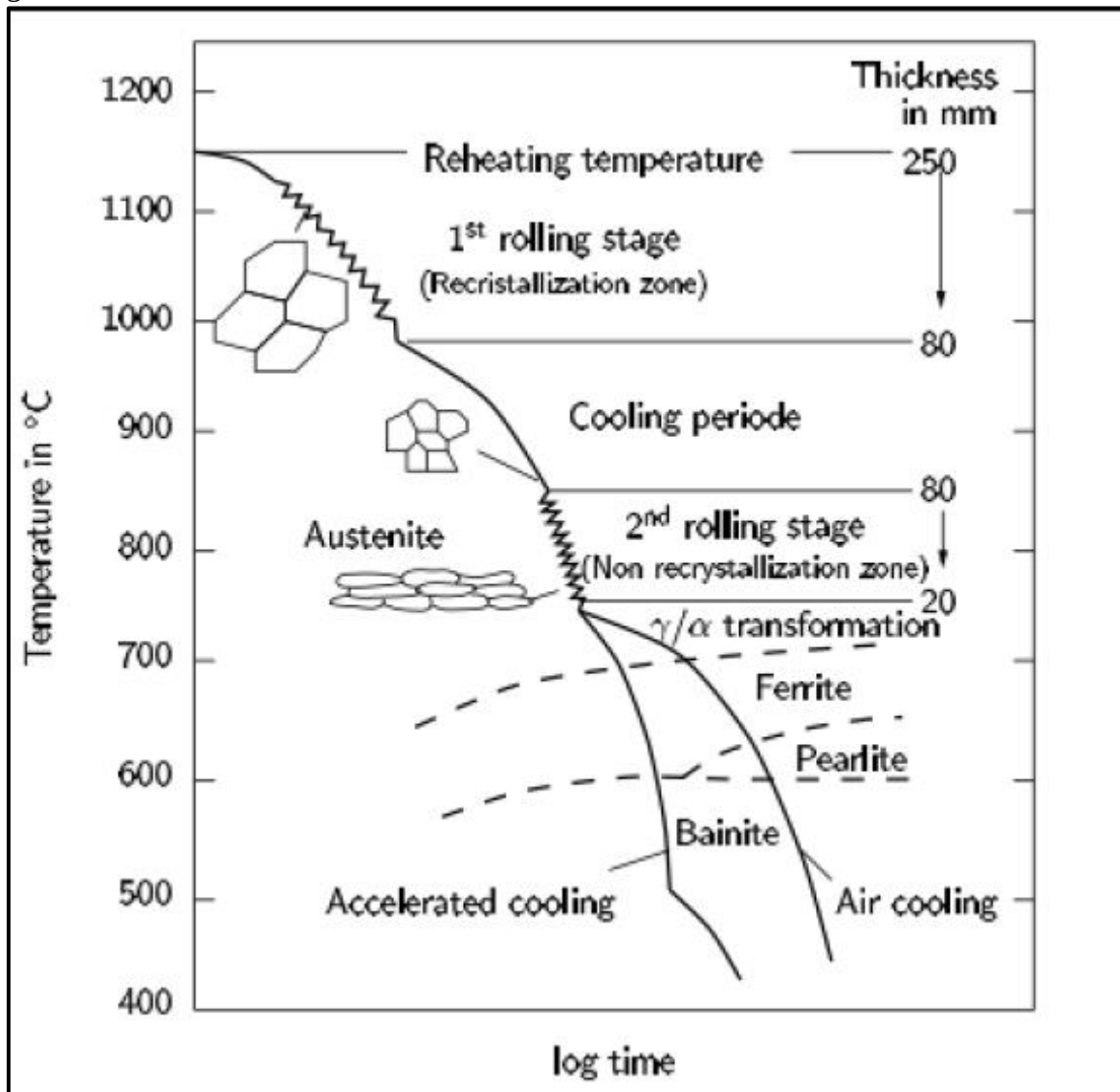


Figure I.4 : Etapes caractéristiques du schéma de laminage [8].

I.7 La soudabilité

La soudabilité décrit la facilité avec laquelle un métal peut être soudé à un niveau satisfaisant. Soudabilité pauvres implique que les processus qui peuvent être utilisés sont limités et que d'importantes compétences de soudure est nécessaire. Bonne soudabilité signifie qu'un grand nombre de processus peuvent être utilisés et que seul un niveau modéré de contrôle et de compétence est requise. Les aciers au carbone ont généralement une bonne aptitude au soudage, et de l'acier inoxydable ont juste la soudabilité [17]. Les propriétés de soudabilité de l'acier sont très important .Elles seront meilleures si la teneur de carbone est faible, le rôle des autres éléments d'alliages n'est cependant pas négligeable. Comme le stipule la relation suivant [4] :

$$C_{\text{éq}} = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Mo + Cr + V}{5}$$

Ceci explique l'évolution des aciers pour tubes, constatée au cours des 40 dernières années est présentée dans un diagramme(C, C_{éq}) figure. Aujourd'hui, la plupart des aciers utilisés pour fabriquer des tubes ont une teneur en carbone de l'ordre de 0.05%.

Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haut Limite d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers pour tubes) [2] :

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

La valeur PCM est généralement définie comme un maximum de 0,18 à 0,2. La formule de PCM est de plus en plus utilisée pour le bas moderne-alliage acier pipeline où la teneur en carbone est inférieure à 0,1 %, tandis que la formule international est utilisée pour les aciers

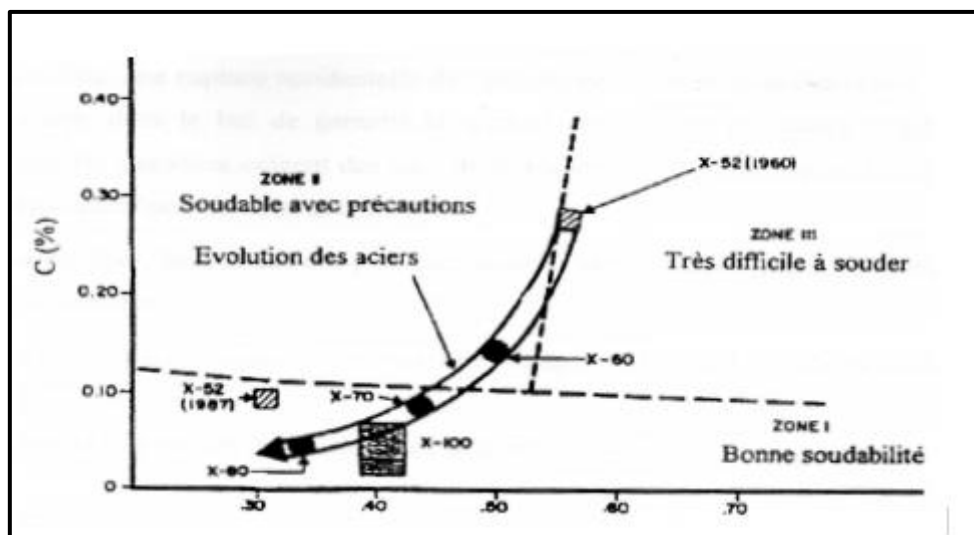


Figure I.5 : Evolution des compositions des aciers pour tubes en fonction de la soudabilité [4].

I.8 Fabrication des tubes

La fabrication des tubes pour pipelines est la transformation des plaques d'acier en tubes en vue de son utilisation qui peut changer d'un produit à un autre et d'une région à une autre [14].

I.8.1 Familles de tubes

Il existe trois grandes familles de tubes :

- Les petits tubes soudés dont le diamètre ne dépasse pas $219\text{mm} \leq (8'')$.
- Les moyens tubes soudés dont le diamètre est compris entre 219mm et 406mm ($9''$ à $16''$).
- Les grands tubes soudés dont le diamètre est supérieur à 406,4 mm ($16''$) [14].

I.8.2 Tubes soudés en spirale

Dans la production de tuyaux en spirale (également connu sous le tuyau de couture hélicoïdale), bande à chaud ou la feuille est en continu conformé en tube par un dispositif de formation de spirale de l'application d'un rayon de courbure constant, la bande attenante les bords étant également soudés en continu en ligne. Contrairement à la production de tubes soudés longitudinalement, dans lequel chaque diamètre de tuyau nécessite une certaine la largeur de la plaque, la production de tubes en spirale est caractérisée par le fait que les différents diamètres de tubes peuvent être fabriqué à partir d'une seule bande (feuillards) ou la largeur de la plaque. En effet, l'angle d'approche de la bande telle qu'elle est introduite dans l'unité de formage peut être modifié. Le Plus cet angle d'entrée, plus le diamètre de la conduite (pour une largeur de bande donnée).

L'optimum technique et économique dans le tuyau en spirale de fabrication se situe dans un rapport de diamètre du tuyau à largeur à partir de la matière comprise entre 1: 2 et 1: 2,2.

(Figure I.6) illustre le rapport entre le diamètre du tuyau de départ pour une largeur de matière dans une comparaison entre soudés longitudinalement et la production de tubes en spirale, et aussi les dépendances mathématiques qui appliquent dans la production de tubes en spirale entre l'angle d'alimentation, bande / largeur de feuillards et de diamètre du tuyau Dans l'état actuel de la technologie de production de tubes de grand diamètre, la gamme de diamètres de tuyaux couvertes par le procédé de soudage en spirale se situe entre env. 500 et 2500 mm Le matériau de départ employé pour paroi de la conduite des épaisseurs allant jusqu'à env. 20 mm prend la forme d'une large bande laminée à chaud. Assiette en longueurs individuelles jusqu'à 30 m sont généralement requis pour des épaisseurs de paroi de tuyau de plus de 20 mm.

Les méthodes de production de tuyaux en spirale se divisent en deux catégories principales:

- Installations avec intégré formant et des lignes de soudage SAW.
- Installations avec la formation séparée et des lignes de soudage SAW [12].

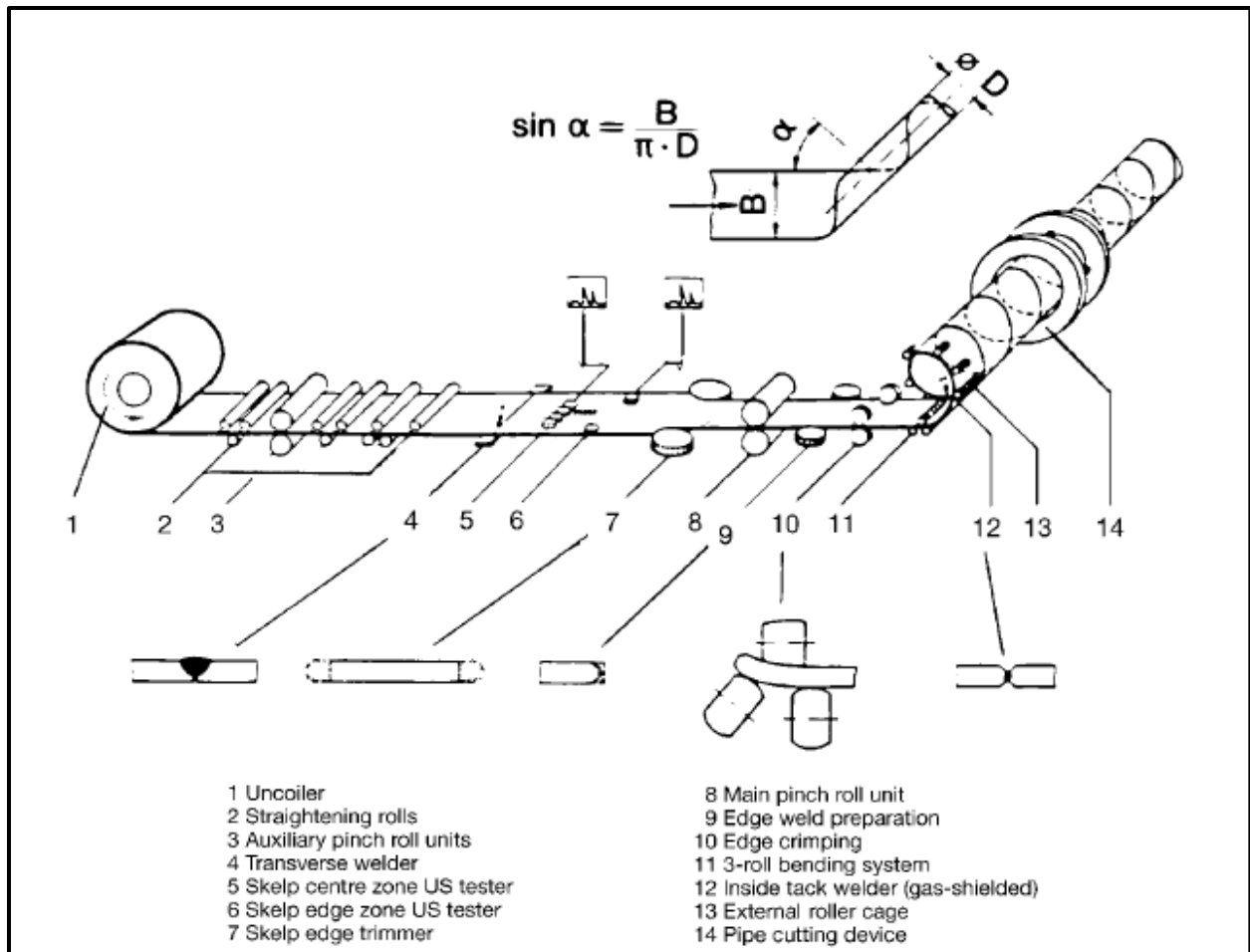


Figure I.6: Représentation de la fabrication des pipelines spiraux [12].

I.8.3 Les tubes soudés sous forme longitudinale

Les tubes de grand diamètre soudés longitudinalement sont fabriqués selon le procédé "UOE", désignation qui reprend la variation de forme au cours de la fabrication ; le croquage, la forme « U », la forme « O », soudage et enfin l'expansion [6] :

a) Croquage et formage: Cette étape où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivante, à partir de ça la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presse la première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O" voir la figure (Figure III 7):

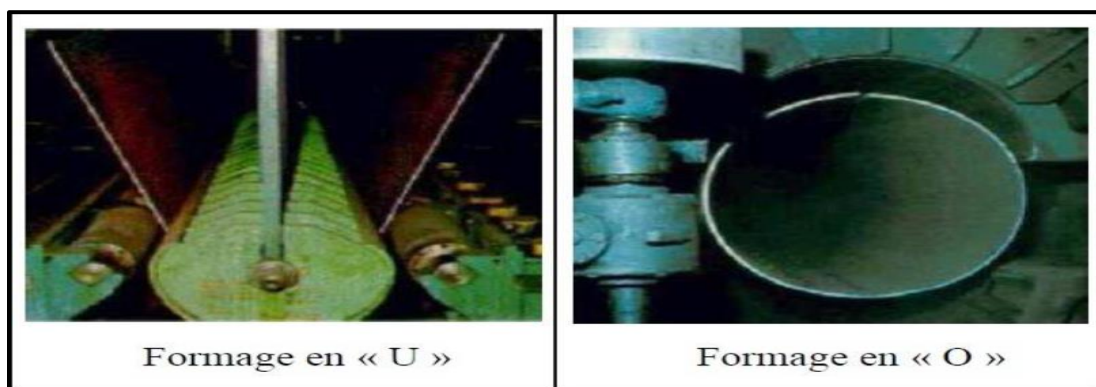


Figure I.7 : La mise en forme des tubes par le procédé « UOE » [6]

b) L'Expansion et calibrage : Dans le but d'obtenir des tubes de section parfaitement circulaire, les tubes après être soudés sont soumis à une expansion mécanique ou hydraulique qui leur fait subir une augmentation de diamètre de 1 à 1.5 %. (Figure I-8) Cette opération a pour conséquence de relaxer les contraintes résiduelles. Enfin une opération de Chanfreinage est effectuée par une Lameuse afin de faciliter le raccordement des tubes entre eux.

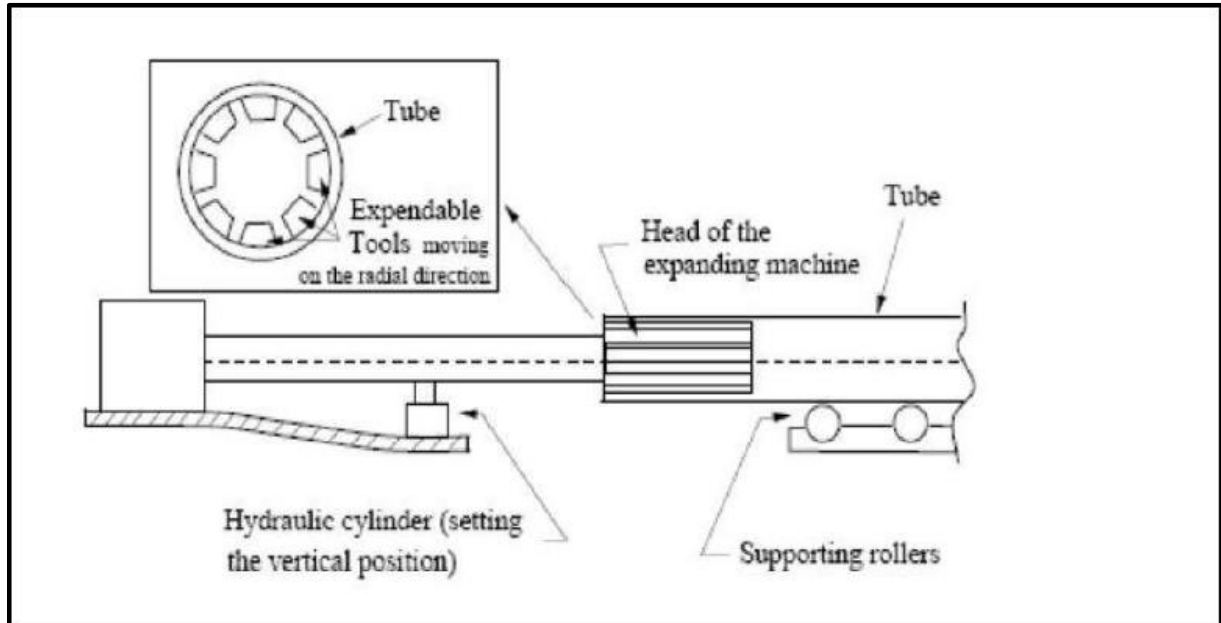


Figure I.8 : Machine D'expansion [6].

c) Le soudage : le soudage du tube est effectué intérieurement et extérieurement à l'aide de têtes soudeuses automatiques en utilisant la technique de soudage à l'arc sous flux. La figure suivante représente Le soudage intérieur et extérieur du tube.

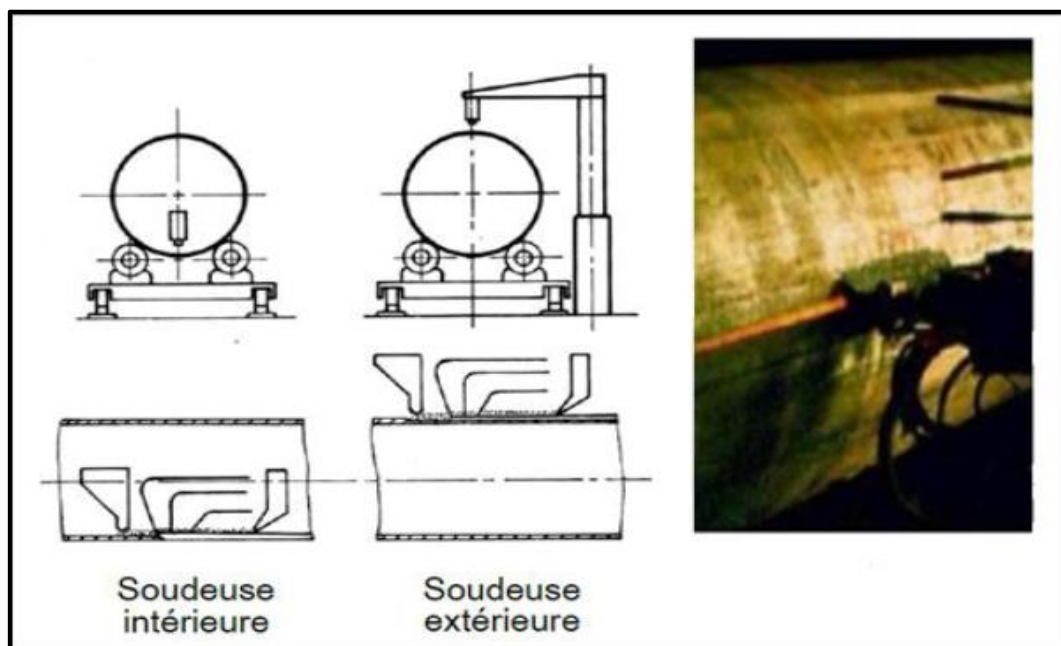


Figure I.9 : Soudage des tubes par le procédé « UOE » [6].

I.8.4 Les tube réalisé sans soudure

Ainsi que son nom l'indique, le tube sans soudure présente une homogénéité métallurgique parfaite dans sa section, puisqu'il est issu "en masse d'un lopin d'acier». L'utilisation du tube sans soudure se situe donc surtout dans les domaines où les sollicitations mécaniques ou corrosives sont les plus exigeantes : forages pétroliers, industries mécaniques et automobiles, appareils sous pression, etc...) [14].

Les tubes formés sans soudure, sont généralement de petits diamètres et de longueur de moins de 450 mm, les méthodes principales de fabrication de ce type de tube se font de la façon suivante ; le métal est contenu entre la filière et l'aiguille, et par des pressions de poussées axiales, on obtient un tube monobloc sans soudure. Il existe une variante dite filage sur nez d'aiguille où l'aiguille est fixe [5].

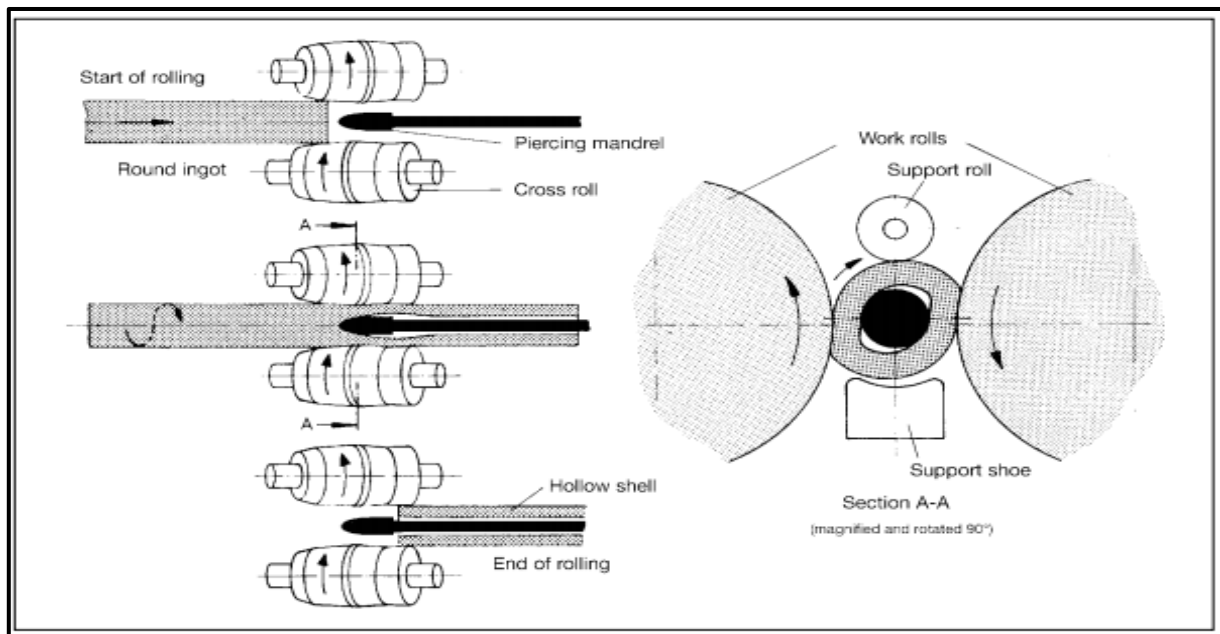


Figure I.10: Fabrication des tubes sans soudures [12].

I.9 Revêtement des tubes

L'objectif principal est de protéger le tube par le processus de Revêtement de la corrosion interne et externe [1].

