



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

/...../...../...../...../.....

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية و الكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine: *sciences et technologies*

Filière: *électromécanique*

Spécialité: *maintenance industriel*

Thème :

Contrôle Qualité des Soudures de l'Acier X70 Réalisées par les
Procédés SAW et SMAW

Soutenue publiquement le 17/06/2021

Par

REMMA ABDELAZIZ

BENDARA SADJEDA

Devant le jury composé de:

MERZOUG HOCINE

M A A

Univ. Ghardaïa

Examinateur

M. BOUKHARI Hamed

M C B

Univ. Ghardaïa

Examinateur

M. ZITANI Brahim

M A A

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2020/2021

Dédicaces

Je voudrais dédier ce travail à la lumière de ma vie, ma chère mère, qui a travaillé si dur et a dépensé sa vie et sa santé pour que j'atteigne ce moment.

A mon cher père qui a tout fait pour ce jour .

A mes chers frères Abdel Latif, Muammar, ma belle et douce soeur Saloma, et toute ma famille BENDARA .

Et à mon collègue Remma Abdel Aziz, qui a été le meilleur collègue dans ma carrière universitaire et l'accomplissement de ce travail .

Et à mes professeurs Zitani Ibrahim, Professeur Benaouicha, Professeur Marzouk, Professeur Allali, Professeur Akrami, et tous mes distingués professeurs .

SADJEDA

Dédicaces

Au sens de gratitude et d'amour je dédie ce travail à Dieu tout puissant Allah qui m'a donné la volonté et la puissance pour réaliser cette étude dont je souhaiterai qu'elle sera acceptée par lui sobhanaho et qu'il m'aide à continuer incha Allah.

A ma famille :

Avec une profonde reconnaissance et toute ma gratitude, grâce et remerciement vont aussi à MES PARENTS pour ses tendresses, amours, ses encouragements, et surtout de tous ses sacrifices, pour avoir sacrifié ses plus belles années pour moi pour que je puisse mon arriver là où je suis, c'est grâce à eux; et aussi pour mes frères, ainsi à ma famille REMMA et AZZOUZ que je n'oublierai jamais ses encouragements et ses conseils aussi.

A mes amis :

Mes amis: Sadjeda , Sabrina, Keltoum ,Lamis ,Farouk et tous mes meilleurs amis; ainsi à toute mes amis de promo 2020/2021 et à tous les autre qui étaient là pour moi et à tous les autres que je les connais bien.

Toute la promotion : M2-MI 2020/2021. Tous ce qui m'aime et que j'aime

ABDELAZIZ

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir donné l'opportunité d'atteindre cette étape de notre vie, en particulier dans nos études.

Nous remercions tout particulièrement notre distingué professeur, le professeur Zitani, pour nous avoir accompagné pendant de nombreuses années à l'université et pour sa supervision de la préparation de ce travail.

Nous tenons également à remercier M. Dradji, chef de département chez AlfapipeCompany, pour sa grande assistance pendant notre stage dans l'entreprise et pour sa générosité en nous fournissant toutes les informations relatives à notre mémoire

Je remercie également tous les travailleurs de l'entreprise qui nous ont fourni suffisamment d'informations et d'explications pour préparer ce travail, en particulier notre collègue Hannai Yassin.

Enfin, je tiens à remercier tous les professeurs qui nous ont accompagnés durant nos années d'études à l'université et pour leurs grands efforts.