I.9.1 Revêtements extérieurs

I.9.1.1 Revêtement Fusion Bonded Epoxy

Les enduits époxy des Fusion-collés sont les enduits de la couche mince, 0.5-0.6 millimètre d'épaisseur. Ils ont été développés séparément aux Etats-Unis et au Royaume-Uni. L'époxyde a une liaison chimique très forte à l'acier qui fournit la bonne adhérence. FBE est également flexible et est l'enduit le plus utilisé généralement pour les canalisations tournoyées et pour les pipes intérieures empaquetées. La pratique américaine est de chauffer la pipe propre à 250-260°C et d'appliquer la poudre époxyde directement à la pipe chaude et tournante comme poudre fine. Les particules époxydes fondent et circulent sur la surface chaude de pipe. Juste après enduire, la pipe est refroidie par l'extinction de l'eau. En Europe, la pipe propre est enduite d'abord d'une amorce gravure à l'eau forte de chromate avant d'être chauffée pour enduire. Le

mieux habillé micro-grave à l'eau-forte la surface en acier et augmente l'adhérence enduisant. L'adhérence améliorée permet à une plus large gamme des formulations époxydes d'être employée. Le schéma 8-3 illustre le processus enduisant. Les enduits de FBE en eau de mer peuvent résister aux températures de 85-95°C. À ces températures élevées, il est habituel pour appliquer de doubles enduits de FBE appliqué dans deux passages par la machine enduisant tandis que la pipe est chaude. Des enduits de FBE peuvent être employés avec ou sans un enduit concret de poids. Puisque les enduits de FBE sont glissants, il est commun pour fournir les bandes anti glissantes de 1 m à chaque extrémité de la pipe pour réduire le risque de patinage concret [16].

Les revêtements FBE constituent des couches de résine durcissant thermoplastiques, qui sont apposées par un procédé thermostatique sur les tubes d'acier et les protègent de la corrosion. Le FBE peut être utilisé à des températures d'exploitation allant jusqu'à 110 degrés C, l'épaisseur typique est comprise entre 350 et 450 micromètres. Une deuxième couche entraîne une excellente résistance aux détériorations du pipeline, même dans les conditions environnementales les plus difficiles [1].

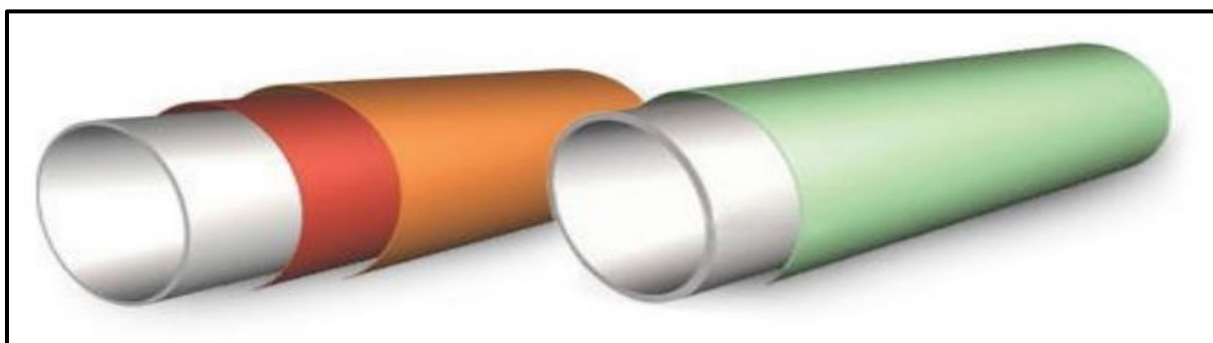


Figure I.11 : Revêtement FBE [1].

I.9.1.2 Revêtement extérieur polyoléfine 3 couches

Polyéthylène de Milieu-densité (MDPE) comme un enduit d'enveloppe a été développé dans les années 70 en retard et a été adopté par les producteurs allemands et japonais. C'est un enduit modérément épais, en général 3-4 millimètres. Le polyéthylène à haute densité (HDPE) a une plus haute résistance mécanique et est appliqué comme enduit plus mince de 1.5-2.5 millimètre. Pour les deux matériaux le procédé enduisant habituel est d'appliquer une amorce époxyde à la pipe, suivie d'un adhésif polyéthylène-basé amorphe, au-dessus duquel un ou deux couches de feuille de polyéthylène sont appliquées comme enveloppe de cigarette. L'enduit se nomme un enduit, un 3PE ou un 3LPE triple. L'amorce époxyde est un enduit très mince, en général 75 microns d'épaisseur ; par conséquent, il ne couvre pas complètement la surface. Le polyéthylène a une résistance électrique élevée, une prise d'humidité très faible, et une expectative de longue vie. La tolérance supérieure de la température de l'enveloppe de polyéthylène est au sujet de 65°C, un facteur qui reflète la tolérance de l'adhésif. Les soucis principaux d'un point de vue de matériaux sont corrosion d'enduit de plancher, résultant des boursouflures, et accès courant insatisfaisant de CP en raison de la résistance électrique élevée. Les enduits de polyéthylène peuvent soyez couvert d'enduit concret de poids et soyez également approprié pour l'usage sur les canalisations tournoyées qui ne peuvent pas être enduites du béton conventionnel. L'enduit de polyéthylène est glissant, et quand un enduit concret de poids est appliqué sur le dessus, il est habituel pour fournir les bandes anti glissantes pour réduire le risque de patinage entre le

béton et l'enduit. Les bandes sont des longueurs de 1 m du sable contenant matériel pulvérisé appliqué aux deux fins de chaque longueur de pipe [16].

Le revêtement polyoléfine 3 couches est une combinaison de résine thermoplastique durcissant, de couche d'adhérence copolymère et de thermoplastique apposée sur les tubes d'acier afin de garantir leur protection [1]

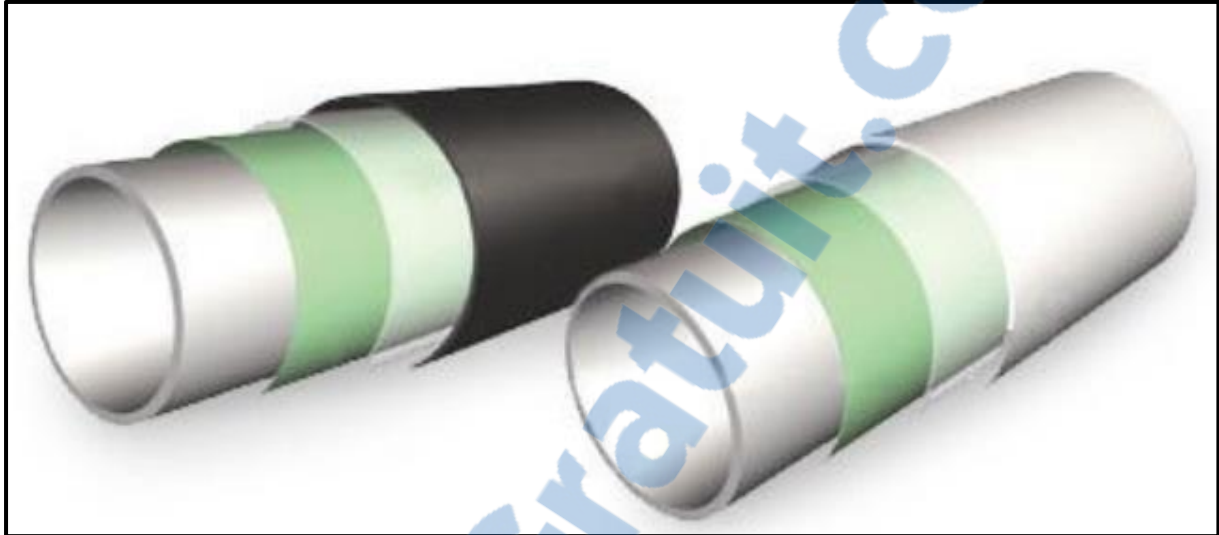


Figure I.12 : Revêtement Extérieur [1].

I.9.1.3 Revêtements par l'émail de goudron (Coal tar enamel coatings)

L'émail de goudron de houille et les couches de bitume étaient souvent utilisés sur beaucoup de pipelines plus vieux dans le monde entier. L'application est faite en emballant un tissu de fibre de verre autour de la pipe circonférence et le fait de saturer la couche avec un mélange fait fondre du bitume ou du goudron de houille. Les inconvénients de cette couche sont comme suite :

- C'est sensible aux changements de température hauts ou bas.
- C'est susceptible au forçement en raison du soulèvement de sol.
- La séparation de la couche se produit par le dommage d'impact ou de la pauvre préparation de surface sur la pipe [16].

I.9.1.4 revêtements par bande (Tape coatings)

Les couches de bande sont souvent utilisées pour réparer des sections de pipe qui ont été fait des fouilles pour réparer des régions de couche endommagée existante. Les types les plus communs sont des bandes appliquées chaudes où un tissu enduit avec le bitume est appliqué autour de la circonférence et chauffé. Sinon, le froid s'est appliqué les bandes incluent les faits du polyéthylène, qui ont une couche auto-adhésive. Pendant que la méthode de couche de bande est relativement bon marché, un inconvénient est cette bande les couches n'est pas tolérante au haut opérationnel les températures et peuvent être susceptibles au soulèvement de sol [16].

I.9.1.5 revêtements par un plastic Rétractable a la chaleur (Heat-shrinkable plastic coatings)

Ce sont des manches essentiellement de plastique ou des draps qui sont sensibles chauffer. Quand ils sont placés autour de la circonférence de pipe et la chaleur est appliquée d'une lampe à souder, cela provoque le plastique se contracter et rétrécir sur la surface de pipe. La méthode est généralement utilisée pour les pipes d'un plus petit diamètre, particulièrement autour des assemblages d'assemblages/champ de pipe [16].

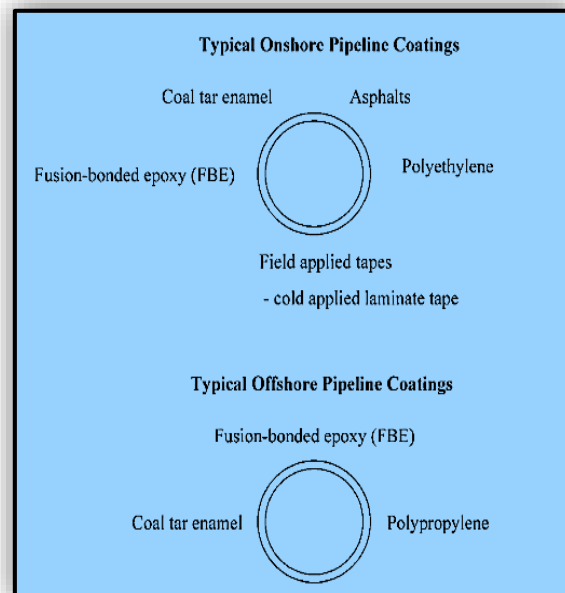


Figure I.13 : Le Revêtement extérieur des pipelines [16].

I.9.2 Revêtements intérieurs

Revêtements pour l'amélioration du débit Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur typique de 60 à 100 micromètres. Il en résulte une amélioration de la capacité de transport du gaz, une minimisation des résistances de friction et donc une réduction des stations de compresseurs. La simplification du nettoyage et la protection temporaire contre la corrosion font du revêtement Flow Coating une solution unique et économique pour le transport du gaz.

Une résine époxy liquide est pulvérisée sur la paroi interne des tubes dans une épaisseur de 400 à 500 micromètres. Pour ce faire, nous utilisons une nouvelle génération de résines époxy sans solvants Un objectif permanent de l'exploitation des pipelines est d'assurer des transports massifs d'hydrocarbures dans le respect de l'Environnement et de la Sécurité. Cet objectif est atteint par la mise en œuvre de plan de surveillance et de maintenance qui est destiné à maintenir l'intégrité des lignes et éviter toute perte de confinement. La présentation expose les risques auxquels sont soumis les pipelines et les mesures qui sont mises en œuvre pour y répondre [1].

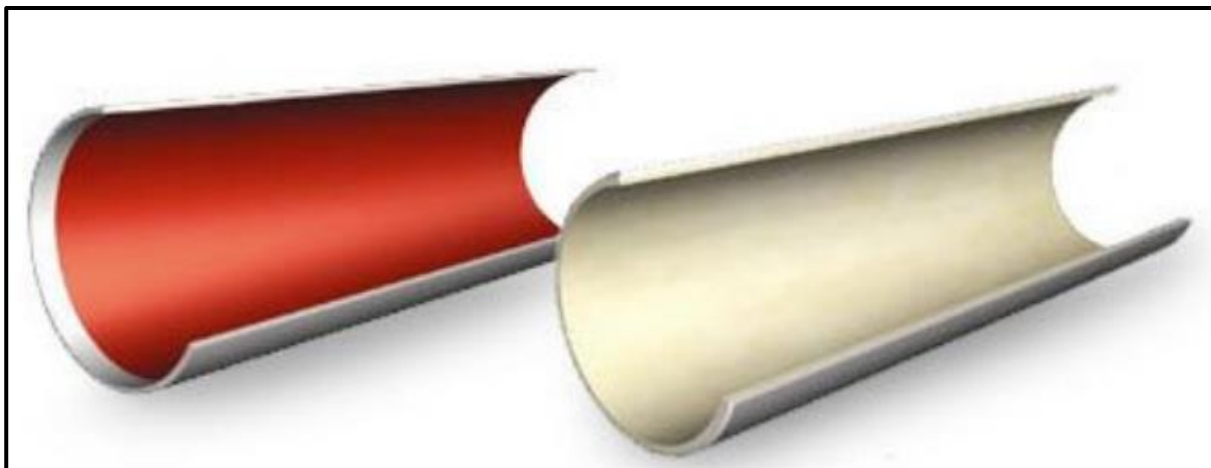


Figure I.14: Revêtement en résine époxy liquide pour les pipelines d'eau [1].

I.10 Défauts rencontrés dans les canalisations

Bien que le transport de produits dangereux par pipeline soit considéré comme un moyen de transport sûr et malgré la gestion rigoureuse du réseau de pipelines, des défaillances sont identifiées principalement dans la surveillance des travaux effectués dans ce couloir. La sécurité du réseau de transport et la disponibilité, exempte de perturbations de l'agent énergétique gaz naturel sont incontournables si l'on veut garantir la prospérité économique. La multiplication des accidents plus ou moins graves, notamment dus à la corrosion, ainsi que leur incidence sur l'économie mondiale et leur impact sur l'environnement rendent le transport des hydrocarbures de plus en plus préoccupant. Les cas les plus fréquents sont relatifs à des incidents amorcés à partir de défauts issus soit de l'élaboration du matériau, soit de la fabrication, de l'assemblage, de la réparation ou des conditions d'exploitations des tubes et qui ont conduit à la naissance et à la propagation des fissures superficielles où traversantes suivies de fuites. On trouve six catégories principales de causes des accidents :

- Agression externe ou activité tierce (les plus répandus) ;
- Corrosion interne ou externe ;
- Défaut de construction ou défaillance de matériels ou défaut mécanique ;
- Mouvement de terrain ou risques naturels en général ;
- Erreurs opérationnelles;
- Autres et causes inconnues [1].

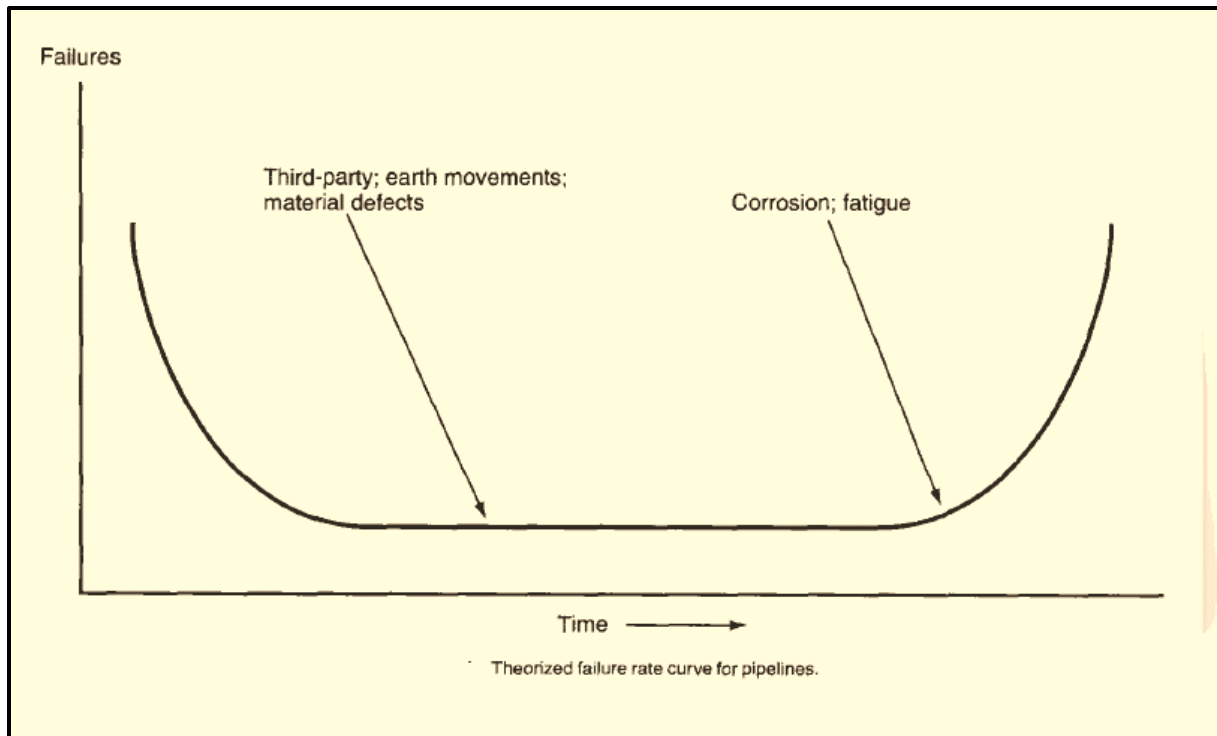


Figure I.15 : La courbe de fiabilité des pipelines [18]

I.11 Méthodes de réparation des tubes

I.11.1 Réparation par demi-coquilles soudées

La procédure de réparation en charge des canalisations de transport d'hydrocarbures par l'installation de demi-coquilles soudées à encerclement total. Les demi-coquilles soudées à encerclement total, également connues sous le nom de demi-coquilles de type B, renforcent la zone défectueuse et contiennent toute éventuelle fuite, et sont par conséquent utilisées pour réparer des défauts débouchant ou non-débouchant d'orientation axiale ou circonférentielle. La figure suivante présente la géométrie de demi-coquilles.

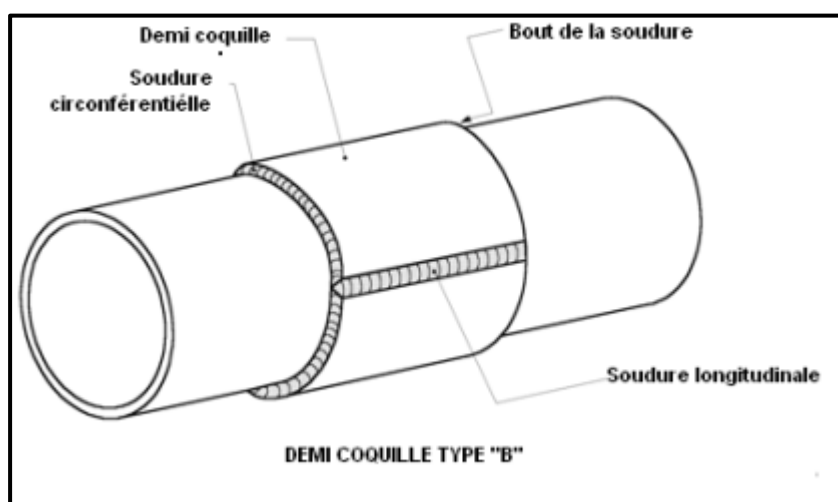


Figure I.16 : Géométrie de demi-coquilles.

Les demi-coquilles soudées permettent de réparer les défauts suivants :

- Corrosions internes et externes ;
- Enfoncements simples ou combinés à d'autres défauts ;
- Entaille et rayures ;
- Fissures au niveau du corps du tube ou du cordon de soudure circonférentiel. La figure suivante présente l'opération de soudages de demi-coquilles (STT) [11].



Figure I 17 : Opération de soudages de demi coquilles (STT) [11].

I.11.2 Réparation par Clock spring

Les compagnies d'exploitation de pipelines peuvent périodiquement trouver des défauts dans leurs canalisations pendant les inspections et l'opération normale et l'entretien. Le défaut a pu avoir été provoqué par des dommages d'excavation, la corrosion, des erreurs de construction, ou le processus de fabrication. Des manchons ou les brides en acier de réparation ont été typiquement utilisées pour réparer des dommages de canalisation ou des défauts ou la section endommagée ont été arrêtés et remplacés. Une fois correctement appliquée le manchon composé de clock spring reconstitue la canalisation à la condition de fonctionnement sûre sans devoir arrêter et remplacer la canalisation. Les manchons composées de clock spring sont utilisées pour dépanner provisoires et permanents sur le gaz naturel et les canalisations liquides [10].

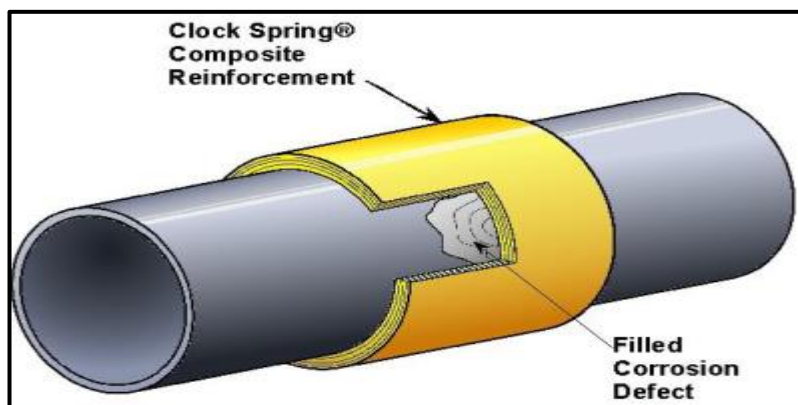


Figure I.18: Réparation par clock spring [10].

I.12 Avantages de pipelines

Pour le transport de grandes quantités de liquide (le liquide ou le gaz), un pipeline est incontestablement le mode le plus privilégié de transport. Même pour les solides, il y a beaucoup de cas cette faveur le pipeline sur d'autres modes de transport. Les avantages de les pipelines sont :

- Économique dans beaucoup de circonstances. Les facteurs qui préfèrent des pipelines incluent grand débit, terrain accidenté et environnement hostile (tel que transport par les marais). Sous les conditions ordinaires, les pipelines peuvent liquides de transport (liquides ou gaz) à une fraction du prix de transport par le camion ou le train Le transport ferme par le pipeline est beaucoup plus complexe et coûteux que le transport liquide. Enfin, dans beaucoup de cas, pipelines sont utilisés pour transporter des solides parce que le prix est inférieur que pour d'autres modes du transport, tel que les camions.
- Consommation d'énergie basse. Le fait d'être intensif d'énergie de grands pipelines est beaucoup inférieur que ce de camions et est encore inférieur que ce de rail. Le le fait d'être intensif d'énergie est défini comme l'énergie consommée dans le transport poids d'unité de chargement sur la distance d'unité, dans les unités telles que Btu par tonmile. La table 1.2 compare le fait d'être intensif d'énergie de pipelines à ceux pour d'autres modes de transport.
- Sympathique à l'environnement. C'est dû principalement au fait que la plupart des pipelines sont le métro. Ils ne posent pas la plupart des problèmes environnementaux associé aux camions et aux trains, tels que la pollution de l'air, le bruit, les embouteillages sur les autoroutes et aux traversées de rail et aux animaux tuants qui se sont égarés sur autoroutes et chemins de fer. Les oléoducs peuvent polluer la terre et les fleuves quand a la fuite ou la rupture se développent. Cependant, beaucoup plus de déversements accidentels se produiraient si les camions et les trains ont transporté du même pétrole [19].

I.13 contraintes exerçant sur les conduites

I.13.1 Sollicitation d'un réseau

Le contenu du gazoduc et sous pression cette pression constitue une source de contrainte s'exerçant sur la paroi de la conduite. Le sol, autour du pipeline, peut bouger et constituer une autre source de contrainte les procédés de fabrication des contraintes, tel le soudage, peuvent introduire également des contrainte résiduelle.

Dans une conduite, les contraintes s'exercent dans deux directions (Figure I.19) circonférentielle ment (contrainte dite circonférentielle) et longitudinalement (contrainte dite longitudinalement ou axiale) [14].

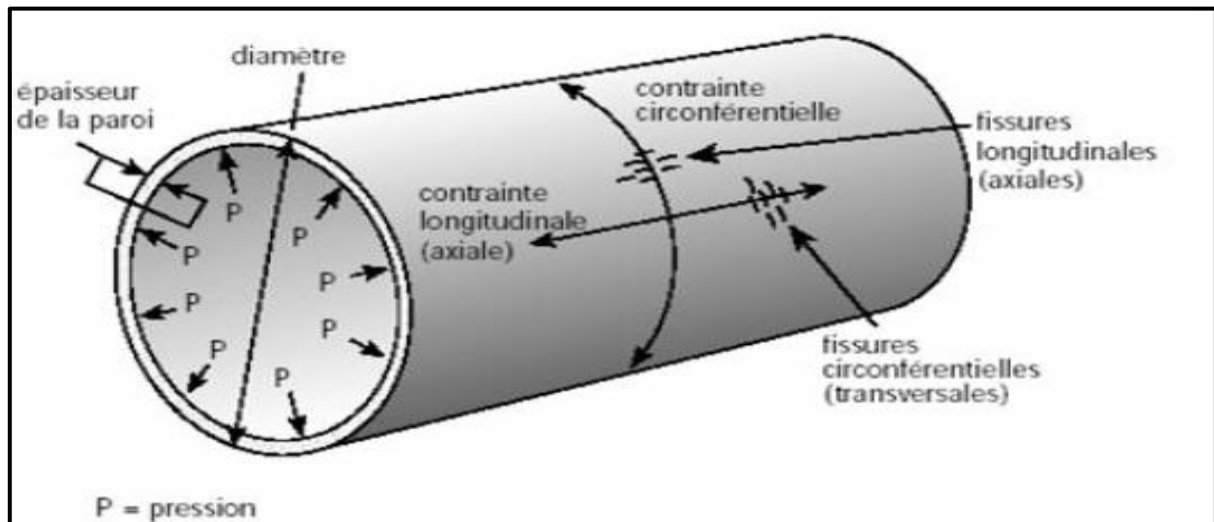


Figure I.19 : différentes contraintes s'exerçant sur un conduit [14].

I.13.2 sources de contrainte circconférentielle

Les différentes sources de contrainte circconférentielle sont [7]:

- La fabrication de la conduite induit des contraintes résiduelles
- La pression interne de service est le composant de contrainte le plus important
- La pression interne s'exerçant sur une conduite ovalisée, donne une contrainte de flexion au niveau des soudures, ou associée à des stries, à des piqûres de corrosion, éraflures, nous avons naissance de concentration de contraintes
- Les tassements et glissements de terrain induisent des contraintes secondaires,
- Les changements de températures le long de l'axe du gazoduc.

I.13.3 sources des contraintes longitudinales

Les sources des contraintes longitudinales sont :

- La pression interne de service donne une contrainte pouvant atteindre le tiers, voir la moitié.
- de la contrainte circconférentielle.
- Les glissements de terrain et tassement de sol.
- La variation de température le long de l'axe du gazoduc [7].

CHAPITRE II

GENERALITES SUR

LE SOUDAGE

Introduction

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler; soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base. Le soudage est un assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructive (une carrosserie), de poids (un panneau), économique (un plancher) ou d'autres.

Il peut entrer en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels le vissage, le sertissage, le rivetage, le collage, l'agrafage. L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, des trains, des avions, des fusées, de l'automobile, des ponts, tuyaux, des réservoirs et tant d'autres structures qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. De nombreux aciers d'usage général, et notamment des tôles et profilés, sont mis en œuvre par soudage.

II.1 Définition

Le soudage a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité physique entre les pièces à assembler est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces inter atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.

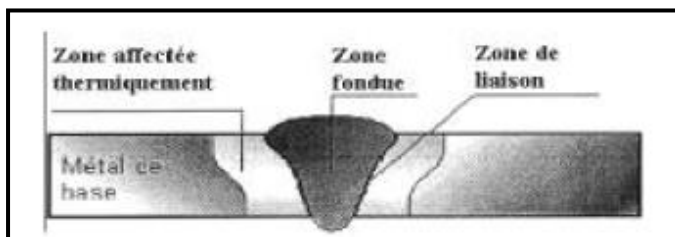


Figure II.1 : schéma d'un cordon de soudure [23]

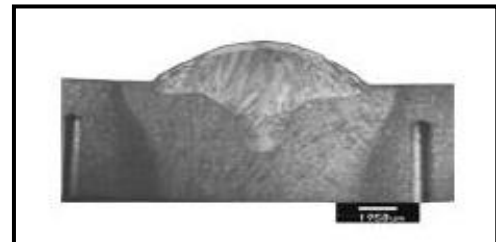


Figure II.2 : macrographie d'un cordon de soudure [23].

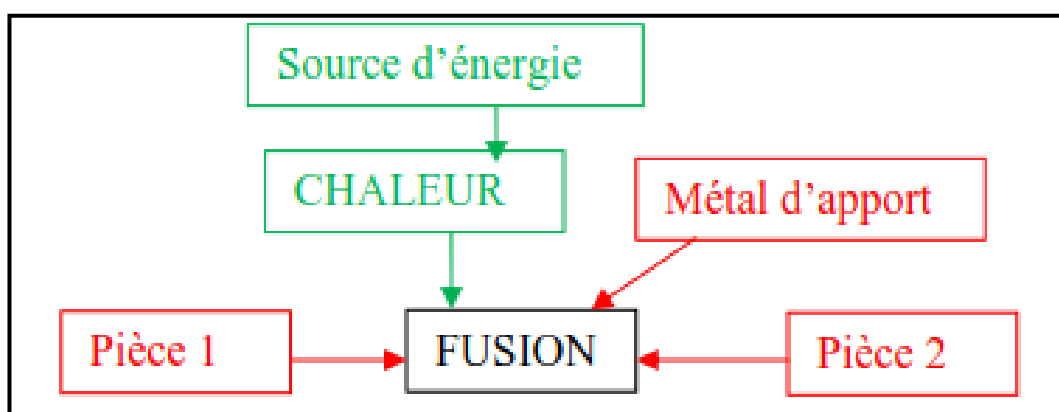


Figure II.3 : Principe d'une soudure [22].

CHAPITRE II GENERALITES SUR LE SOUDAGE

La continuité physique assurée par le soudage le différencie des assemblages mécaniques tels que par exemple le boulonnage, le rivetage, l'agrafage, ... ainsi que le collage [21]. Cerner le problème du soudage revient obligatoirement à faire une approche selon les aspects qui le caractérisent à savoir [23]:

- Aspect thermique
- Aspect chimique
- Aspect thermomécanique.

I.2 Procédés de soudage :

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que [32] :

a) Le type d'énergie mise en œuvre :

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

b) Procédés de soudage de pièces métalliques :

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

II.3 Les procédures de soudage des pipelines

Le soudage peut se faire par un Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée, un arc submergé, soudage à l'arc au gaz tungstène, soudage à l'arc sous gaz, soudage à l'arc au plasma... [25].

II.3.1 Soudage à l'arc électrique

Les différentes techniques de soudage à l'arc utilisent l'énergie calorifique d'un arc électrique entretenu entre une électrode et le métal à assembler.

Le métal d'apport est apporté par une baguette. Et la protection de la soudure se fait soit par un gaz ou par l'enrobage de la baguette [26].

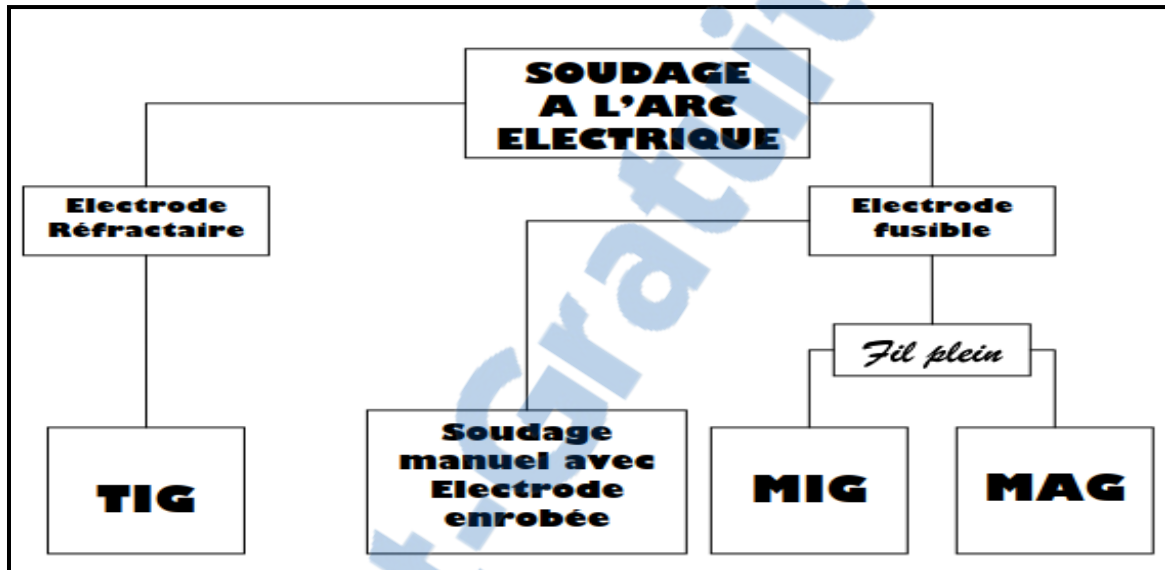


Figure II.4 : Les différents procédés de soudage à l'arc électrique [26].

II.3.1.1 Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées permet d'assembler ou de recharger des éléments ou des pièces métalliques au moyen de cordons de soudure. Il s'agit du type de soudage le plus répandu. L'énergie nécessaire à la fusion du métal est fournie par un arc électrique jaillissant entre les pièces à souder et une électrode fusible fournissant le métal d'apport. La soudure à l'arc électrique est une soudure de type autogène, pour l'assemblage de pièces en acier. Les assemblages ainsi obtenus sont très résistants puisque l'acier est mis en fusion et les deux éléments soudés ne forment plus qu'une seule masse en acier après soudage. Les applications de ce procédé sont particulièrement nombreuses. La mobilité des appareils et la grande diversité des types d'électrodes permettent d'effectuer des travaux sur un certain nombre de métaux et de leurs alliages comme les aciers non alliés ou faiblement alliés, les aciers inoxydables, les fontes et dans certaines conditions, l'aluminium, le cuivre et le nickel. Tous les types d'assemblage (bord à bord, d'angle...) et toutes les positions de soudage (à plat, en corniche...) sont possibles. Il y a mise en fusion des pièces à souder et du métal d'apport. Pour obtenir cette fusion il faut une température très élevée supérieure à 3000°C. Celle-ci est obtenue par court-circuit entre deux électrodes (la pièce à souder et l'électrode constituée de métal

CHAPITRE II GENERALITES SUR LE SOUDAGE

d'apport) en créant un «arc électrique» qui est une sorte d'étincelle continue de très forte puissance qui dégage à la fois de la lumière et une chaleur intenses [33].

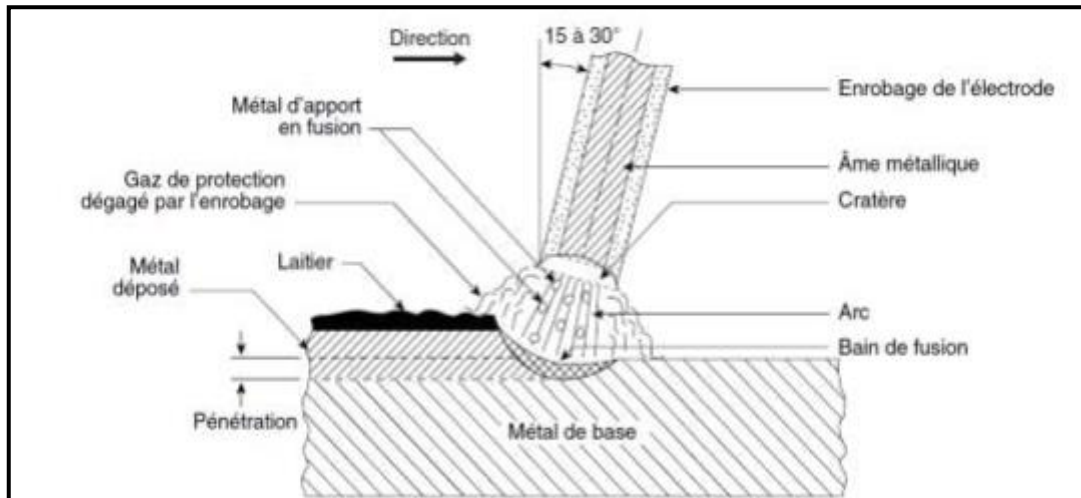


Figure II.5: Principe de la procédé du soudage SMAW [29]

c) Technique du soudage par l'électrode :

Dans le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, il convient de distinguer deux techniques :

- La technique montante : la soudure est démarrée en bas et s'effectue du bas vers le haut, pour chaque moitié du diamètre du tuyau. C'est une technique plus lente, l'énergie en jeu est moyenne, l'éblouissement est aussi limité, elle est plus sécurisante. La soudure formée est de meilleure qualité, en sa défaveur, c'est une technique plus lente. La technique
- descendante : à l'inverse on démarre en haut pour aller vers le bas. C'est une technique qui développe plus d'énergie, l'éblouissement est important. Mais elle est souvent préférée car deux fois plus rapide [34].

d) Avantages et inconvénient :

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V [29].

II.3.1.2 Soudage à l'arc électrique type TIG (Tungsten inert gas)

L'abréviation TIG (Tungsten Inert Gas) désigne le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène ; on le trouve quelquefois sous l'appellation de GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Son principe est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte protège la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage.

Le soudeur tient dans sa main la torche qui alimentera en énergie le bain de fusion. De cette torche jaillira un jet de gaz inerte, généralement de l'argon ou de l'hélium, voire un mélange argon +hélium. Ce gaz l'instar des autres procédés de soudage protégera le bain de fusion pendant toute l'opération. L'introduction éventuelle d'un métal d'apport peut être réalisée directement dans le bain de métal fondu soit sous forme de baguettes, soit sous forme de fil [30].

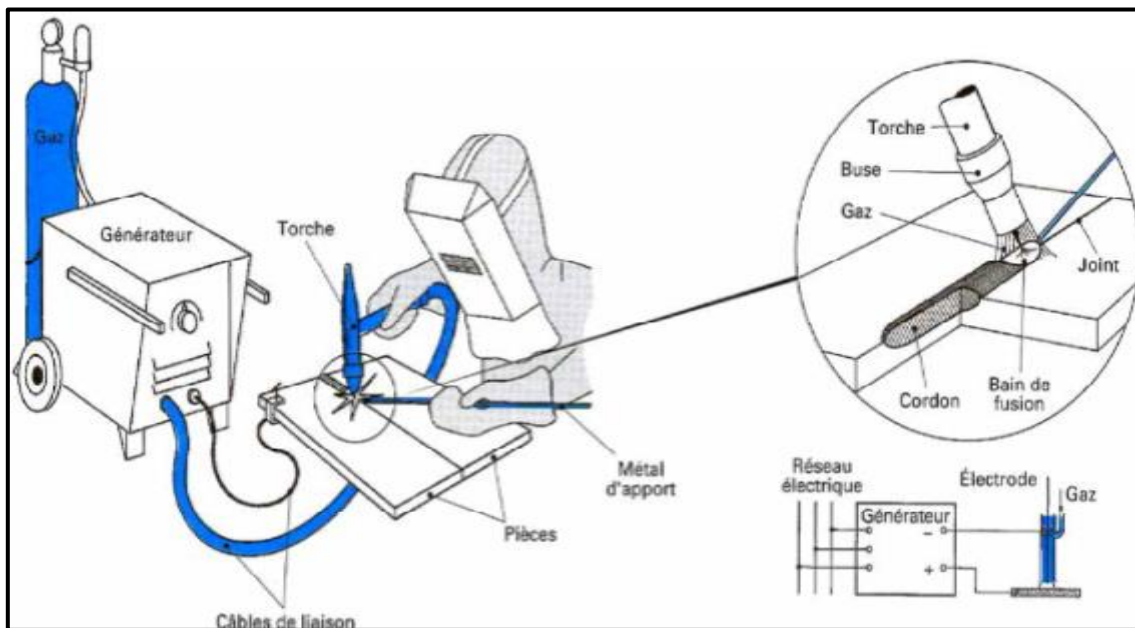


Figure II.6 : Principe de la procédé de soudage GTAW [30].

a) Le poste à souder TIG

Le poste à souder TIG est constitué d'un générateur qui fournit du courant continu ou alternatif (le choix de type de courant selon le type de matériaux à souder). L'intensité peut varier de quelques ampères à quelques centaines d'ampères. La tension à vide est comprise entre 60 V et 150 V [30].

b) Les électrodes

Comme indiqué dans l'abréviation, l'électrode est en tungstène. C'est un métal qui a la propriété d'avoir un point de fusion très élevé, de l'ordre de 3400°C. Le choix de l'électrode dépend essentiellement d'une part de la nature du métal à assembler et d'autre part, du diamètre de l'électrode qui lui sera conditionné par l'intensité nécessaire à la fusion de la tôle. Il existe principalement trois types d'électrode de tungstène :

- Le tungstène pur (99,7%) utilisé en courant alternatif pour des aluminiums.
- Le tungstène thorié à 1 et 2 % de thorium ; on l'utilise pour le soudage des aciers faiblement alliés (acier doux) en courant continu.

- Le tungstène au zirconium. Ces électrodes ont un point de fusion plus élevé et s'utilisent pour le soudage d'aluminium. Lorsque l'on soude les aciers et les aciers inoxydables, il est nécessaire d'affûter l'extrémité de l'électrode en pointe. Cet affûtage peut se faire avec un petit touret à meuler [30].

c) Gaz de protection

Les gaz utilisés pour le soudage (TIG) sont essentiellement l'argon et l'hélium. L'argon reste le gaz majoritairement employé. Il est comprimé dans des bouteilles en acier sous pression de 200 bars à une température de 15°C. L'argon est un gaz inerte. Il ne participe pas à la combustion et ne réagit chimiquement à aucun élément. C'est un gaz insipide et sans saveur [30].

d) Avantages de soudage par TIG

- Large gamme d'épaisseurs à souder ;
- Simple d'emploi ;
- Travail précis et esthétique ;
- Peu de fumées ;
- Soudage dans toutes les positions ;
- Procédé automatisable.

E) Inconvénients de soudage par TIG

- Faible vitesse de soudage ;
- Apport important d'énergie [30].

II.3.1.3. Les procédés de soudage MIG/MAG

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

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

- Le générateur de courant continu;
- Une source de gaz protecteur;
- Un système de refroidissement à la truche;
- La torche ou pistolet;

a) Fil d'apport et gaz de protection :

On distingue les gaz internes et les gaz actifs :

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

La composition des fils dépend :

- La nature des matériaux à souder;

CHAPITRE II GENERALITES SUR LE SOUDAGE

- Des pertes d'éléments pendant le soudage [29].

b) Principes du procédé de soudage MIG/MAG

Un fil métallique passe dans la torche et se trouve fondu dans l'arc. Le fil constitue à la fois un conducteur de courant et un métal d'apport. L'énergie électrique est fournie par une source d'alimentation de soudage. L'arc et le bain de fusion sont protégés par un gaz de protection soit inerte, soit actif [29].

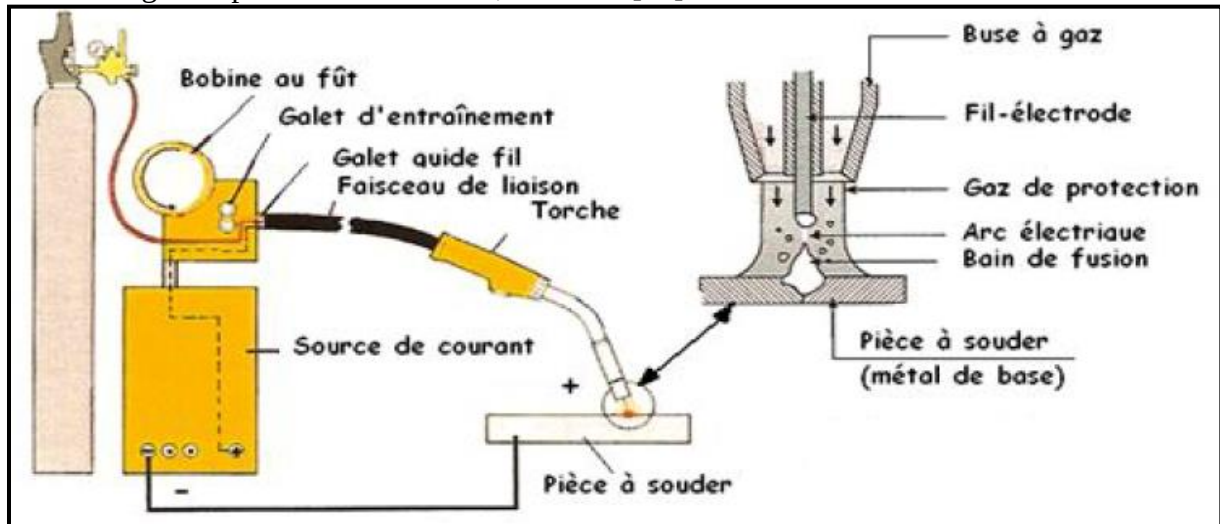


Figure II.7 : Principe de la procédé du soudage MIG/MAG [31].

b) Les avantages du procédé MIG/MAG

Le procédé de soudage MIG/MAG est plus utilisé que tout autre procédé et garantit :

- De hautes performances.
- Un apport d'énergie vers la pièce relativement faible.
- Une automatisation simple.
- Pas de remplacement continu d'électrodes.
- Pas de laitier à enlever, sauf sur certains fils fourrés.
- Le taux de fusion est plus élevé, plus forte concentration de courant dans le fil.

c) Les inconvénients du procédé MIG/MAG

- Un équipement de soudage plus complexe, plus coûteux.
- Les torches de soudage sont plus grandes. L'accessibilité au métal de base peut être plus limitée lors de certaines utilisations [29].

II.3.2 Les paramètres du soudage

II.3.2.1 L'intensité du courant de soudage

On appelle intensité du courant de soudage, la quantité d'électricité qui traverse l'électrode et la pièce lorsque l'arc est amorcé, elle est donnée par la formule :

Intensité = ($\varnothing$ de l'électrode - 1) x 50

Exemple : électrode de $\varnothing$ 3,15 I = (3,15-1) x 50 = 107 A [30].

II.3.2.2. La tension du soudage

La tension du courant électrique est considérée comme la pression électrique ou la différence de niveau électrique entre deux points d'un circuit. C'est la tension entre ces deux points qui provoque le passage du courant lorsque le circuit est fermé (électrode touche à la pièce à souder). La tension se mesure en volts. Pour pouvoir amorcer un arc, la tension entre l'électrode et la pièce doit atteindre une certaine valeur (tension d'amorçage: entre 45 et 100 V selon l'électrode). Lorsque l'arc est amorcé, la tension existant entre l'électrode et la pièce est beaucoup plus faible (tension d'arc: 15 à 45 V). Pour une même électrode, cette tension est d'autant plus faible que l'arc est tenu plus court, elle donné par la formule :

Tension= (0.04 x Intensité) + 21 [36,35].

II.3.2.3. Energie nominale et vitesse de soudage

L'énergie de soudage E, ramenée à une unité de longueur, est déterminée par l'équation :

Elle s'exprime en j/cm avec :

$$E_n = U.I / V$$

Ou elle s'exprime en kJ/cm avec :

$$E_n = 60.U.I / 1000.V [36].$$

C'est le régime thermique produit, dépendant entre autres de l'énergie fournie, qui va agir sur la vitesse de solidification. En principe, une forte énergie de soudage entraîne une plus forte pénétration des passes et donc une plus grande hétérogénéité de la structure [22].

La vitesse de soudage est la vitesse d'avancement de l'électrode le long de la ligne à soudé [35].

.Tableau II.1 : l'énergie nominale (E_n) en fonction du diamètre de l'électrode, la vitesse de soudage V_s [36]

Les diamètres électrodes		2.5	3.2	4	5
Vitesse de soudage cm / mn					
Energie Nominale en kJ / cm	6	18	27.9	40.5	58
	8	13.5	21	30.4	43.5
	10	10.8	16.8	24.3	34.8
	12	9	14	20.3	29
	14	7.7	12	17.4	24.9
	16		10.5	15.2	21.8
	18		9.3	13.5	19.3
	20		8.4	12.2	17.4
	25		6.7	9.7	13.9
	30			8.1	11.6
	40			6.1	8.7
	50				7

II.4 La géométrie d'un joint soudée bout à bout des tubes

L'assemblage de pièces épaisses (Tôles et tubes) par opération de soudage nécessite de pouvoir réaliser une soudure sur la totalité de l'épaisseur pour assurer une continuité mécanique de l'assemblage. Pour cela, un chanfrein est réalisé en bout des éléments à assembler en amont de l'opération de soudage [37].