Listes des tableaux

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Tableau I.1: Caractéristiques techniques des bobines..... | 18 |
| Tableau I.2: Diamètres des tubes et des épaisseurs des parois pour la soudure en spirale.... | 18 |

Chapitre II :

| | |
|--|----|
| Tableau II.1: Les pipelines en acier de grade API | 28 |
| Tableau II.2: composition chimique des aciers de pipelines, norme API | 29 |
| Tableau II.3: Composition variable suivant l'emploi..... | 30 |
| Tableau II.4: Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API 5L..... | 37 |

Chapitre III :

| | |
|---|----|
| Tableau III.1: Des différents types de soudage..... | 41 |
| Tableau III.2: Granulation des flux fondus selon la norme NFA 81-319..... | 52 |
| Tableau III.3: Valeurs approximatives d'intensités et de tension de soudage pour des travaux courants..... | 56 |
| Tableau III.4: Influence des différents paramètres sur la morphologie du cordon de soudure | 61 |
| Tableau III.5: Influence des paramètres de soudage sur le cordon..... | 61 |
| Tableau III.6: Facteurs déterminant le choix de l'électrode. | 66 |
| Tableau III.7: Consommations d'électrodes | 69 |

Chapitre IV :

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1: présente les causes les plus fréquentes de fissurations à chaud et à froid, et les moyens de les prévenir..... | 75 |
| Tableau IV.2: La composition chimique de l'acier API 5L X70..... | 79 |
| Tableau IV.3: Caractéristique mécanique l'essai de traction..... | 83 |
| Tableau IV.4 : Résultats des essais de traction sur le métal de base..... | 85 |
| Tableau IV.5: Résultat d'essai de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure..... | 86 |
| Tableau IV.6: L'essai de pliage se lon la norme API 5L X70..... | 88 |
| Tableau IV.7: Les valeurs de la résilience et énergie absorbée pour les différentes zones... | 90 |
| Tableau IV.8: en utilisant la notation suivante pour distinguer les différentes régions..... | 94 |
| Tableau IV.9: principaux contrôle non destructifs..... | 97 |

Listes des figures

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Situation géographique d'ALFAPIPE GHARDAIA..... | 13 |
| Figure I.2 : Organigramme de direction général d'alfa pipe..... | 15 |
| Figure I.3 : Cycle de fabrication du tube..... | 16 |
| Figure I.4 : Tube préparé à la machine soudé en spirale..... | 20 |
| Figure I.5 :contrôle visuel par des agentes professionnelle..... | 20 |
| Figure I.6 : Tube à l'examen ultra-sons..... | 21 |
| Figure I.7 : Contrôle de la soudure par radioscopie..... | 21 |
| Figure I.8 : Contrôle de la soudure par radiographie..... | 22 |
| Figure I.9 : L'épreuve hydrostatique..... | 23 |
| Figure I.10 : Revêtement extérieur..... | 24 |
| Figure I.11 : Revêtement intérieur..... | 24 |
| Figure I.12 : Transport des tubes par camion SNTR..... | 25 |

Chapitre II :

| | |
|--|----|
| Figure II.1 : Pipeline dans l'environnement | 26 |
| Figure II.2 : .Microstructure ferrito-perlitique de l'acier API 5L X70..... | 31 |
| Figure II.3 : Bobine..... | 38 |

Chapitre III :

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie utilisée | 41 |
| Figure III.2 : Préparation des bords en assemblage bout-à-bout | 42 |
| Figure III.3 : Assemblages en angles..... | 43 |
| Figure III.4 : Assemblage à bords relevés..... | 43 |
| Figure III.5 : Assemblage à recouvrement..... | 44 |
| Figure III.6 : Différentes zones d'un joint soudé..... | 44 |
| Figure III.7 : Modification structurale de la ZAT..... | 45 |
| Figure III.8 : Cycle thermique de soudage..... | 47 |
| Figure III.9 : Soudage à l'arc submergé (SAW)..... | 48 |
| Figure III.10 : Soudage sous flux en poudre | 50 |
| Figure III.11 : Principe du procédé de soudage sous flux en poudre | 51 |
| Figure III.12 : Le flux..... | 54 |
| Figure III.13 : Courbe de fusion | 57 |
| Figure III.14 : Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure. | 58 |
| Figure III.15 : Taux de dépôt moyen en soudage sous flux | 59 |
| Figure III.16 : Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure | 59 |
| Figure III.17 : Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon | 60 |
| Figure III.18 : Soudage à l'électrode enrobée..... | 62 |
| Figure III.19 : Procédé de soudage à l'électrode enrobée | 63 |
| Figure III.20 : Caractéristiques de l'électrode enrobée | 64 |
| Figure III.21 : Fusion des électrodes | 68 |
| Figure III.22 : Teneur en humidité de l'enrobage% en fonction de t(h) | 71 |