II.4.1. Composition d'un chanfrein en bout de tube

II.4.1.1 Le chanfreinage

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

Une passe dite « racine » est créée en fond de chanfrein et constitue la base du remplissage de celui-ci par soudures successives.

II.4.1.2 Le dressage

Le dressage correspond à l'opération de création du talon et consiste à réaliser une surface plane en bout du tube. Un dressage correctement réalisé facilitera l'alignement des tubes à souder et contribuera à avoir un jeu constant entre les pièces, paramètres essentiels pour un bon maintien du bain de fusion et une parfaite pénétration de la passe racine.

II.4.1.3 Le délardage intérieur

Les tolérances de fabrication des tubes (en général $\pm 12\%$ de l'épaisseur) peuvent générer une épaisseur non constante sur la circonférence du tube. Cela peut donc engendrer une rupture dans la continuité mécanique et géométrique de l'assemblage due à une épaisseur de raccordement différente entre les deux tubes. D'un point de vue du chanfrein, cela se traduira par une épaisseur de talon non constante.

C'est pourquoi une opération de délardage est généralement préconisée par les modes opératoires de soudage. Cette opération consiste à légèrement usiner l'intérieur du tube afin de garantir l'épaisseur du talon en tout point. Tout comme le jeu entre les tubes, une épaisseur constante de talon facilitera le soudage de la passe racine. Ce paramètre est primordial lorsque des procédés de soudage automatisés sont utilisés. En effet, la machine ne sera pas en mesure de juger et de compenser une éventuelle irrégularité du talon comme pourrait le faire un soudeur [37].

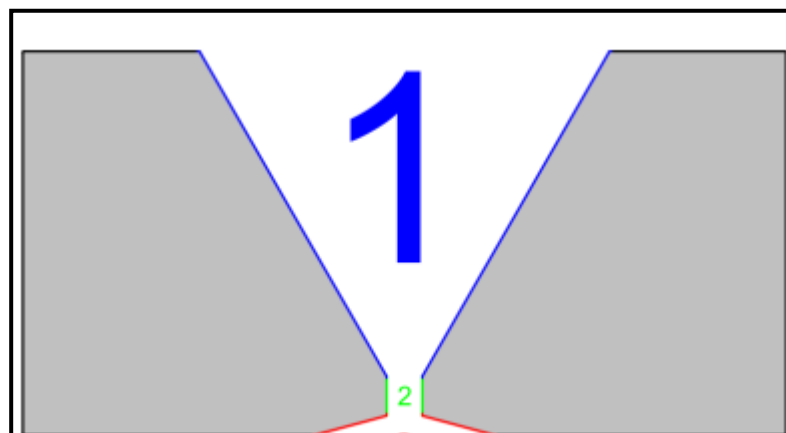


Figure II.8 : La géométrie d'un joint soudée bout à bout [37]

II.5 Aspect thermique du soudage

Caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent en mouvement, parfois immobile (exemple : soudage par résistance) dont la nature et la puissance qu'elle peut atteindre déterminent les possibilités pratiques d'utilisation. Le soudage comporte, là où il intervient, des échauffements rapides, dans de nombreux cas plus rapides que ceux qui correspondent à l'état d'équilibre en phase solide des alliages concernés. Si l'on veut prévoir ou interpréter l'effet métallurgique du soudage, il est donc nécessaire de tenir compte de la vitesse d'échauffement, en particulier lorsqu'on cherche à simuler le cycle thermique de soudage pour reproduire les structures qui en résultent. L'effet de l'échauffement rapide est accusé par la brièveté du séjour à la température maximale, température qui avoisine la température de fusion. Le gradient de température qui résulte de la localisation de l'échauffement entraîne une vitesse de refroidissement en général élevée, elle-même fonction, pour chaque matériau, non seulement du procédé de soudage utilisé, mais aussi du mode opératoire pratiqué pour l'application de ce procédé. Pour ces raisons, toute analyse métallurgique des effets de l'opération du soudage doit être précédée et éclairée par une étude thermique approfondie [38].

II.5.1 Cycle thermique du soudage mono passe

Le cycle thermique lors de l'opération de soudage mono passe se traduit par un chauffage rapide jusqu'à une température proche de la température de fusion et par une cinétique de refroidissement qui dépend des paramètres opératoires : Energie de soudage T_e de procédé Epaisseur de la pièce Pour caractériser la loi de refroidissement, plusieurs paramètres peuvent être adoptés : Vitesse moyenne = Vitesse à une température donnée : $(d\theta / dt)_{\theta} = \theta_1$ Temps de passage entre deux températures : $\Delta t_{\theta_1\theta_2} = t_{\theta_1} - t_{\theta_2}$ Pour choisir un paramètre de refroidissement, il doit être indépendant de tout autre paramètre. (D'après l'Institut de Soudure I R S I D) : Le temps écoulé entre 800 C° et 500C° Le temps écoulé entre 700 C° et 300C° Ces deux paramètres de refroidissement déterminent la microstructure (Figure II.9). Deux autres paramètres, la vitesse de refroidissement à partir de 300 et le temps écoulé entre 300 et 100 C° les Japonais prennent en considération les conditions d'hydrogénation des soudures, c'est à dire le comportement des soudures en fissuration à froid [39]. Ces deux paramètres sont représentatifs des conditions de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite ils permettent d'apprécier la ZAT (siège de fissures).

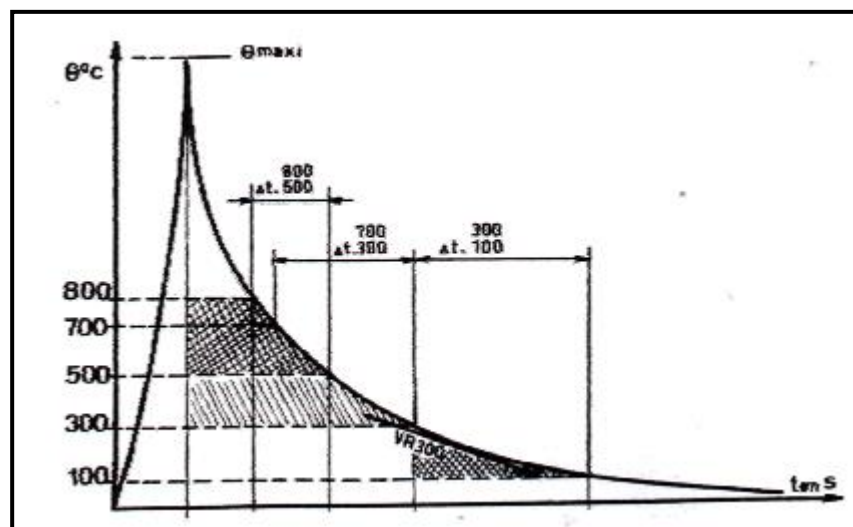


Figure II.9 : Cycle thermique: cas du soudage mono passe .

II.5.2 Cycle thermique du soudage multi passes

Au voisinage de la première passe on observe les cycles thermiques les plus sévères, par rapport à la température maximale atteinte et la rapidité du refroidissement. Les passes suivantes provoquent à cet endroit des cycles de plus en plus atténués. Lorsque le temps entre les passes est inférieur à une certaine valeur qui dépend des conditions de soudage, (Figure II.11) la température minimale au point A augmenté à chaque passe. Suivant la disposition des passes, une même température (exemple : A3 dans les aciers) peut être dépassée deux ou plusieurs fois en une région donnée au cours des passes successives. La structure finalement observée en cette région est le résultat de la succession des cycles correspondants. Le dépôt d'une passe modifie la structure de la passe précédente (ou des passes précédentes), en produisant sur celle-ci un recuit ou un revenu de la structure. Voir (Figure II.10) représentant les modifications dues au cycle thermique pour le soudage multi passes [40]. Cette observation vaut aussi bien pour la ZAT que pour le métal fondu, lui aussi réchauffé et, s'il y a lieu, transformé au cours des passes successives [39] La notion de pré et post chauffage, qui concerne essentiellement la première et la dernière passe, doit être complétée par la notion de température entre passes. Cette température est définie comme étant la température atteinte au refroidissement par le métal déposé avant le dépôt de la passe suivante. Elle est à la fois température de préchauffage pour la passe suivante et température minimale du post – chauffage pour les passes précédentes. [40,41].

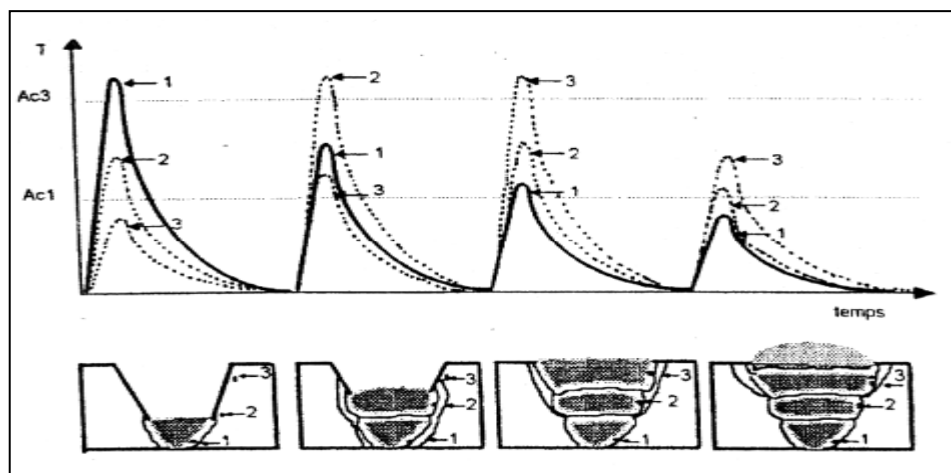


Figure II.10 : Cycle thermique pour le soudage multi passes.

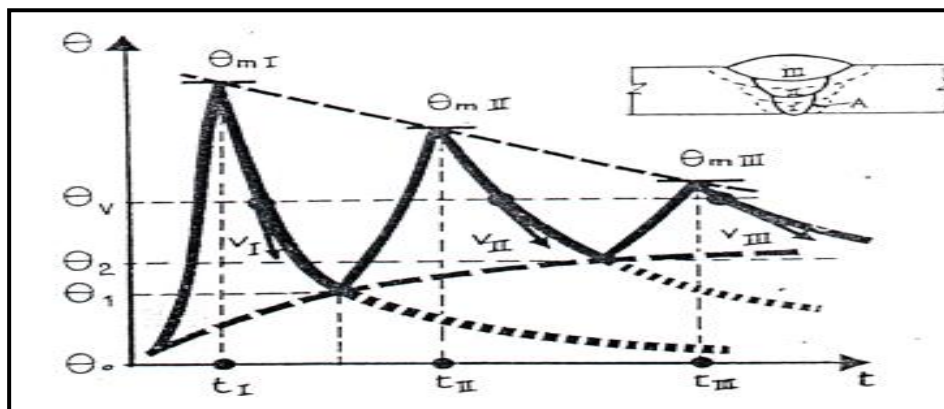


Figure II.11 Métauxurgiques de sou: Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes.

Divers facteurs interviennent sur l'allure des cycles thermiques et donc sur la répartition thermique, on peut en citer :

1) Influence de la pièce à souder :

Intervient par ses propriétés physiques (conductibilité thermique, capacité calorifique). Il faut tenir compte aussi de l'influence géométrique (épaisseur, position des pièces à souder, chanfreins). Influence de la température initiale (joue sur le temps de séjour à haute température ainsi que sur la vitesse de refroidissement) elle peut être contrôlée par un préchauffage.

2) Influence du préchauffage et du post-chauffage :

Le préchauffage et le post-chauffage sont utilisés pour éviter la formation de structures fragiles dans la Z A T, et pour permettre à l'hydrogène dissout dans les pièces de diffuser vers l'extérieur. Le préchauffage des pièces à assembler permet de : - Diminuer la vitesse de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite, et par la suite, limiter les transformations physico-chimiques. Réduire la teneur en hydrogène en fin de refroidissement et faciliter son dégagement pour éviter la formation de soufflures. - Réduire les déformations et ralentir la croissance des contraintes le principal but du préchauffage est l'amélioration des conditions de refroidissement en vue d'éviter la formation de constituants de trempe ou semi trempe (la martensite). La température de préchauffage est d'autant plus élevée que le pouvoir trempant de l'acier est plus énergétique. Le post chauffage consiste à interrompre le refroidissement naturel du joint soudé et à maintenir celui-ci à une température au moins égale à celle du préchauffage; Permet à l'hydrogène de s'échapper et suspend la croissance des contraintes liées au refroidissement entre 300 et 100°C ; qui permet de caractériser la quantité d'hydrogène diffusible. Le post-chauffage est nécessaire, dans le cas des pièces à forte trempabilité ; quand l'action du préchauffage n'atteint pas les résultats demandés [42]

3) Notions d'état quasi-stationnaire :

Dans le cas de soudage avec déplacement de la source de chaleur, Si nous relevons, au moyen d'un couple thermoélectrique, les courbes $\theta = f(t)$ en des points A1, A2....etc. situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé en pleine tôle (Figure II.12) [43]. La température maximale θ_m atteinte croît avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme, l'énergie demeurant constante. Les lois différentes conditions et s de refroidissement, déterminées d'après la mesure des temps de refroidissement entre deux températures, deviennent identiques, donc les courbes $\theta = f(t)$ deviennent superposables dès que la source a franchi un certain parcours. L'énergie dépensée par la conductibilité dans la pièce est à chaque instant compensé par l'énergie fournie au niveau de la source de chaleur. On peut dire donc que les isothermes demeurent identiques à elles-mêmes et se déplacent avec la source. Leurs enveloppes sont des lignes parallèles au cordon.

Grâce à l'état quasi stationnaire nous pouvons limiter notre détermination des courbes températures temps à des points repartis sur une droite perpendiculaire à la ligne de soudure. [44].

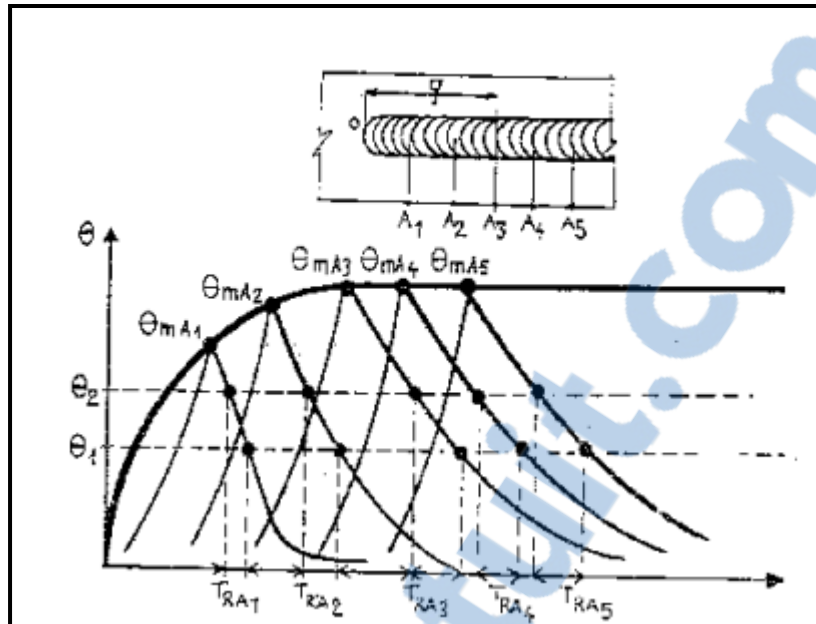


Figure II.12 : Etat quasi-stationnaire [44].

II.6. Aspects métallurgiques du soudage

Les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier. Les principes généraux de la métallurgie (édifice cristallin, composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures. L'examen métallographique de la soudure fait apparaître une grande diversité de structures. On observe pour chaque joint soudé divers aspects qui rendent compte de la variation du cycle thermique subi en chaque point examiné. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence. Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. Leur dimension dépend de la température et de la cinétique de refroidissement. Voir (Figure II.13) qui donne une représentation schématisée d'un joint soudé perpendiculairement à la ligne de fusion [45,46]. On distingue plusieurs zones : (Figure II.14) [40] :

1) Zone de fusion :

Qui pour une soudure multi passes est constituée par une alternance de zones thermiquement régénérés et de zones brutes de solidification à grains orientés.

2) Zone surchauffée :

A granulation grossière où la température maximale atteinte est très élevée (entre 1200 et 1500). Le refroidissement rapide de l'austénite surchauffée, dont le grain atteint des dimensions importantes, donne la structure de Widmannstaetten, structure très fragile. Dans ce cas, la ferrite ou la cémentite pro-eutectoïde précipite isolément au cours de leur migration en direction des joints des grains d'austénite. Leur précipitation s'effectue alors le long des plans de clivage du cristal d'austénite où elle se trouve facilitée. Le constituant pro-eutectoïde précipite le long de ces plans sous forme de plages de grandes dimensions. La section de celle-ci par le plan duquel s'effectue l'observation du métal au microscope donne lieu à l'apparition d'aiguilles plus ou moins allongées, orientées dans des directions déterminées (Figure II.15). Les structures de Widmannstaetten

CHAPITRE II GENERALITES SUR LE SOUDAGE

doivent être effacées par un traitement de normalisation, car sinon elles sont la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers.

3) Zone de normalisation :

Où la granulation est plus fine que dans le métal de base. La température atteinte est légèrement supérieure à A_{c3} .

4) Zone à température maximale comprise entre A_{c1} et A_{c3} :

C'est une zone de transformations incomplètes. L'austénite résiduelle se transforme en perlite fine, et les grains de ferrite pro-eutectoïde ne se modifient pas. La granulation dans cette zone n'est pas très homogène. L'austénitisation partielle du métal conduit pour cet acier à une structure à grains très fins.

5) Zone de recristallisation :

Où la température maximale atteinte est comprise entre 500 et A_{c1} . Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone précipitations et coalescence en présence d'éléments dispersifs, sur revenu dans certains aciers trempés revenus, légère globularisation de la perlite dans les aciers normalisés.

6) Métal de base :

Où la température maximale atteinte resta inférieure à environ 500°C, dans laquelle on ne détectera pas de modifications structurales visibles

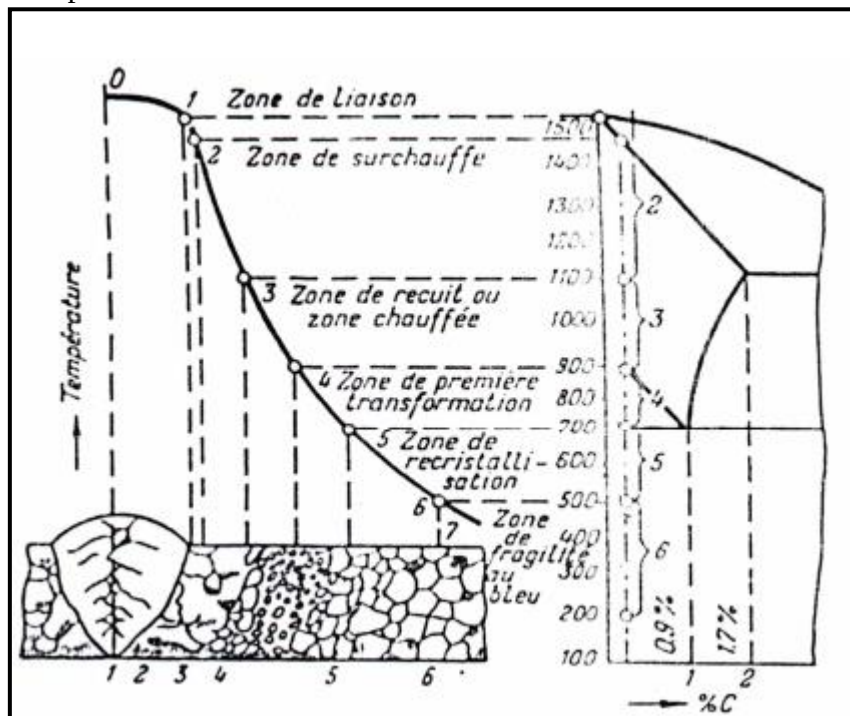


Figure II.13 : Représentation schématique d'un joint soudé.

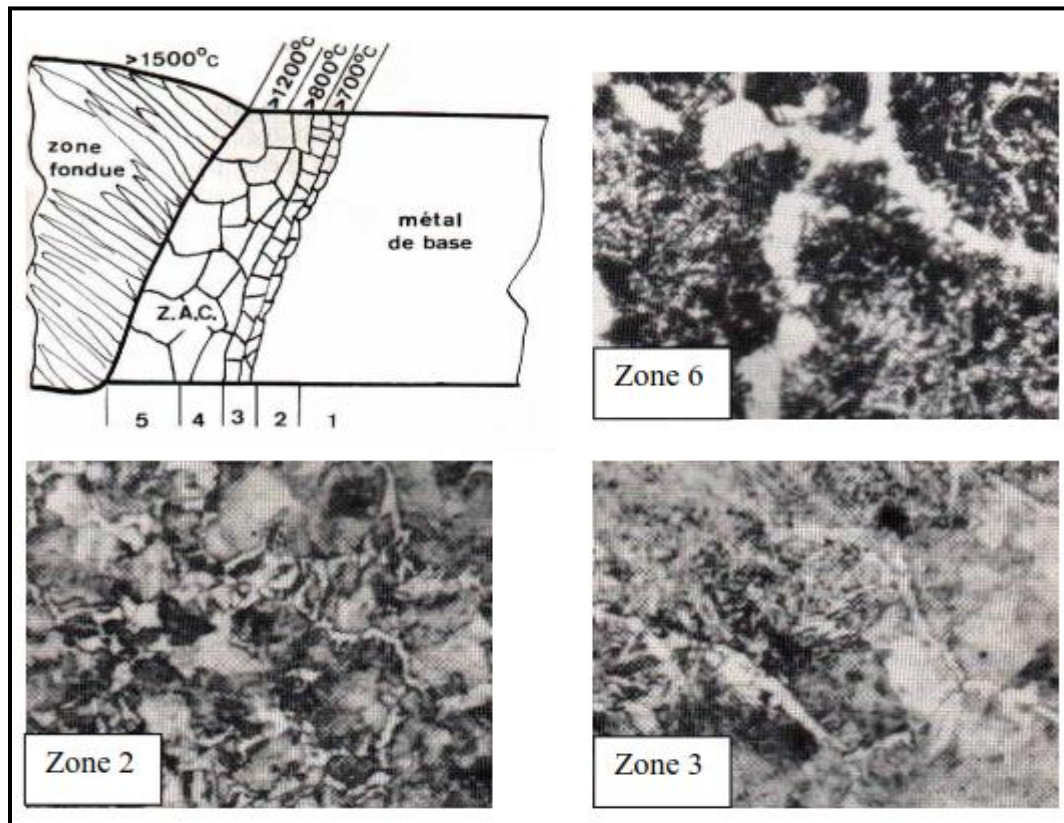


Figure II.14 : Transformations structurales dans la ZAT : représentation schématique et micrographies micrographies.
 Dans la Zone1 : $\theta < 600^{\circ}$ et dans la Zone3 : $\text{Ac}_3 > \theta > \text{Ac}_1$ et dans la (zone de liaison) Zone2 : $\theta > 1200^{\circ}$ structure à gros grains



Figure II.15 : Structure de weidmannsta.



CHAPITRE III
LES DIFFERENTES
CRITERES DE LA
QUALITE DES
JOINTS SOUDEE DU
PIPELINES

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Introduction

La qualité des joints soudés dépend des paramètres du soudage (la tension, courant...) et a la capacité de l'opérateur, sur sa connaissance des techniques (préparation des joints, nettoyage, la vitesse de soudage...), parce que ces derniers sont les causes principales des défauts de soudage. Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger et aussi les méthodes de détection (contrôle visuel, CND).

III.1 L'influence des paramètres de soudage

III.1.1 L'influence de la tension

- La longueur d'arc, La tension d'arc est fonction croissante de la longueur d'arc pour une intensité de courant donnée.
- Le profil de cordon.
- Le profil de la pénétration.
- Fusion [47].

III.1.2 L'influence de L'intensité

- Le profil de cordon.
- La fusion.
- La pénétration [47].

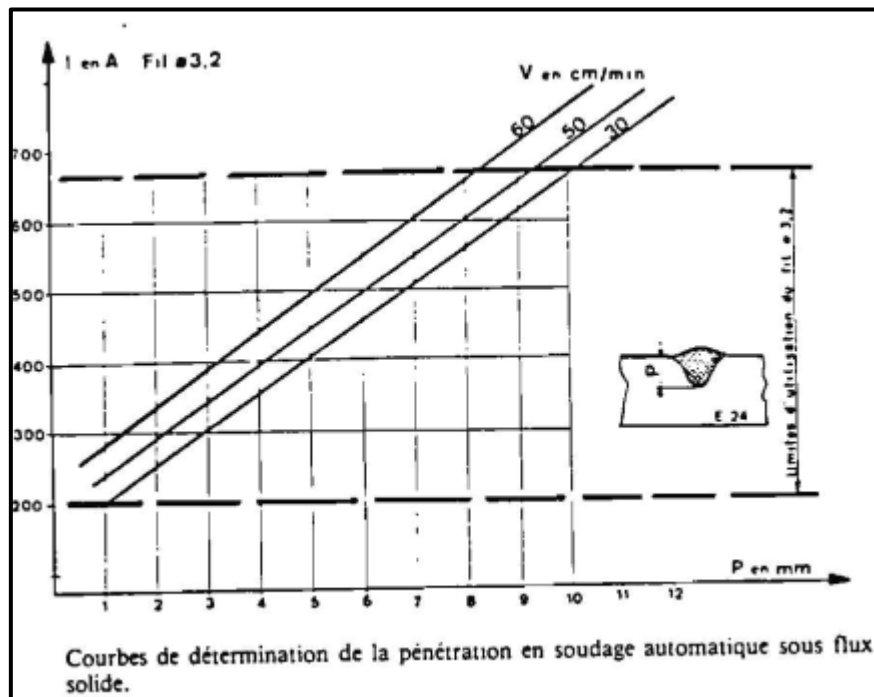


Figure III.1 : Effet de l'intensité du courant sur la pénétration [35].

III.1.3 L'Influence du diamètre de fil utilisé

Le diamètre de fil utilisé influence:

- L'intensité de courant.
- Généralement diamètre plus élevé = intensité de courant plus élevé.
- La pénétration.
- La fusion [47].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

- La vitesse d'avance.
- diminution de la chaleur émise à la pièce.

III.1.4 L'influence Vitesse de déplacement

- Augmentation de la vitesse de déplacement.
- Réduction de la pénétration.
- Réduction de la dimension du cordon de soudage.
- Réduction de la chaleur émise (heat input) [47].

Le tableau suivante représente un résumé sur l'influence des paramètres du soudage sur le cordon de soudage :

Tableau III.1 : L'influence des paramètres du soudage sur le cordon de soudage [48].

Si valeurs augmentées	Largeur	Pénétration	Représentation graphique
TENSION	+	=	
INTENSITÉ	=	+	
Ø FIL	+	-	
VITESSE SOUDAGE	-	-	

III.2 Les défauts des soudages

III.2.1 Les fissures

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur. Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau. la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité entailles associées à la configuration du joint.

Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées. Les contraintes résiduelles se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique... Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement cette dernière [49].

Les fissures peuvent être décrites comme étant longitudinales ou transversales [32] :

a) Les fissures longitudinales :

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

Les fissures longitudinales de la zone affectée thermiquement sont généralement causées par de l'hydrogène dissous (Figure III.2.a).

a) 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 (Figure III.2 .b).

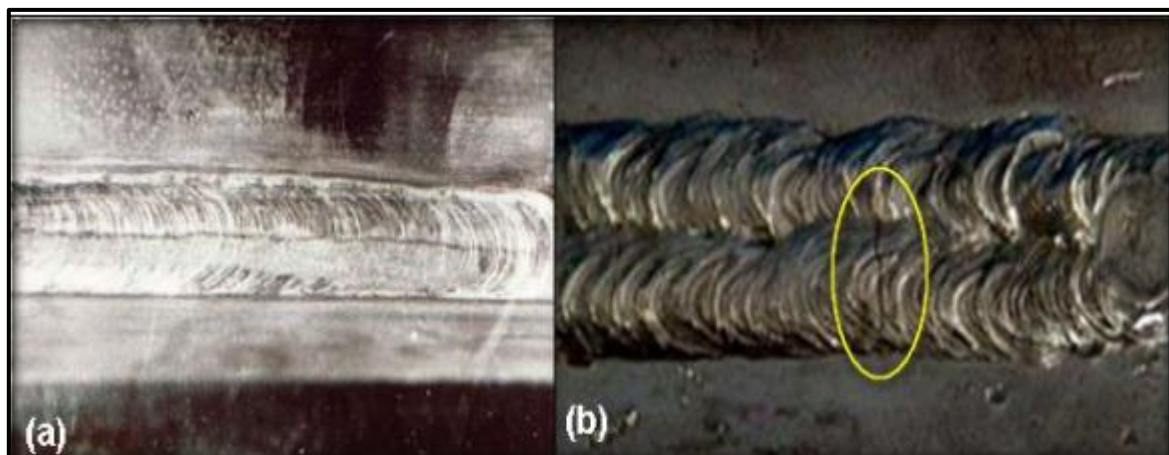


Figure III.2 : Fissure sur un cordon de soudure : (a) longitudinale, (b) Transversale [32].

III.2.2 Types des fissures

III.2.2.1 Fissures de Gorge (Throat Cracks)

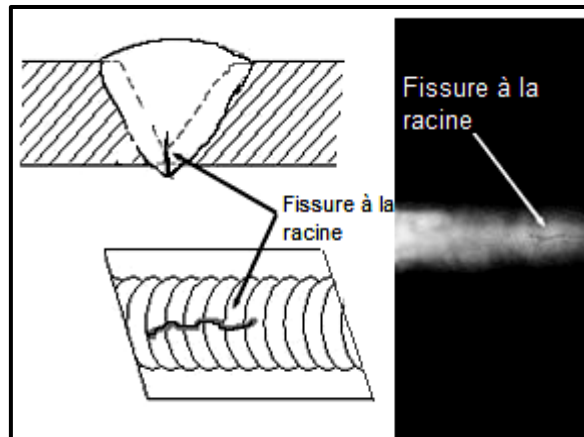


Figure III.3: Fissure de Gorge (Throat Cracks) [32].

Ce sont des fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Figure III.3) Elles sont généralement, mais pas toujours, des fissures à chaud [33].

III.2.2.2 Fissures de Racine

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Figure III.4). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid [32].

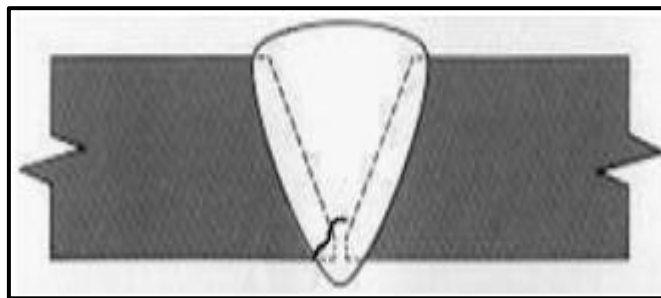


Figure III.4 : Fissure de Racine [32].

III.2.2.3 Fissures de Cratère

Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toutefois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (Figure III.5). Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère [32].

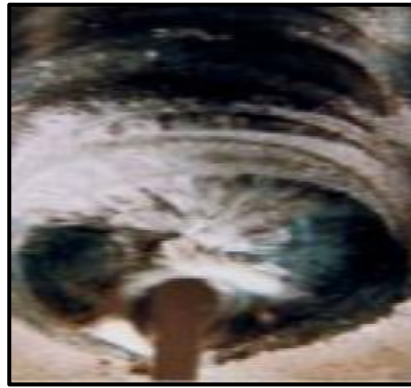


Figure III.5 : Fissure de Cratère [32].

III.2.2.4 Fissures au raccordement

Ce sont généralement des fissures à froid. Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base. Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement (Fig.15.). Certaines fissures au raccordement se produisent parce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage [32].

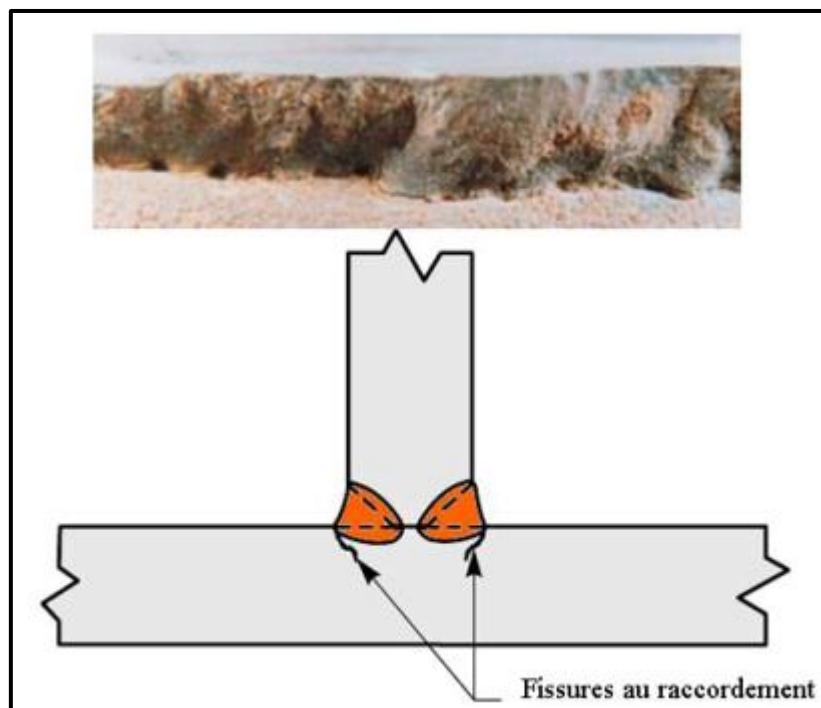


Figure III.6 : Fissure au raccordement [32].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.2.2.5 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement)

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

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

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. Elles se rencontrent principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Figure III.7) [32].

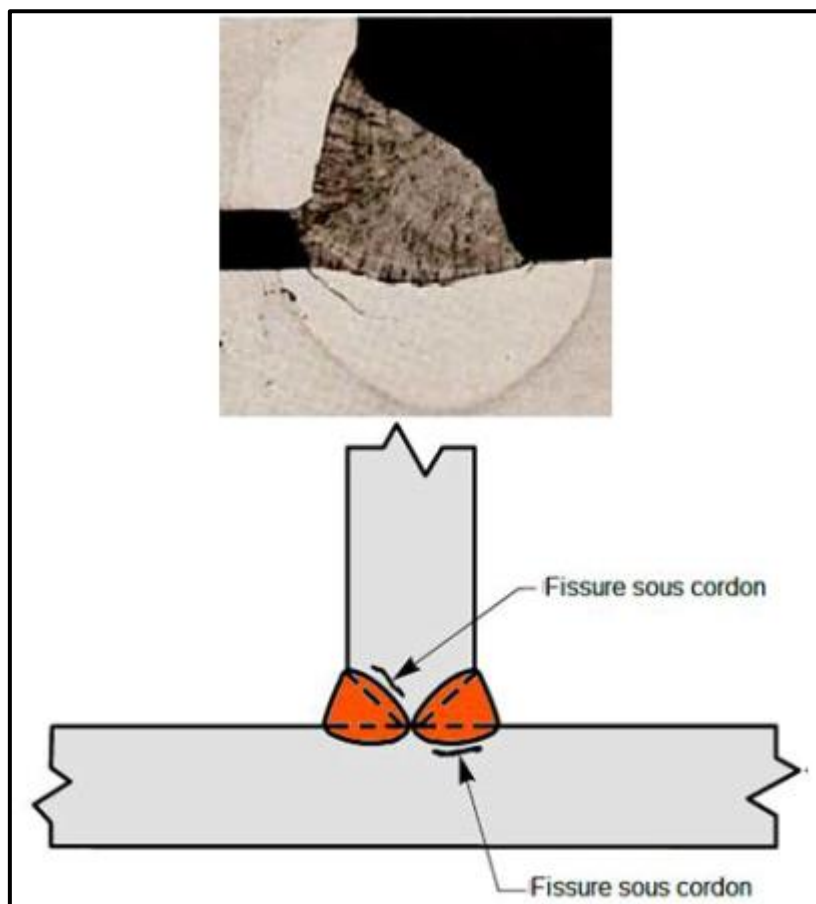


Figure III.7: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) [32].

III.2.2.6 Fissures de réchauffages (Reheat cracking)

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

(Figure III.8) [32].

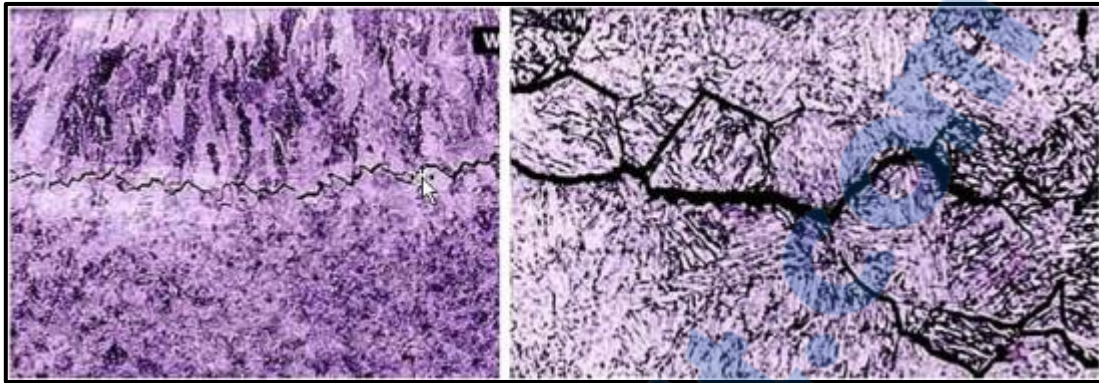


Figure III.8 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking) [32].

III.2.3 Fissure à chaud (ou de solidification)

Elles sont appelées « fissures à chaud » lorsqu'elles apparaissent à la fin de la solidification. C'est une fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal. Elle se forme lors de la solidification du métal déposé à température élevée (Figure III.9) [29].

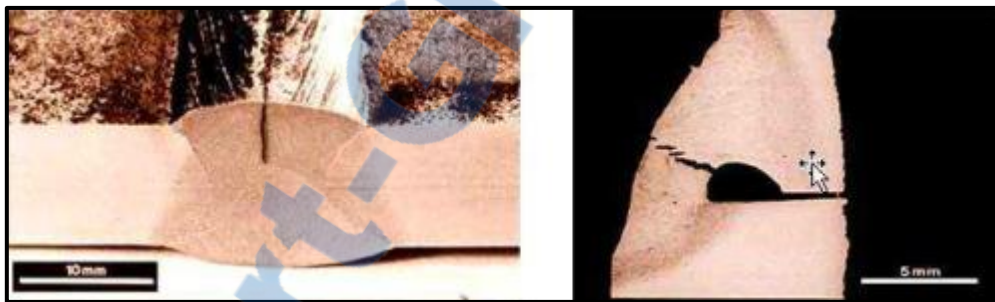


Figure III.9 : Fissure à chaud (ou de solidification) [29].

Causes possibles

- Une teneur en carbone, phosphore ou soufre du métal de base trop élevée peut provoquer une fissure inter-dendritique par suite de la dilution entre MB et MD, des impuretés viennent se loger à l'endroit où la solidification se produit en dernier lieu, et où de plus les dendrites provenant de cette solidification se rejoignent avec une orientation différente (Figure III.10). Notons que l'importance de la migration des impuretés augmente avec la température. C'est un effet défavorable de la préchauffe.
- Les joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques (Figure III.11)
- Transformations allotropiques: on appelle ainsi les modifications de structure cristalline qui se produisent lors du chauffage et du refroidissement de l'acier; étant donné que ces transformations s'accompagnent de changements de volume et de solubilité en certains éléments, elles induisent des tensions internes et l'apparition d'éventuels constituants fragiles [29].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

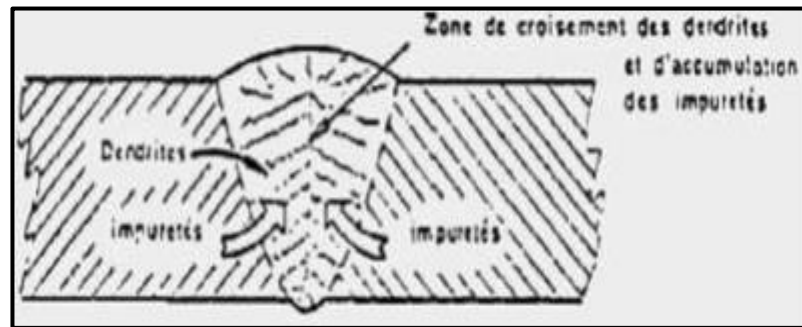


Figure III.10 : Evolution d'un joint soudé en une seule passe en cours de refroidissement[29]

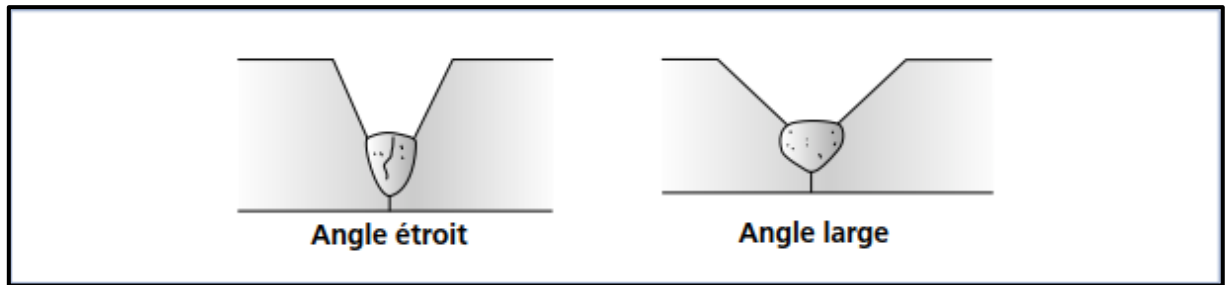


Figure III.11 : Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud [50]

Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage ...
- Pour fissures internes: examen par ultrasons ou radiographie [29].

Remèdes

- Bonne mesure des angles des chanfreins.
- Préchauffage et chauffage en cours de soudure.
- Bon choix du métal d'apport.
- Refroidissement lent.
- Cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin [50].

III.2.4 Fissures à froid

Sont dites « fissures à froid » lorsqu'elles apparaissent vers la fin du refroidissement, vers 150°C ou moins. Ce sont des fissures qui apparaissent à la suite de contraintes dans le métal aux alentours de la température ambiante. Ces fissures sont toujours localisées dans des zones de transition avec structure de trempe et peuvent déboucher dans la soudure même. La diffusion d'hydrogène est toujours un facteur contribuant. Ces fissures n'apparaissent parfois que plusieurs heures après les travaux de soudage (Figure III.12).

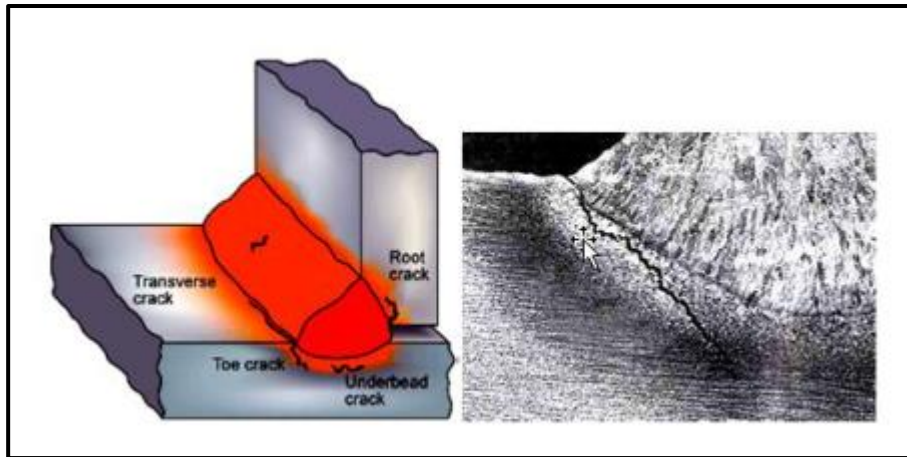


Figure III.12 : Fissure à froid (fissure d'hydrogène).

Causes possibles

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

Méthodes de détection

- Pour des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage
- Pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie [29].

Remèdes

- 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) [50].



III.2.5 Manque de pénétration

Le manque de pénétration est un manque de fusion de bords à souder. Il se situe en racine de cordon (Figure III.13). Il est souvent dû à une puissance du faisceau insuffisante ou à une dégradation de la focalisation du faisceau [49].



Figure III.13 : Manque de pénétration et collage en bord de chanfrein [49].

Cause possible

- Jeu de soudage trop petit (pièces trop rapprochées).
- Vitesse d'avance trop élevée.
- Intensité trop faible.
- Métal de base trop froid [51].

Méthodes de détection

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

Remèdes

- Agrandir l'écart des pièces à souder.
- Souder plus doucement.
- Augmenter l'intensité.
- Préchauffer les pièces [51].

III.2.6 Manque de fusion

Le manque de fusion (ou collage) est un manque de liaison entre le métal de base et la zone fondue. C'est un défaut plan. Il peut être lié à un décalage entre le faisceau et le plan de joint. Dans le cas d'un assemblage hétérogène, il est favorisé par une différence de conductibilité importante entre les matériaux. Il est difficilement détectable par les contrôles non destructifs [49].

Des manques de fusion peuvent apparaître (Figure III.14) [32] :

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

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

- Soit à la racine de la soudure entre métal de base et métal déposé.

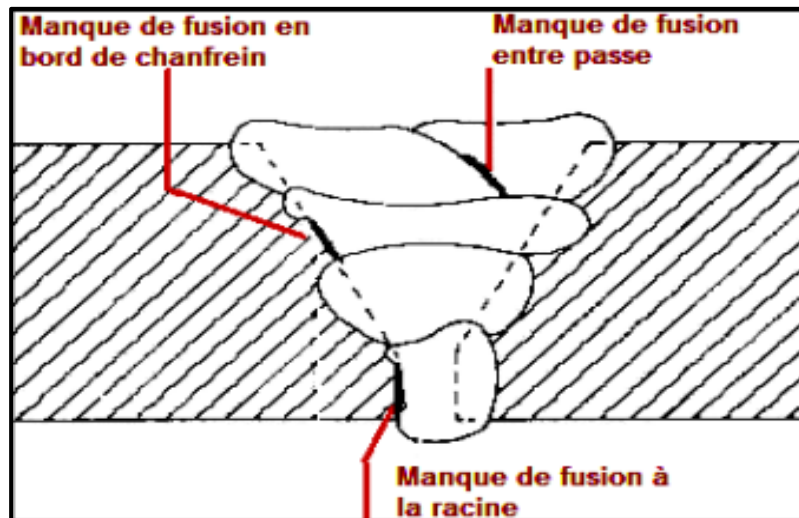


Figure III.14 : Les manques de fusion

III.2.6.1 Manque de fusion dans le flanc de la soudure

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (Figure III.15).

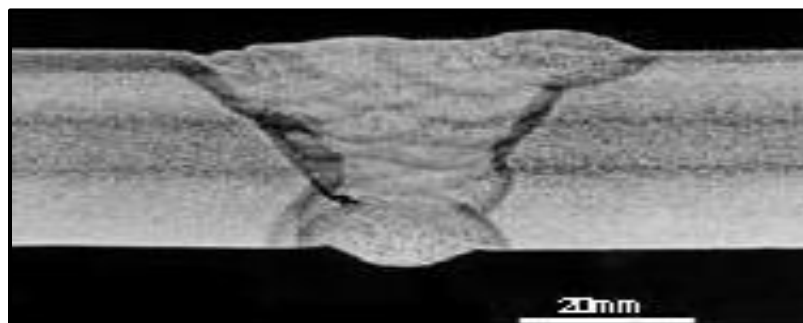


Figure III.15 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

III.2.6.2 Manque de fusion entre passes

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Figure III.16).

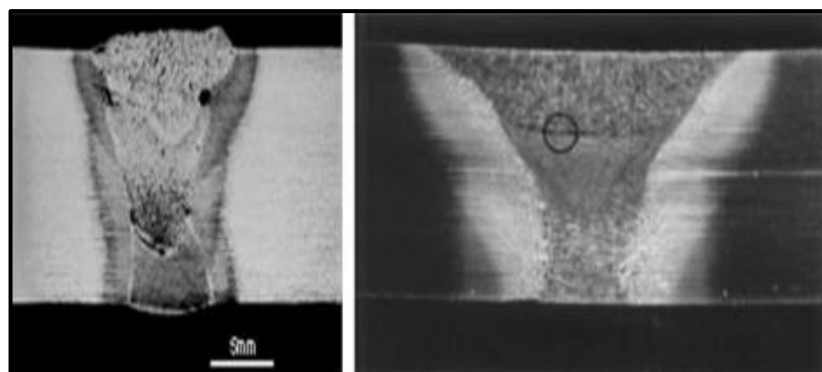


Figure III.16 : Manque de fusion entre passes.