Figure III.23 : Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon.....72

Chapitre IV :

| | |
|--|-----|
| Figure IV.1: Fissure longitudinale (Fissuration à chaud)..... | 74 |
| Figure IV.2 : Fissure à froid. | 75 |
| Figure IV.3 : Porosités débouchâtes en surface de cordon de soudure | 76 |
| Figure IV.4: Soufflures sphéroïdales non débouchantes | 77 |
| Figure IV.5: Excès de pénétration | 77 |
| Figure IV.6: Manque de pénétration et collage en bord du joint. | 78 |
| Figure IV.7: Morsures et caniveaux | 79 |
| Figure IV.8 :(a) Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tuyau (b) Eprouvette de traction de la soudure (c) Eprouvette de traction MB..... | 81 |
| Figure IV.9 : Prélèvement des plaques : (a) en métal de base transversale par rapport au virole et (b) transversales au cordon de soudure..... | 81 |
| Figure IV.10 :Microscope optique..... | 82 |
| Figure IV.11 : Eprouvette de traction : (a) contenant le cordon de soudure. (b) en métal de base..... | 83 |
| Figure IV.12 :Dimensions de l'éprouvette de traction..... | 83 |
| Figure IV.13 :Machine de traction..... | 84 |
| Figure IV.14 : Courbes d'essais de traction sur le métal de base..... | 85 |
| Figure IV.15 : Courbes d'essais de traction sur le métal content le cordon de soudage..... | 86 |
| Figure IV.16 : Eprouvette de DWTT..... | 87 |
| Figure IV.17 : Éprouvette de pliage..... | 88 |
| Figure IV.18 : Machine de pliage..... | 88 |
| Figure IV.19 : Résultat final..... | 89 |
| Figure IV.20 : Machine de résilience..... | 89 |
| Figure IV.21 : Un refroidisseur..... | 89 |
| Figure IV.22 : Eprouvettes de résilience..... | 90 |
| Figure IV.23 : Représente différentes positions de résilience..... | 91 |
| Figure IV.24 : Appareil mesuré la dureté HV | 91 |
| Figure IV.25: Variation de dureté Vickers dans les trois zones..... | 93 |
| Figure IV.26 : Micro duromètre utilisée pour les mesures de la micro dureté (Type Vickers)..... | 94 |
| Figure IV.27 :examen par éclairage..... | 98 |
| Figure IV.28 :contrôle par ressuage..... | 99 |
| Figure IV.29 : a) Radioscopie b) Radiographie..... | 101 |
| Figure IV.30 : contrôle par radiographie..... | 101 |
| Figure IV.31 : Exemple d'indicateur de qualité d'image (IQI)..... | 103 |
| Figure IV.32 :examen ultra-sons..... | 104 |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| <i>DEDICACES</i> | 1 |
| <i>DEDICACES</i> | 2 |
| <i>REMERCIEMENTS</i> | 3 |
| LISTES DES TABLEAUX | 4 |
| LISTES DES FIGURES | 5 |
| INTRODUCTION GENERALE | 11 |
| CHAPITRE I : GENERALITE SUR ENTREPRISE ALFAPIPE | 13 |
| I.1 introduction : | 13 |
| I.2 Présentation lieu de stage : | 13 |
| I.2.1 Historique : | 13 |
| I.2.3 Objectifs visés par le projet : | 14 |
| I.2.4 Définition les abréviations : | 15 |
| I.2.5 L’organigramme de direction générale d’alfapipe : | 15 |
| I.3 Procès de fabrication : | 16 |
| I.3.1 Introduction : | 16 |
| I.3.2 Les caractéristiques techniques : | 18 |
| I.3.3 Fonctionnement de la machine à souder en spirale : | 18 |
| I.4 Les contrôles non destructifs : | 20 |
| I.4.1 Contrôle visuel : | 20 |
| I.4.2 Examen ultra-sons : | 20 |
| I.4.3 Radioscopie : | 21 |
| I.4.4 Contrôle radiographique : | 22 |
| I.4.5 L’épreuve hydrostatique : | 22 |
| I.5 Les contrôles destructifs : | 23 |
| I.5.1 Les revêtements | 23 |
| I.5.2 Revêtement externe | 23 |
| I.5.3 Revêtement intérieur : | 23 |
| I.6 Parc de stockage : | 24 |