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.2.6.3 Manque de fusion à la racine de la soudure

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 (Figure III.16).

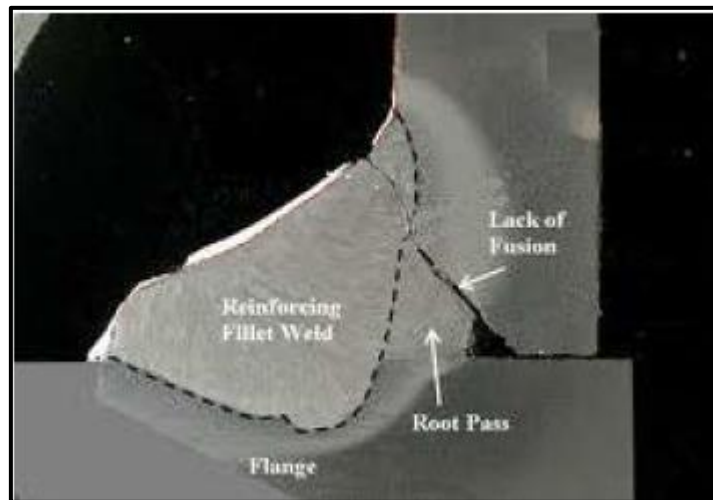


Figure III.17: Manque de fusion à la racine de la soudure.

Causes possibles

Ces défauts sont fréquents en soudage MAG et surviennent généralement quand :

- Angle du chanfrein trop étroit.
- Mauvaise orientation des électrodes.
- Intensité trop faible [51].

Méthodes de détection

- Surtout examen par « Ultrasons » (difficilement détectable par radiographie) [32].

Remèdes

- Augmenter l'intensité du courant.
- Réduire la vitesse d'avance et préchauffer les pièces épaisses.
- Effectuer un bon mouvement oscillatoire.
- Bien disposer les cordons dans les soudures multi passes [50].

III.2.7 Inclusion gazeuses

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes (Figure III.17) [32] :

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

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.2.7.1 Porosités vermiculaires

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

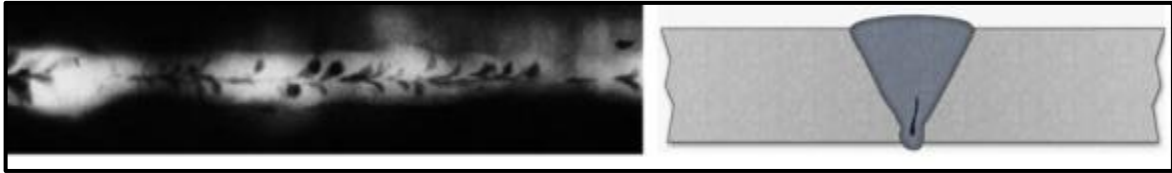


Figure III.18 : Inclusions gazeuses porosités vermiculaires.

Causes possibles

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

Méthodes de détection

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

Remèdes

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

III.2.7.2 Porosités de reprise

Porosités limitées à une petite partie du cordon et qui apparaissent lors d'un soudage électrique manuel ou automatique lors de l'amorce d'une passe (Figure III.18)

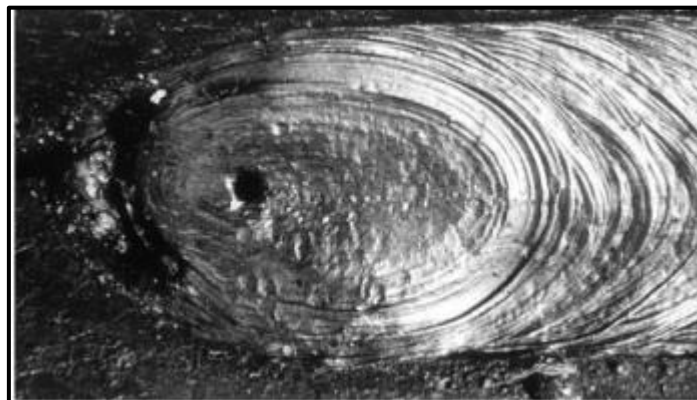


Figure III.19 : Inclusions gazeuses porosités de reprise.

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Causes possibles

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

Méthodes de détection

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

Remèdes

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

III.2.7.3 Porosités uniformes

Porosités qui sont distribuées uniformément dans le cordon



Figure III.20 : Inclusions gazeuses porosités uniformes

Causes possibles

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

Méthodes de détection

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

Remèdes

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

III.2.8 Inclusion solides

Il y a Différents types d'inclusions solides :

Des inclusions solides peuvent être de trois types différents [32]:

- Laitier.
- Tungstène.
- Cuivre.

III.2.8.1 Inclusions de laitier

Du laitier qui a été enfermé dans le cordon de soudure (Figure III.20). Ces inclusions peuvent avoir deux aspects:

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



Figure III.21 : Inclusions de laitier.

Causes possibles

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

Méthodes de détection

- Ultrasons et radiographie.

Remèdes

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

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.2.8.2 Inclusions de tungstène

Parties fusionnées de l'électrode en tungstène qui est utilisée dans le procédé TIG (US= GTAW) (Figure III.2).

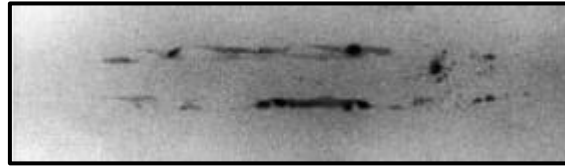


Figure III.22 : Inclusions de tungstène.

Causes possibles

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

Méthodes de détection

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

Remèdes

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

III.2.8.3 Inclusions de cuivre

Une inclusion accidentelle de cuivre dans le bain de fusion qui peut provoquer des fissures dans la zone de soudage (Figure III.22)



Figure III.23 : Inclusions de cuivre.

Causes possibles

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

Méthodes de détection

- Contamination : Non décelable par des moyens CND.
- Inclusion importante: Radiographie.

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Remèdes

- Stabiliser l'arc lors du soudage MIG.
- Minimiser les pertes de refroidissement de la torche.
- Eliminer toute source de contamination possible [32].

III.2.9 Excès de pénétration

L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente (Figure III.22) [49].

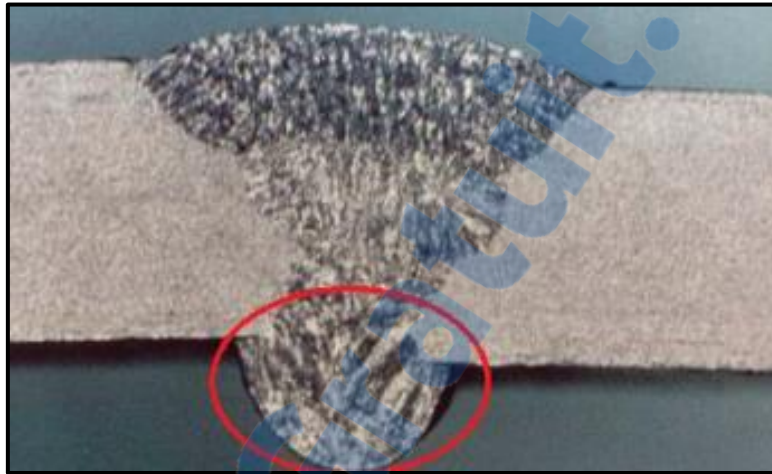


Figure III.24 : Excès de pénétration [49].

Causes possibles

- Vitesse d'avance trop lente.
- Intensité du courant trop forte.
- Mauvaise préparation des bords.
- Trop de distance entre les pièces.
- Arc trop court [50].

Méthodes de détection

- Contrôle visuel, éventuellement radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries) [32].

Remèdes

- Augmenter la vitesse.
- Diminuer l'intensité.
- Utiliser le joint approprié.
- Rapprocher les pièces.
- Éloigner la torche [50].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.2.10 Surépaisseur ou convexité excessive

Un apport excessif de métal qui cause, de la convexité dans les soudures d'angle, et des épaisseurs supérieures à celles du métal de base pour les soudures bout à bout (Figure III.23) [32].

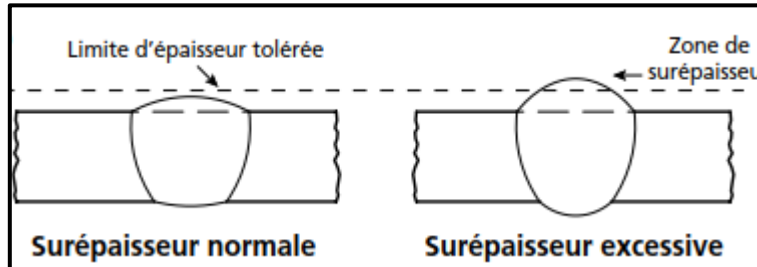


Figure III.25 : Surépaisseur [50].

Causes possibles

- Energie de l'arc trop importante
- Mauvais choix des diamètres des électrodes dans des soudures multi-passes.
- De mauvaises manipulations de l'électrode.

Méthodes de détection

- Examen visuel avec un calibre de soudage.

Remèdes

- Diminuer l'énergie de l'arc.
- Contrôler le choix des diamètres des électrodes.
- Améliorer l'expérience du soudeur [32].

III.2.11 Effondrements ou concavité excessive

C'est le manque de métal à la surface du cordon, ce manque peut être localisé ou continu (Figure III.24) [50].

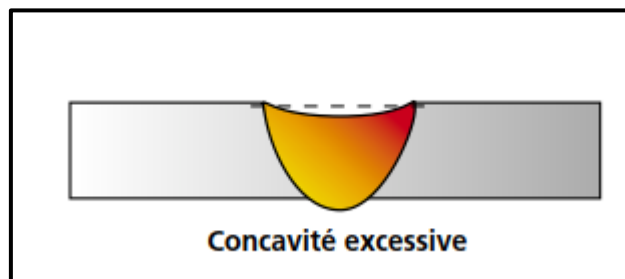


Figure III.26 : Concavité.

Causes possible

- Vitesse de soudage trop lente.
- Chaleur trop élevée [50].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Méthodes de détection

- Inspection visuelle [32].

Remèdes

- Augmenter la vitesse.
- Réduire l'intensité du courant.
- Effectuer un bon mouvement oscillatoire [50].

III.2.12 Débordement du cordon

L'écoulement d'un excès de métal d'apport sur la surface du métal de base, soit à la racine de la soudure, soit à la surface supérieure sans fusion avec ce métal de base (Figure III.25) [32].

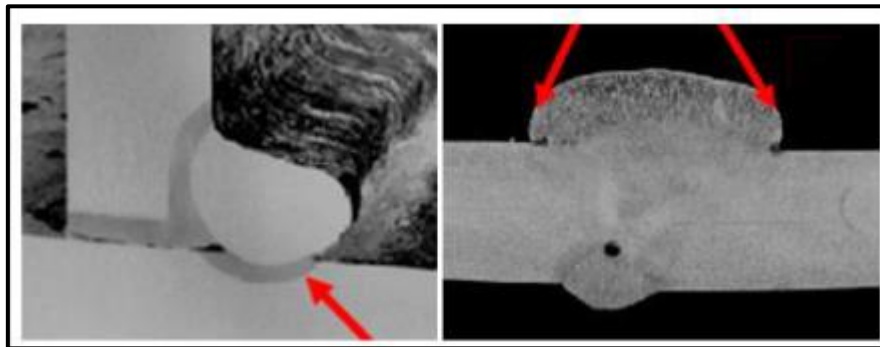


Figure III.27 : Débordements.

Causes possible

- Vitesse d'avance trop lente.
- Mauvais angle de soudage.
- Joints mal nettoyés [50].

Méthodes de détection

- Examen visuel complété d'un examen par ressuage [32],

Remèdes

- Augmenter la vitesse.
- Modifier l'angle de soudage.
- S'assurer que les joints sont propres [50].

III.2.13 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 (Figure III.26) [50].

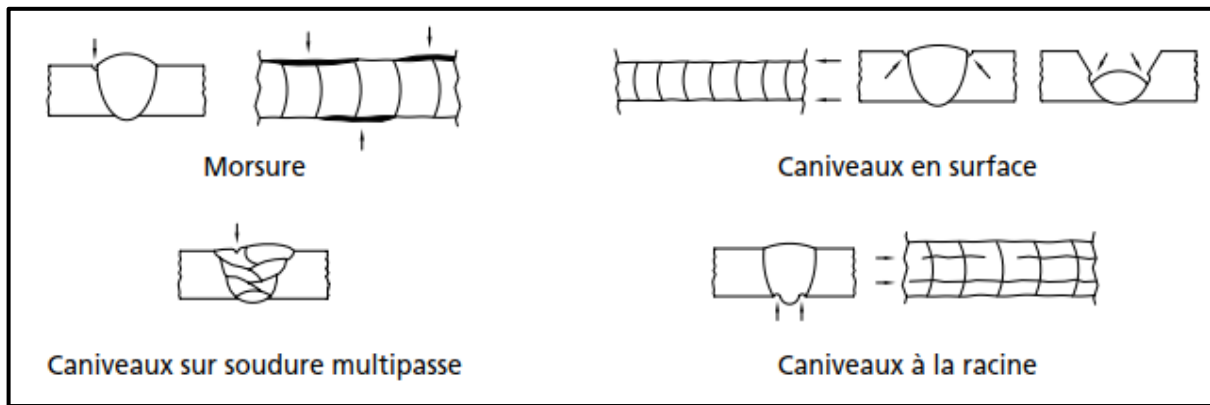


Figure III.28 : Morsures et caniveaux.

Causes possible

- 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 [50].

Méthodes de détection

- Visuel (mesure de la profondeur avec un calibre de soudage) [32].

Remèdes

- Corriger l'angle.
- Diminuer l'intensité du courant.
- Corriger la longueur de l'arc [50].

III.2.14 Défauts d'alignement

Ils correspondent à un décalage entre les deux parties à souder (Figure III.26). Ce décalage peut laisser subsister un manque de fusion en racine. C'est-à-dire que ces défauts peuvent être des défauts d'alignement entre les pièces, un cordon trop bombé...etc [49].



Figure III.29 : Défauts d'alignements [49].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Causes possibles

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

Méthodes de détection

- Inspection visuelle avec calibre de soudage avant soudage.

Remèdes

- Contrôle approfondi de l'alignement avant soudage et maintien de cet alignement pendant le soudage [32].

III.2.15 Projections

Les projections métalliques durant le soudage peuvent être adhérents ou non. Elles peuvent être provoquées par une densité de puissance trop élevée, la présence de produits organiques sur la surface de la pièce ou dans le plan de joints, une protection gazeuse inadéquate. Le soudage d'aciers nitrurés ou carbonisés peut provoquer ces projections (Figure III.27) [49].



Figure III.30 : Projections sur le métal de base [33].

Causes possibles

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

- Apport d'énergie trop élevé.
- Longueur de l'arc trop important.
- Produits de soudage contaminés [49].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Méthodes de détection

- Examen visuel.

Remèdes

- Changer le mélange de gaz de protection.
- Changer la longueur de l'arc.
- Réduire l'intensité du courant.
- Choisir le courant approprié [32].

III.2.16 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 (Figure III.28). 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.

Comme il existe la crique de solidification et c'est le même défaut que les retassures sauf que le défaut est non apparent. La crique de solidification est un défaut de fonderie [49].

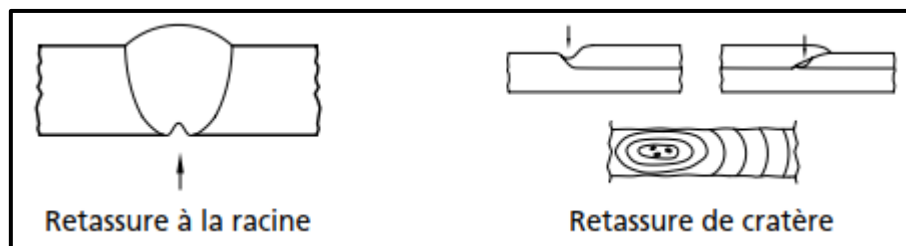


Figure III.31 : Retassures [50].

Causes possible

- Joints trop étroits.
- Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore).
- Métal d'apport incompatible avec le métal de base.
- Cordon trop petit

Méthodes de détection

- Inspection visuelle -un examen interne complémentaire par ex. par radiographie démontrera presque toujours des porosités associées [32].

-

Remèdes

- Bien mesurer les angles des chanfreins.
- Préchauffer et chauffer en cours de soudure.
- Bien choisir le métal d'apport.
- Refroidir lentement.
- Procéder à un traitement thermique après soudage (normalisation, recuit).

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

- Effectuer un cordon suffisamment large, réduire la vitesse au besoin.
- Choix En cas de retraits, effectuer un léger retour en arrière et ajuster la procédure de soudage [50].

III.3 Solutions et mesures préventives

III.3.1 Réglage des Paramètres du soudage

III.3.1.1 Électrode enrobée (MMA)

- Mesurer l'épaisseur des pièces à souder.
- Choisir un diamètre d'électrode inférieur ou égal à cette épaisseur.
- Régler l'intensité en fonction du diamètre de l'électrode en consultant la notice d'emploi sur le paquet qui vous donne la plage de réglage. On peut utiliser la formule suivante :

$$I = (\text{DIAMETRE} - 1) \times 50$$
- Affiner ce réglage en fonction de la masse des pièces, de l'écartement des bords et la méthode de soudage utilisée ainsi que de la position à plat... [52].

Tableau III.2 : l'intensité en fonction de diamètre de l'électrode [52].

Epaisseur E en mm	Ø 1.6 mm	Ø 2 mm	Ø 2.5 mm	Ø 3.15 mm	Ø 4 mm
1	25 A	Zone de non utilisation			
2	30 A	45 A	65 A		
3		55 A	70 A	95 A	
4			75 A	105 A	140 A
5				115 A	150 A
6					150 A
8					160 A
10					160 A

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.3.1.2 Procédés TIG

Le Courant de soudage nécessaire pour chaque mm d'épaisseur selon le matériau.

Le choix du diamètre des électrodes en tungstène

Tableau III.3 : choix de courant du soudage [53].

Nature du métal	Type de courant de soudage	courant de soudage en A
Aluminium	AC	40–50 A
Magnésium	AC	40–50 A
Cuivre	DC	75–80 A
Acier au carbone	DC	30–40 A
Acier faiblement allié	DC	30–40 A
Acier inoxydable	DC	30–40 A

Tableau III.4 : Le choix du diamètre des électrodes en tungstène [53].

	Aluminium	Acier, inox, cuivre
Diamètre de l'électrode Ø mm	Tungstène ampères AC	Alliage au thorium Amp CC
0.5	5-15	5-20
1.0	10-60	20-80
1.6	50-100	80-150
2.4	100-160	120-220
3.2	130-180	200-300
4.0	180-230	250-400

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.3.1.3 Procédé MIG/MAG

Il existe une formule permettant de calculer l'intensité. Il est important de rappeler que nous réglons une vitesse de fil et non une intensité. L'intensité est fonction de la vitesse de fil. Cette formule est applicable surtout à la rédaction de documents de soudage tels que les DMOS-P (Descriptif de Modes Opératoires de soudage Préliminaire).

$$\text{Intensité} = (\text{Tension} - 14) * 20$$

$$\text{Tension} = 14 + (0.05 * \text{Intensité}) [54].$$

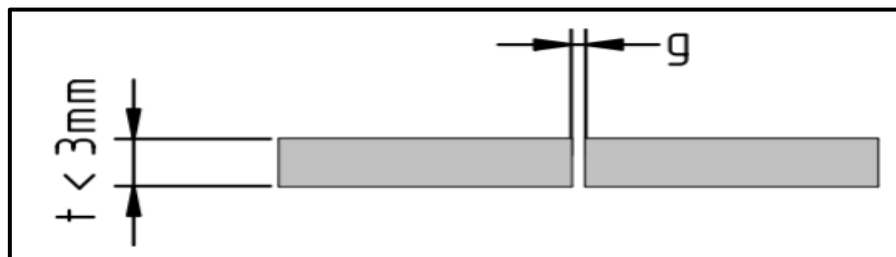
Tableau III.5 : Choix du diamètre du fil et l'intensité [54].

Diamètre du fil Ø mm	Gamme du courant applicable	Type du soudage
0.6	40à100 A	Carrosserie automobile
0.8	60à180 A	Tuyauterie à faible épaisseur
1.0	100à300 A	Toute position passe de pénétration
1.2	150à350 A	A partir 8 mm épaisseur
1.6	200 à700 A	A partir 12 mm épaisseur

III.3.2 La préparation des joints

III.3.2.1 Gamme d'épaisseur $t \leq 3\text{mm}$

Lorsqu'il s'agit de souder bout à bout des tubes d'épaisseurs inférieures à 3mm, le chanfreinage de l'extrémité du tube n'est généralement pas requis. Les technologies de soudage à l'arc (Electrode enrobée, MIG/MAG et Fil Fourré, TIG) permettent une pénétration suffisante sur toute l'épaisseur du tube en une seule passe [37].



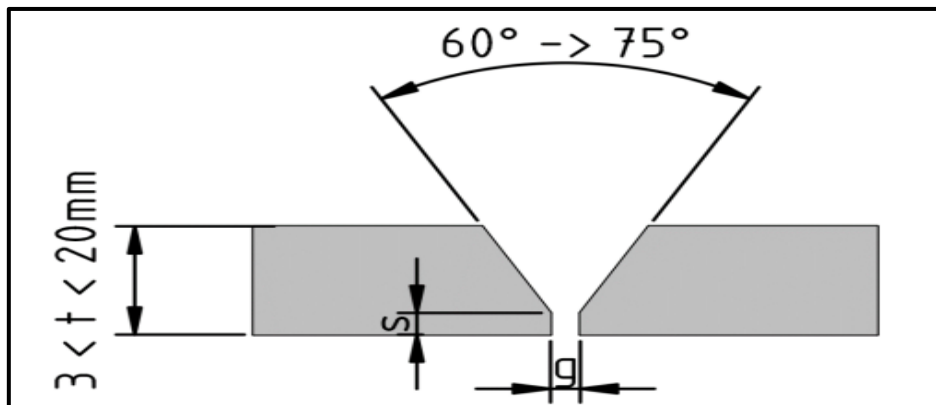
FigureIII.32 : Préparation du joint des tubes d'épaisseurs inférieures à 3mm [37].

III.3.2.2 Gamme d'épaisseur $2 \leq t \leq 20\text{mm}$

Lorsque le soudeur n'a accès qu'à une seule face du joint à souder, une préparation à bords droits non jointifs ne permet généralement plus d'assurer une pénétration complète pour des épaisseurs supérieures à 2mm. Un chanfrein doit donc être réalisé pour permettre au soudeur de réaliser une passe « racine » à la base du joint qui sera ensuite recouverte par une ou plusieurs passes supplémentaires.

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Les angles les plus communs pour les chanfreins en V sont 60° et 75° ($2 \times 30^\circ$ et $2 \times 37.5^\circ$). Un talon est généralement requis d'une épaisseur (s) comprise entre 0.5 et 1.5mm. Le jeu entre les pièces à souder (g) se situera entre 0.5 et 1mm (Figure III).



FigureIII.33 : Préparation du joint des tubes d'épaisseurs $2 \leq t \leq 20\text{mm}$

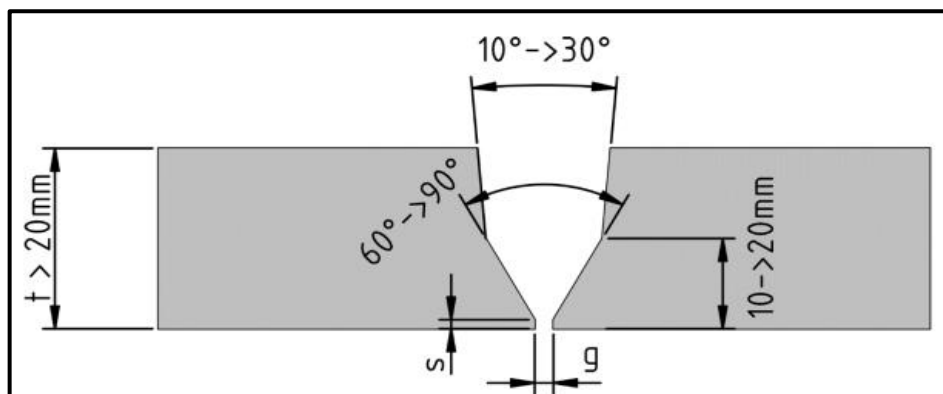
III.3.2.3 Gamme d'épaisseur $20\text{mm} \leq t$

Lorsque l'épaisseur des pièces à souder augmente, la quantité de matière à déposer dans le cordon de soudure augmente proportionnellement. Afin d'éviter des opérations de soudage trop longues et coûteuses d'un point de vue de la main d'œuvre et des consommables, une préparation permettant de réduire le volume du chanfrein est généralement privilégiée pour les épaisseurs supérieures à 20mm.

a) V doubles pentes (ou V composés) :

La première solution pour réduire le volume du chanfrein consiste à réaliser une rupture d'angle sur le chanfrein. Une première pente à 30° ou 37.5° (jusqu'à 45°) est associée à une seconde pente, généralement entre 5° et 15° . Il est nécessaire de conserver le premier angle à 30° ou 37.5° afin que le chanfrein ne soit pas trop étroit, et que le soudeur puisse avoir accès à la passe racine [38].

Tout comme les chanfreins en V simples, ces préparations requièrent un talon d'une épaisseur (s) allant de 0.5mm à 1.5mm et d'un jeu entre les pièces à souder (g) entre 0.5 et 1mm.



FigureIII.34 : Préparation d'un joint V doubles pentes.

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

b) J et J double pente :

La seconde solution qui permet de réduire drastiquement le volume du chanfrein est la préparation en J. Les chanfreins en J simple sont composés d'un angle généralement entre 5° et 20° , d'un rayon de fond de chanfrein (r) et d'une extension du talon (e). Cette dernière facilite la réalisation de la passe racine en dégagant l'accès au talon pour le soudeur.

Dans le cas de très fortes épaisseurs, des chanfreins en J composés peuvent être envisagés. Le plus communément, la première pente est réalisée avec un angle de 20° et la seconde avec un angle de 5° .

Les chanfreins en J ou J composés sont en majorité soudés avec un jeu (g) de faible à nul entre les pièces.

Ces chanfreins se doivent d'être parfaitement exécutés d'un point de vue géométrique afin d'éviter, entre autres, des problèmes de fissuration. Outre la précision à garantir pour ce genre de préparation, la machine-outil utilisée devra également être capable d'usiner des tubes de forte épaisseur en un temps réduit afin d'être en accord avec les cadences requises par les industriels [37].

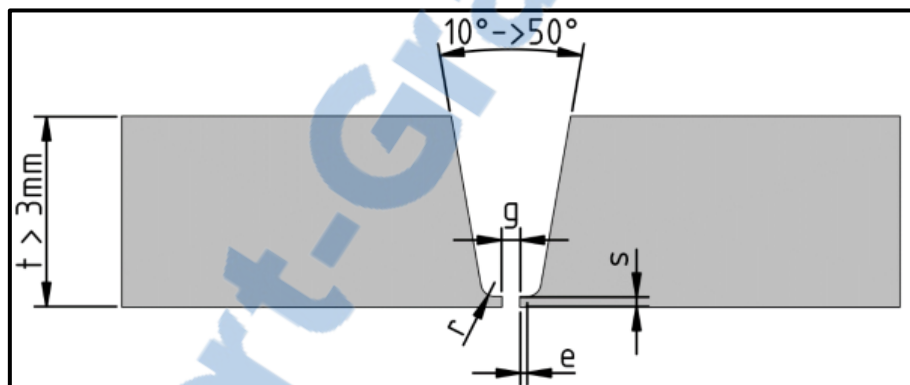


Figure III.35 : Chanfreins en J

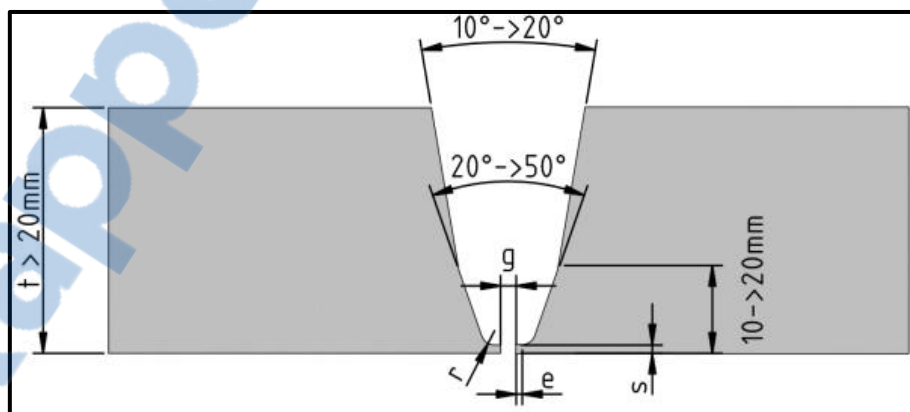


Figure III.36 : Chanfrein en J composés [37].

III.3.3 Calcul de la température de préchauffage

III.3.3.1 Méthode seferien

Cette méthode est également basée sur le « pouvoir trempant », elle consiste, pour un acier donné, à déterminer la température de préchauffage des pièces à souder, de manière à éviter un refroidissement trop rapide du joint qui conduirait à la formation d'une structure fragile (martensite) dans la Z.A.C. Le calcul de cette température de préchauffage s'effectue en trois étapes [36]:

- Calcul du carbone équivalent (Ceq),
- Calcul du carbone équivalent compensé (Ceq.C),
- Calcul de la température de préchauffage (T_p).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE 

a) Carbone équivalent : expression de seferien :

$$C_{\text{eq}} = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

b) Carbone équivalent compensé :

Le carbone équivalent compensé (Ceq.C) tient compte de l'épaisseur des pièces à assembler (influence de la vitesse de refroidissement) ainsi que du carbone équivalent (Ceq).

Il est défini par la formule :

$$Ceq.C = Ceq. (1 + 0.005 e)$$

e : Epaisseur moyenne des tôles en mm.

c) Température de préchauffage des pièces à souder :

Elle est calculée en fonction du Ceq.C par l'expression suivante :

$$T_p = 350 \sqrt{Ceq.C - 0.25}$$

Le diagramme suivant détermine T_p, directement à partir de Ceq et de e.

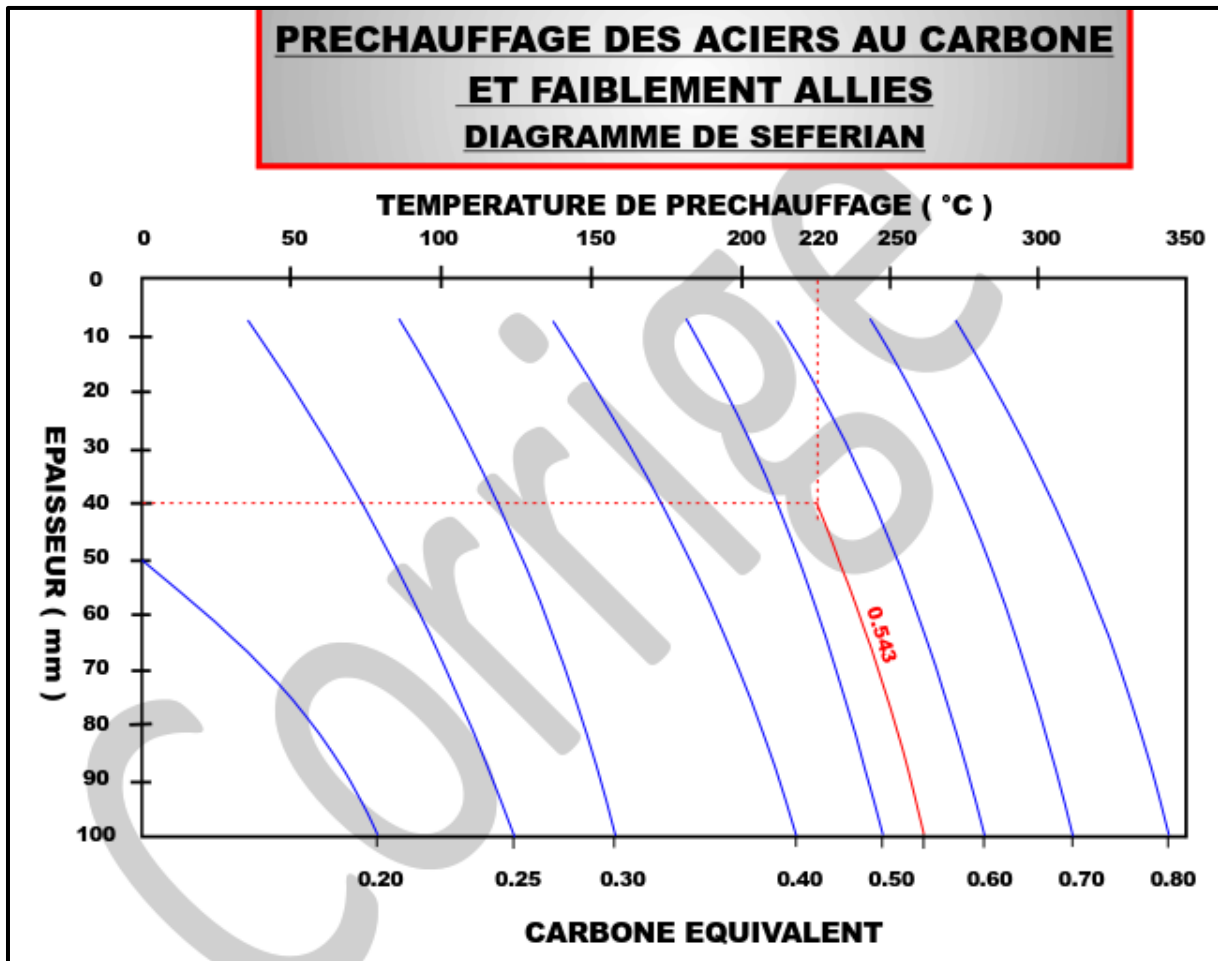


Figure III.37 : Diagramme de seferian [36].

III.3.3.2 Méthode BWRA

On peut aussi calculer la température de préchauffage avec la méthode BWRA (British Welding Research Association). Cette méthode est adaptée au soudage à l'électrode enrobée.

Cette méthode permet de calculer aussi la température de préchauffage, précise, elle prend en compte [36]:

- l'indice de sévérité thermique
- l'indice de soudabilité
- le diamètre des électrodes.

a) Indice de sévérité thermique :

Il faut commencer par déterminer TSN (Thermic Severity Number) qui prend en compte la géométrie et l'épaisseur de l'assemblage. Il faut diviser par 6 la somme des épaisseurs qui dépend des chemins de dispersion de la chaleur. Par exemple dans le cas d'un assemblage en T, il y'aura 3 chemins de dispersions, donc on aura l'équivalent de 3 épaisseurs.

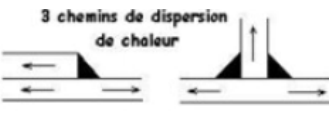
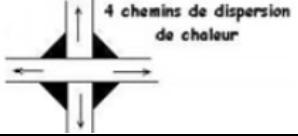
Donc, si on soude une tôle de 4 mm sur une tôle de 6 mm, on aura $(6+6+4)/6 = 2,67$

$$T.S.N = \frac{\text{Somme des épaisseur}}{6}$$



CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Tableau III.6 : Des exemples sur la TSN [56].

Type de joint	Epaisseur des tôles en mm	TSN
 2 chemins de dispersion de chaleur	6 et 6	2
	24 et 24	8
	24 et 48	12
 3 chemins de dispersion de chaleur	6 et 6	3
	12 et 12	6
	24 et 24	12
 4 chemins de dispersion de chaleur	6 et 6	4
	24 et 24	8
	6 – 12 – 12 – 12	7

b) Indice de soudabilité

Il est fonction du pourcentage en C_{éq.}, de l'acier à souder, ainsi que de la nature des électrodes utilisées. Le tableau ci-dessous permet de le déterminer après avoir calculé le C_{éq.} Par la formule :

Tableau III.7 : Indice de soudabilité en fonction de C_{éq} [37].

$C_{éq} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo + Cr + V}{10}$		Indice de La soudabilité
Electrodes rutils	Electrodes Basiques	
jusqu'à C _{éq} = 0,20	jusqu'à C _{éq} = 0,25	A
0,21 à 0,23	0,26 à 0,30	B
0,24 à 0,27	0,31 à 0,35	C
0,28 à 0,32	0,36 à 0,40	D
0,33 à 0,38	0,41 à 0,45	E
0,39 à 0,45	0,46 à 0,50	F
> 0,45	> 0,50	G

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

c) Diamètre des électrodes et température de préchauffage :

La quantité de chaleur transmise au joint étant liée au diamètre des électrodes utilisées, on prend en compte ce paramètre pour le calcul de T_p (Température de préchauffage).

Tableau III. 8 : Diamètre des électrodes en fonction de la température de préchauffage [36].

Chiffre de sévérité thermique	Indice de soudabilité	Température minimum à laquelle doit être effectuée la soudure				
		Diamètre des électrodes en millimètres				
		3.2	4	5	6	8
		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
T.S.N. 2	D E F	0 50 125	0 25			
T.S.N. 3	C D E F	0 75 100 150	0 25 100	0 25		
T.S.N. 4	C D E F	50 100 125 175	25 75 125	0 75	0	
T.S.N. 6	B C D E F	50 100 150 175 225	25 100 125 175	25 75 125	0 75	0
T.S.N. 8	A B C D E F	25 75 125 175 200 225	25 75 125 150 200	25 75 125 175	0 50 125	25 50
T.S.N. 12	A B C D E F	75 125 150 200 225 250	25 75 125 175 200 225	25 75 125 175 200	0 75 100 150	0 50 125
T.S.N. 16	A B C D E F	75 125 175 200 225 250	25 75 150 175 200 250	0 50 125 175 200 225	0 50 125 150 200	25 50 100 150
T.S.N. 24	A B C D E F	75 125 175 200 225 250	25 75 150 175 200 250	0 50 125 175 200 225	25 75 125 175 200	25 100 150 200

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.3.4 Calcul de la vitesse de refroidissement

III.3.4.1 Méthode de l'irsid

L'Institut de Recherche de la SIDérurgie française (IRSID) a mis au point un abaque qui permet de déterminer la nécessité ou non d'un préchauffage.

Il permet, également de calculer la vitesse de refroidissement entre 800 et 500°C Δt . Elle utilise les paramètres suivants [36]:

- Energie nominale $E_n = U \cdot I / V$ en fait $E_n = 60 \cdot U \cdot I / 1000$ V.
- Energie corrigée qui tient compte de la géométrie du joint $E_c = E_n \cdot k$
- Energie équivalente qui tient compte de la géométrie de l'assemblage et du rendement d'arc (pertes par rayonnement par exemple) :

$$E_q = E_c \cdot \eta = E_n \cdot k \cdot \eta$$

$\eta = 1$ pour le soudage à l'électrode enrobée et sous flux solide.

$\eta = 0.7$ pour le soudage MIG MAG

$\eta = 0.5$ pour le soudage TIG.

Avec E_n , E_c , E_q en kJ/cm

- Epaisseur des pièces à souder en mm.

Tableau III.9 : Le coefficient K souvent le type de joint

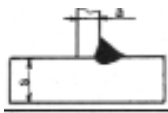
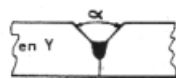
	Soudage à plat K=1					
	$\frac{a}{S}$	0	0.25	0.5	0.75	1
		1	0.97	0.89	0.78	0.67

Tableau III.10 : Le coefficient K souvent l'angle des chanfreins

Forme	α	60°	75°	90°	105°
	K	0.60	0.63	0.67	0.70
	K	1.50	1.72	2	2.38
	K	0.75	0.85	1	1.20

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

a) Pour obtenir le point (5) :

Selon l'assemblage à réaliser, le soudeur émet l'hypothèse d'une $E_n = 18 \text{ kJ}$ pour une électrode de $\varnothing 4 \text{ mm}$ (1)

$k = 0.75$ (2) $\varnothing 4$, 111 $\eta = 1$ (3) Schéma ci-dessous Epaisseur = 20 (4).

Le point (5) nous donne $\Delta t = 6 \text{ s}$ (tr)

b) Pour obtenir le point (8) :

La température de préchauffage sera de : 250°C points (6) et (7) ce qui donne

$\Delta t = 15 \text{ s}$ (tr) point (8).

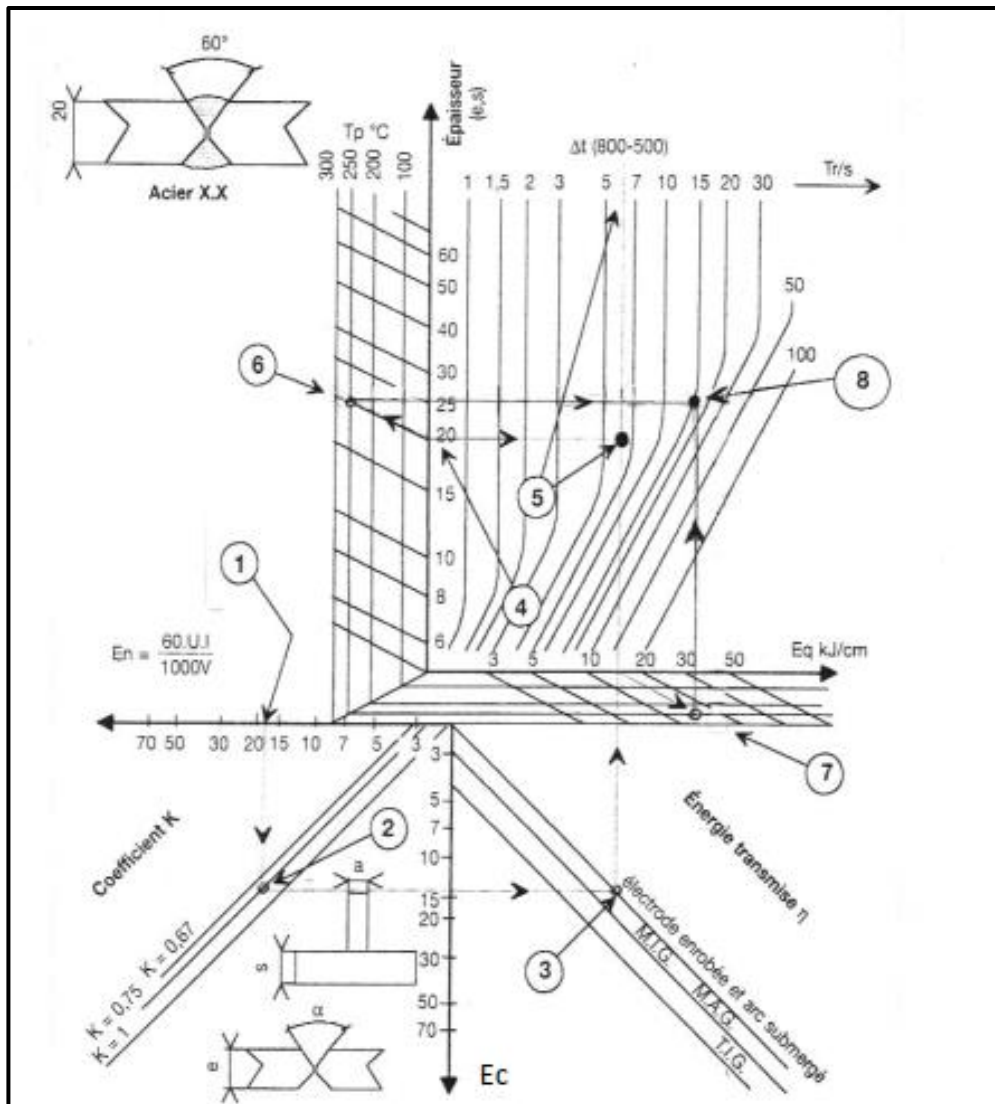


Figure III.38 : Abaque thermique général de l'IRSID didactisme [36].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.3.4.2 Méthode baus et chapeau

Les expressions des durées de refroidissement sont déduites des expressions de la répartition thermique de la chaleur dans les assemblages soudés.

Pour éviter les calculs, on utilise l'abaque établi par BAUS et CHAPEAU à partir de ces expressions des durées de refroidissement. Cet abaque permet de déterminer indifféremment [36] :

- La durée de refroidissement entre 800 et 500°C Δt .
- L'énergie de soudage nécessaire en fonction de la géométrie du joint soudé, on utilise l'énergie dissipée $E_d = E_n * \eta$.
- La température de préchauffage, si besoin est.

a) Quadrant supérieur gauche orange :

On l'utilise pour les tôles épaisses ($e > 25\text{mm}$) en soudage bout à bout avec chanfrein en V. Pour différentes températures 20 à 200°C, on lit l'évolution de la durée de refroidissement

Δt = en fonction de l'énergie dissipée E_d .

Avec : $E_d = E_n * \eta$	η 1 tôles minces	η 2 tôles épaisses
Soudage sous flux solide	0.9	0.99
Soudage électrode enrobée	0.7	0.85
MIG, MAG	0.65	0.85
TIG	0.3	0.48

- Pour $T_o = 20^\circ\text{C}$ et $E_d = 17\text{ kJ/cm}$, $\Delta t = 6.5\text{ s}$.
- Pour $T_o = 200^\circ\text{C}$ et $E_d = 17\text{ kJ/cm}$, $\Delta t = 14\text{ s}$.

a) Quadrant supérieur droit bleu :

Il est utilisé pour le soudage des tôles minces ($e < 25\text{mm}$) en bout à bout, en L, ou en T.

Pour différentes températures 20 à 200°C, on lit l'évolution de la durée de refroidissement en fonction de l'énergie dissipée E_d/e' (e' : épaisseur combinée en cm). L'écoulement du flux thermique ou de la chaleur (calcul de e') dépend du nombre de chemins de dispersion de la chaleur (voir les schémas sur l'abaque).

Par exemple : deux tôles d'épaisseur 10 mm sont soudées en T avec électrodes enrobées.

L'énergie nominale de soudage étant de 18 kJ/cm.

On détermine E_d et e' : $E_d = E_n * \eta = 18 * 0.7 = 12.6\text{ kJ/cm}$.

$-e' = 0.5 (e_1 + 2e_2) = 0.5 (1 + 2) = 1.5\text{ cm}$.

Sur le quadrant inférieur droit, à partir de ces deux valeurs, on obtient

$E_d/e' = 12.6 / 1.5 = 8.4\text{ kJ/cm}$.

On détermine ensuite à partir du quadrant supérieur droit. Le soudage s'effectue à température ambiante, 20°C, la vitesse de refroidissement entre 800 et 500°C $\Delta t = 9\text{ s}$

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

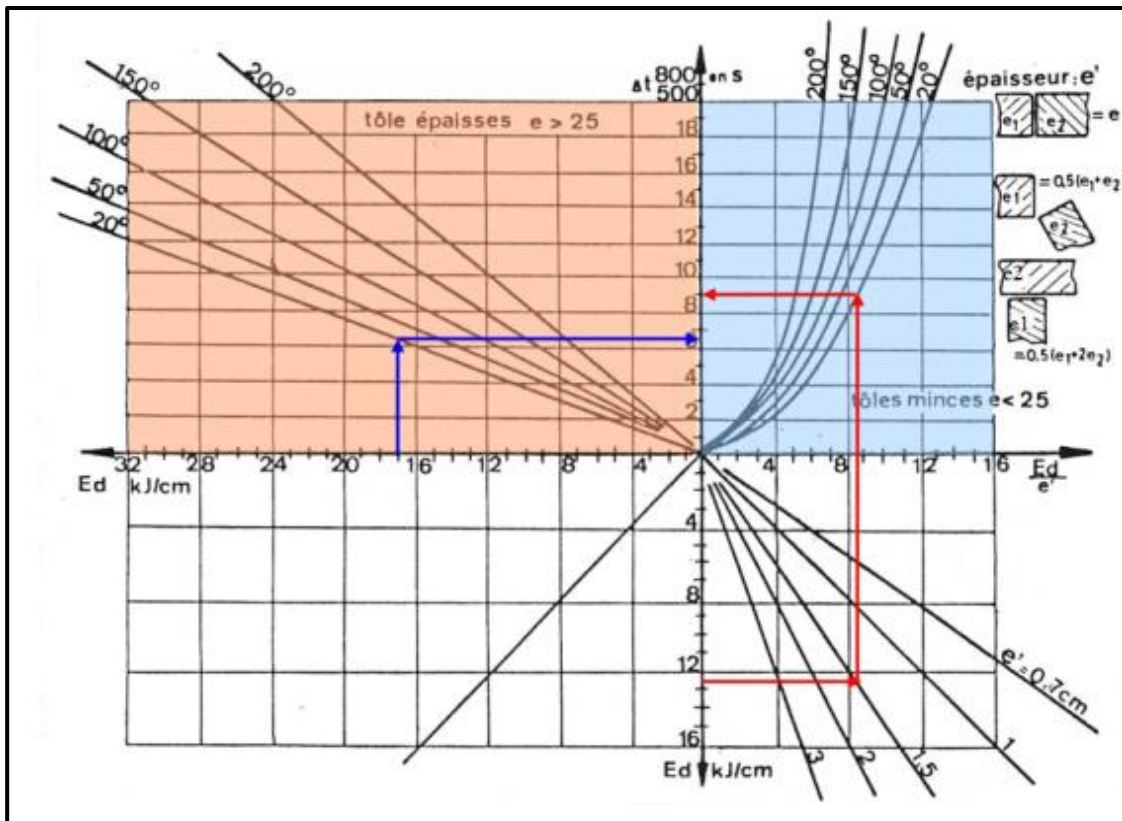


Figure III.39 : Abaque thermique de BAUS et CHAPEAU [36].

III.4. Contrôle des cordons par (CND) :

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. [58]

III.4.1 Contrôle visuel

C'est le premier des CND. il est le préliminaire indispensable à tous les autres examens de compacité qui peuvent être réalisés.

Il commence dès la réalisation de la soudure ; la personne la mieux placée pour le réaliser à ce stade est donc le soudeur lui-même qui doit être qualifié. Cette qualification sanctionne en effet sa « compétence », c'est-à-dire non seulement son habileté à souder, mais également son aptitude à juger de sa propre réalisation (auto contrôle de sa fabrication).

Le contrôle visuel porte sur l'aspect et les défauts géométriques des cordons (dimension de la gorge, caniveaux, morsures, surépaisseur ou affaissement, défaut d'alignement, déformation angulaire,...). Généralement à l'œil nu, il est amélioré par l'utilisation d'un petit matériel (jauges, loupe, endoscope). [58]



Figure III.40 : Principe de contrôle visuel [59].

III.4.2 Contrôle par ressuage

Le contrôle par ressuage permet de détecter des défauts de compacité, parfois très fins, débouchant en surface et non obstrués (fissures, porosités, replis, manque de liaison) sur des matériaux métalliques non poreux et non absorbants. Ce contrôle est réalisé à l'aide de produits (les pénétrants) à très faible tension superficielle qui pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface. Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces, l'apparition visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts [32].

Applications du contrôle par ressuage :

- Avant soudage : préparation des chanfreins.
- Pendant le soudage : contrôle entre passes...
- Après soudage : défauts superficiels, étanchéité.

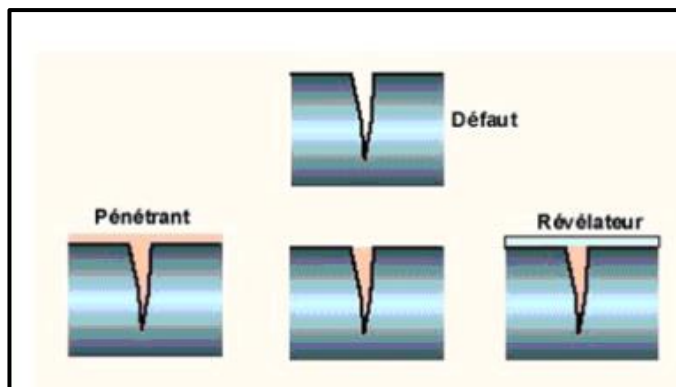


Figure III.41 : Ressuage [56].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.4.3 Contrôle par ultrasons

Les ondes ultrasonore sont émises au moyen de traducteurs (ou palpeurs) contenant un élément piézoélectrique (quartz par exemple) qui a pour particularité de transformer un courant électrique alternatif en oscillations mécaniques.

En présence de modifications des caractéristique du milieu dans lequel elles se propagent, les ondes voient leur propagation perturbée selon les lois de la réflexion –réfraction –absorption : l'onde incidente, lorsqu'elle arrive à une interface entre deux milieux, transmet une partie de son énergie au second milieu et en réfléchit une partie dans le premier.

Dans le cas particulier de l'air, les lois de la réflexion montrent qu'aucune énergie n'est transmise au second milieu (l'air) ; cette particularité importante est exploitée lorsque l'onde rencontre une fissure ou une inclusion gazeuse.

C'est également pourquoi on utilise un produit couplant (eau, colle de tapissier) sous le palpeur, à son interface avec la pièce à contrôler.

La méthode la plus usuellement employée est la méthode « par réflexion » qui n'utilise qu'un seul transducteur jouant simultanément le rôle d'émetteur et de récepteur.

En raison de la forme des assemblages soudés et de l'orientation la plus fréquente des défauts plans (fissure, manques de liaison) qui sont susceptibles d'être rencontrés, le contrôle par ultrasons des soudures est généralement effectué au moyen d'un faisceau d'ondes transversales obliques (palpeurs d'angle) [29].

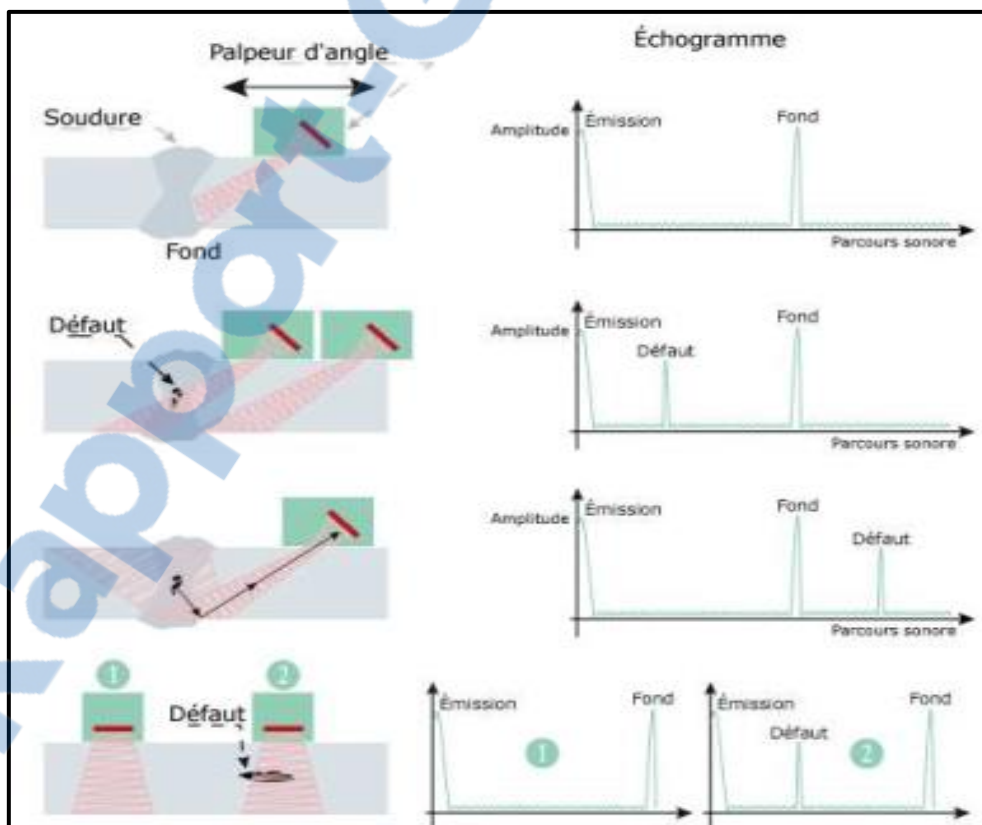


Figure III.42 : Schéma montre le principe de contrôle par ultrason [29].

III.4.4 Contrôle par radiographie

La radiographie est une méthode qui utilise les particularités des rayons X ou γ : ce sont des ondes électromagnétique de très faible longueur d'onde, aptes traverser des corps opaques à la lumière visible.

L'intensité de la radiation pénétrante durant sa traversée est modifiée entre un parcours dans le matériau sain et dans les défauts qu'il renferme ce phénomène est appelé « absorption différentielle ».

Un récepteur radiographique placé sous l'objet enregistre le faisceau émergent ce qui se traduit par une différence de densité ou contraste sur le film développé. Ce contraste entre l'image d'un domaine contenant un défaut et celle d'un domaine exempt de défaut permet à l'observateur de distinguer l'imperfection. Les deux procédés ne diffèrent que par la source de radiation :

- Rayons X : on utilise un tube en verre dans le quel règne un vide poussé. Il est alimenté en courant électrique et émet des électrons par échauffement d'un filament incandescent de tungstène (cathode). Le faisceau d'électrons est attiré par la différence de potentiel (plusieurs milliers de volts) vers une cible (anode ou anti cathode). L'impact des électrons sur la cible génère chaleur (99%) et rayons X (1%).
- Les rayons γ : sont émis lors de la désintégration spontanée d'un noyau atomique (par exemple Iridium 172, cobalt 60).

Une interprétation des radiographies passe par un ensemble de paramètres interdépendants qui conditionnent la qualité des images du film, protection de ces derniers contre les rayons secondaires (écrans renforceurs), flou géométrique (compromis entre le diamètre de la source et la distance source film : nature).

La qualité d'image est appréciée par des « indicateurs de qualité d'image » (IQI).

L'exposition d'une partie quelconque du corps humain aux rayons X ou γ peut être préjudiciable à la santé, aussi toute utilisation de matériels à rayons X ou de sources radioactives est soumise à des dispositions légales ou réglementaires qu'il y a lieu de suivre scrupuleusement. [58]



Figure III.43 : Principe de contrôle par radiographie [58].

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

III.4.5 Contrôle magnétoscopique

a) Principe du contrôle magnétoscopique :

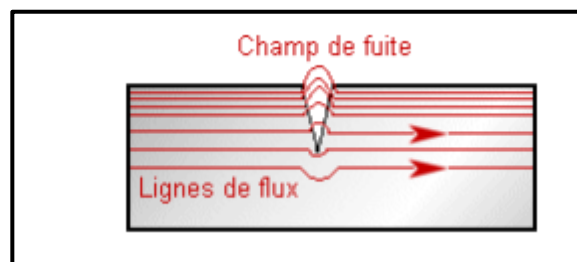
Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchant (obstrués ou non) et sous-jacents (de 1 à 2 mm) sous la surface des matériaux métalliques ferromagnétiques (les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium sont exclus de cette application). Un champ magnétique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

b) Produits détecteurs magnétiques :

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

c) Poudre sèche magnétique :

La détection des défauts plus grossiers est réalisée avec une poudre sèche constituée de grains de spinelle de fer Fe_3O_4 - Fe O et de fer oxydé finement divisés (de l'ordre de 10 à 30 microns) [32].



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

Figure III.44 : Principe du contrôle magnétoscopique [32].

III.5 Les critères d'acceptation des défauts de soudure

Pour les contrôles de routine lorsque la norme EN 1090-2 est mise en place, les critères d'acceptation relatifs aux défauts des soudures doivent faire référence à l'EN ISO 5817.

Les critères d'acceptation relatifs aux défauts des soudures sont référencés par la norme EN ISO 5817, doivent être les suivants [56]:

- EXC1 : Niveau de qualité D
- EXC2 : Niveau de qualité C en général sauf niveau de qualité D pour « Caniveau », 5012),

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

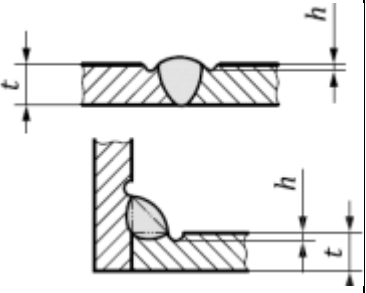
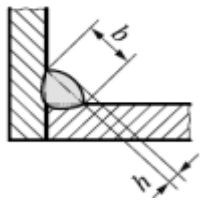
« Débordement », « Amorçage accidentel » et « Retassure ouverte de cratère »

- EXC3 : Niveau de qualité B
- EXC4 : Niveau de qualité B+ qui est le niveau de qualité B avec les exigences complémentaires données par la norme EN 1090-2.
- Les contrôles à effectuer sont décrits dans la norme EN ISO 3834. Toutes les méthodes d'essais non destructifs doivent être élaborées et exécutées par une personne qualifiée (cf. norme EN ISO 9712).
- Toutes les soudures doivent être contrôlées sur toute la longueur, suivie d'un essai de ressuage ou de contrôle électromagnétique lorsque des défauts sont constatés.

Tableau III.11 : principaux défauts et tolérances selon les normes ISO5817 ET EN 1090-2[56].

Désignation du défaut	Remarques	T (mm)	Limite des défauts pour les niveaux de qualité			
			D	C	B	B+
fissure		≥ 0.5	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé
Fissure de cratère		≥ 0.5	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé
Piqûre	Dimension maximale d'une piqûre isolée pour	0.5 à 3				
	Soudures bout à bout		$d \leq 0.3 s$	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé
	Soudure d'angle		$d \leq 0.3 a$			
	Dimension maximale d'une piqûre isolée pour	> 3				
	Soudures bout à bout		$d \leq 0.3 s$ mais max. 3mm	$d \leq 0.2 s$ mais max. 2 mm	Non autorisé	Non autorisé
	Soudure d'angle		$d \leq 0.3 a$ mais max. 3mm	$d \leq 0.2 s$ mais max. 2 mm	Non autorisé	Non autorisé
Manque de fusion (collage)		≥ 0.5	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Micro manque de fusion (micro collage)	Uniquement détectable par micro-examen	≥ 0.5	Autorisé	Autorisé	Autorisé	Autorisé
Coup d'arc ou amorçage accidentel		≥ 0.5	Autorisé si les propriétés du métal de base ne sont pas affectées	Non autorisé	Non autorisé	Non autorisé
Caniveau continu	Transition douce exigée. N'est pas considéré comme défaut systématique	0.5 à 3	Défauts courts : $h \leq 0.2 t$	Défauts courts : $h \leq 0.1 t$	Non autorisé	Non autorisé
Morsure ; caniveau discontinu		> 3	$h \leq 0.2 t$ mais max. 1 mm	$h \leq 0.1 t$ mais max. 0.5 mm	$h \leq 0.05 t$ mais max. 0.5 mm	Soudures bout à bout acceptable localement $h \leq 0.5 \text{ mm}$ Soudures d'angle inacceptable si transversal à la direction de la contrainte. Les caniveaux doivent être éliminés par meulage.
Convexité excessive (soudure d'angle)		≥ 0.5	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.25 b$ mais max. 5 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.15 b$ mais max. 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.1 b$ mais max. 3 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0.1 b$ mais max. 3 mm

CHAPITRE III LES DIFFERENTES CRITERES DE LA QUALITE DES JOINTS SOUDEES DU PIPELINES

Inclusion solide	Soudures bout à bout	≥ 0.5	$h \leq 0.4 s$ mais max. 4 mm	$h \leq 0.3 s$ s mais max. 3 mm	$h \leq 0.2 s$ s mais max. 2 mm	
Inclusion de laitier			$l \leq s$ mais max. 75 mm	$l \leq s$ mais max. 50 mm	$l \leq s$ mais max. 25 mm	
Inclusion de flux	Soudure d'angle	≥ 0.5	$h \leq 0.4 a$ a mais max. 4 mm	$h \leq 0.3 a$ a mais max. 3 mm	$h \leq 0.2 a$ a mais max. 4 mm	
Inclusion d'oxyde			$l \leq a$ mais max. 75 mm	$l \leq a$ mais max. 50 mm	$l \leq a$ mais max. 25 mm	

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le soudage est l'un des processus d'avant-garde des processus technologiques de construction ou l'assemblage des pipelines, c'est un facteur déterminant du coût de construction ou l'assemblage, de la fiabilité d'exploitation des conduites et du progrès général de la construction ou l'assemblage des pipelines de nouvelle génération par l'assurance une meilleur qualité de joint de soudure.

Dans ce travail on trouve que la fiabilité de soudures des pipelines dépend la qualité des joints soudés par :

- La reconnaissance des défauts de soudure et leurs causes, remèdes ainsi que les mesures préventives.
- Contrôlés de la qualité des cordons de soudures.
- Les critères d'acceptation des défauts de soudures.

Références bibliographique

- [1] Fateh Aggoun ; Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation ; Thèse de Magister en Génie Mécanique option : Mécanique Appliquée en Engineering ; 2010
- [2] Djdid Ibrahim ; étude sur les défaillances des aciers API-5LX60 pour pipeline cas de la ligne GZ1 ; Mémoire de master en génie mécanique option maintenance industriel ; Université Tlemcen ; 2013.
- [3] Mechernene Abderrahim ; Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipeline ; Mémoire de master en Génie Mécanique Option Ingénierie des systèmes mécaniques productive ; Université Tlemcen 2013.
- [4] Amina Bendjabour ; Corrosion localiser des aciers API 5L-X52 de la ligne ASR/MP sollicite en sol algérien ; thèse de magister en sciences des matériaux ; Université Tlemcen ; 2011.
- [5] Hadjoui Fethi « Etude du comportement en fatigue des aciers pour pipelines à différents grades ; thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Tlemcen. 2011
- [6] Bouziane Abdelkader ; contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure ; thèse de magister en génie mécanique ; université m'hamed bougara boumerdes ; 2008.
- [7] Bellahcen Tassadit ; Etude de la nocivité des défauts dans les canalisations sous environnement hydrogène ; Thèse de doctorat de génie mécanique ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ; 2008.
- [8] François ravaline ; développement d'acier pour gazoducs a haute limite d'élasticité et ténacité élevé : mécanique et mécanismes de la rupture ductile à grande vitesse ; thèse de doctorat ; l'école nationale supérieur de mines de paris en science et génie des matériaux ; 1998
- [9] Introduction au transport du pétrole aux quatre coins du monde ; <http://www.explorecuriocity.org/Portals/2/Themes/Energy/Moving%20Oil%20Around%20the%20World%20Primer-FR.pdf>
- [10] Scott Rukke ; Pipeline Repair Using Clock Spring, Composite Sleeve Reinforcement, Washington Utilities ; Transportation Commission.
- [11] A. Benlekhal ; Rapporte sur les procédures de réparation en charge de canalisation de transport d'hydrocarbures par demi-coquilles soudées ; SONATRACH-DRC ; Oran-Arzew ; 15 Août 2010.
- [12] Dr .-Ing. Karl-Heinz Brensing ; steel tube and pipe manufacturing processes ; düsseldorf.
- [13] API specification 5l forty-third edition, 49 CFR 192.113, MARCH 2004
- [14] HEBBAZ Mohammed Amine ; Défauts dans Les pipelines et leurs effets sur le Comportement en fatigue ; Mémoire de Master option Maintenance Industrielle ; Université

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Tlemcen ; 2015

[15] Lucinda Jeanette Smart ; Review of materials property data for nondestructive characterization of pipeline materials ; Graduate Theses and Dissertations ; Iowa State University ; 2015

[16] Duraid_Alkazraji ; A Quick Guide to Pipeline Engineering ; 2008

[17] Andrew C. Palmer and Roger A. King ; Subsea Pipeline Engineering 2nd Edition ; 2008

[18] W. Kent Muhlbauer ; Pipeline Risk Management Manual Ideas, Techniques, and Resources Third Edition ; 2004

[19] Henry liu ; pipeline engineering ; 2003

[20] Travaux de pose d'un gazoduc Séquences de réalisation ; GRTgaz ; http://www.grtgaz.com/fileadmin/grands_projets/cyrennee/documents/fr/Travaux_de_pose.pdf

[21] Adnen KECHAOU ; étude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage ; Thèse de Doctorat ; Université de Liège ; 2013

[22] Mathieu Touboul ; Etude du comportement mécanique à chaud de l'acier P91 Vers la compréhension des mécanismes intra/inter granulaires sur la tenue en fluage: Application aux structures soudées ; l'École nationale supérieure des mines de Paris Spécialité Sciences et Génie des matériaux ; 2012

[23] Zaoui Moussa ; Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées, cas des soudures épaisses ; thèse de Doctorat en génie mécanique; Université mentouri constantine ; 2009

[24] R.baus. W, Chaprau, Application de soudage aux constructions ,1979

[25] Welding of Pipelines and Related Facilities ; API STANDARD 1104 TWENTY FIRST EDITION , 2012

[26] Opérations de soudage à l'arc. Guide pratique de ventilation n° 7. Editions INRS ED 668. INRS ; 1996

[27] Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; www.angers.ensam.fr

[28] Les fiches conseils : La soudure au gaz. La soudure à l'arc ; www.mrbricolage.fr

[29] Barkat yassine ; Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines ; Memoir de master en Génie des Procédés ; Université Mohamed Khider Biskra ; 2016

[30] Mougari Abdessamad et Mr : Boukhari Mohamed Etude du Comportement mécanique et électrochimique des soudures hétérogènes acier inox (316L)/acier au carbone (A106 Gr.b)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [31] Rocardier ; Cour Le soudage MIG MAG, semi-automatique GMAW ; 25/06/2015 ; www.rocdacier.com
- [32] Beneddeb Mostefa ; Étude les défauts de soudage des pipelines ; mémoire master en Génie Mécanique Option Construction Mécanique ; Université Mohamed Khider Biskra ; 2012
- [33] Les fiches conseils : La soudure au gaz. La soudure à l'arc ; www.mrbricolage.fr
- [34] <https://www.scribd.com/document/332914792/procedes-soudage-pdf>.
- [35] Département de sante communautaire de l'hôpital maisonneuve - rosemontfumées de soudage: facteurs contributifs et moyens de contrôle ; <http://www.santecom.qc.ca/Bibliothequevirtuelle/santecom/35567000038544.pdf>
- [36] http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/5_241/5241-metallurgie-du-soudage-dossier-professeur.pdf
- [37] <http://www.protem.fr/actualites/43-assemblage-de-tubes-bout-a-bout-les-differents-types-de-chanfreins-et-comment-les-realiser>.
- [38] 6H.Granjon ; Bases métallurgiques de soudage ; publications de soudage et de ses applications ; 1995.
- [39] W.Kurz ; J.P.Mercier ; Introduction à la science des Matériaux ; 1991
- [40] N.cavallo ; Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors d'une opération de soudage ; thèse de doctorat ; INSA ; Avril 1998
- [41] Transition ductile-fragile dans un acier faiblement allié ; Thèse de doctorat ; Ecole centrale de Paris ; Septembre 2002
- [42] B.chassignole ; Influence de la structure métallographique des soudures en acier inoxydable sur le contrôle non destructif par ultrasons ; thèse de doctorat ; INSA ; Lyon ; Décembre 2000
- [43] H.granjon ; Bases métallurgiques de soudage ; publications de soudage et de ses applications ; 1995
- [44] H.granjon ; Bases d'age ; publications de soudage et de ses applications ; 1995
- [45] R.bourgeois ; Mémothech, Génie des matériaux ; édition éducative ; 2001
- [46] Anne-Sophie BILAT ; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ; 2007 Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade caractérisation et modélisation
- [47] Jacky Ouellet ; Les Zones Grises en Soudage ; 2 mai 2013
- [48] Mr. Benhammouda Abdelghani ; Mr. hemmal Abderazzak ; Caractérisations mécaniques et électrochimiques d'un joint soudé en acier API 5L X70 ; Mémoire de fin d'études ingénieur ; école nationale supérieure des mines et métallurgie ENSMM-Annaba ; 2016

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [49] Cheraitia Redouane ; Etat de l'art sur les défauts dans les joints de soudure et leurs effets sur la fissuration par fatigue ; Master En Génie Mécanique Option Maintenance Industrielle ; Université Tlemcen ; 2015
- [50] Comité sectoriel de la main-d'œuvre de la fabrication métallique industrielle ; Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage ; Edition CSMOFMI ; Québec
- [51] Rocardier ; cour défauts des soudures ; 25/09/2012 ; www.rocdacier.com
- [52] Guide pratique du soudeur électrode enrobée (MMA) ; Usage interne ; Propriété ESAB ; 06/11/2009
- [53] Antony fernandes ; Guide pratique Interne procédé TIG ; ESAB France ; 11/09/2009
- [54] Le soudage MIG MAG SD service ; 2014 ; [www.sdservice.f r](http://www.sdservice.fr)
- [55] Rocardier ; cour Températures de préchauffage, SEFERIAN, BWRA ; 12/01/2013 ; www.rocdacier.com
- [56] L E SOUDAGE Qualification et compétences exigées par la norme EN 1090-2 ; Février 2016
- [57] Rachid bouras ; cour contrôles non destructifs ; UMMTO
- [58] S. KHAOULA ; L'étude De L'effet Thermique Sur Une Soudure D'une Pipeline ; Mémoire De Master En Génie Chimique; Université De Mouhamed Kheider Biskra ;2012