| | |
|---|-----------|
| I.7 Conclusion | 25 |
| CHAPITRE II : LES ACIERS | 26 |
| II.1. Généralités Sur Les Pipelines Et Les Aciers..... | 26 |
| II.1.1. Introduction : | 26 |
| II.2 Les aciers : | 27 |
| II.2.1 Définition : | 27 |
| II.2.2 fabrication d'acier : | 27 |
| II.2.3 Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers : | 28 |
| II.2.4 Classification d'acier : | 29 |
| II.2.5 Influence spécifique des éléments d'addition: | 30 |
| II.2.6 Microstructure de l'acier API5L X70 : | 31 |
| II.3 Les aciers à haute limite d'élasticités : | 31 |
| II.3.1 Introduction : | 31 |
| II.3.2 Influence de la composition chimique : | 32 |
| II.3.2.1 Le manganèse : | 32 |
| II.3.2.2 Le silicium : | 33 |
| II.3.2.3 molybdène : | 33 |
| II.3.3 Influence des éléments formants des précipités : | 33 |
| II.3.3.1 L'aluminium : | 33 |
| II.3.3.2 Le vanadium : | 34 |
| II.3.3.3 Le niobium : | 34 |
| II.3.3.4 Le titane : | 34 |
| II.3.3.5 Influence de la perlite : | 35 |
| II.4 Mécanismes de durcissements des aciers HLE : | 35 |
| II.4.1 Solution solide : | 35 |
| II.4.2 Précipitation : | 36 |
| II.4.3 Dispersion : | 36 |
| II.4.4 Affinement du grain : | 36 |
| II.4.5 Traitements thermiques : | 36 |
| II.5 propriété mécanique : | 37 |
| II.5.1 Avantage des aciers HLE : | 37 |
| II.5.2 Bobinage : | 37 |
| II.6 Conclusion : | 38 |
| CHAPITRE III : LE SOUDAGE ET SES PROCEDES..... | 40 |
| III.1 Généralités sur le soudage : | 40 |
| III.2 Définition de soudage : | 40 |
| III.3 Classification de procédés de soudages : | 40 |

| | |
|--|-----------|
| III.4 Les différents types de soudage : | 41 |
| III.5 Types des assemblages soudés : | 41 |
| III.5.1 Assemblage bout-à-bout : | 42 |
| III.5.2 Assemblage en coin ou en angles : | 42 |
| III.5.3 Assemblage à bords relevés : | 43 |
| III.5.4 Assemblage par recouvrement : | 43 |
| III.6 Différentes zones du joint soudé : | 44 |
| III.6.1 Zone fondue : | 44 |
| III.6.2 Zone de liaison : | 44 |
| III.6.3 Zone affectée thermiquement : | 44 |
| III.6.4 Métal de base : | 45 |
| III.7 Aspects métallurgiques de la zone soudée : | 45 |
| III.8 Cycle thermique de soudage : | 46 |
| III.9 Principaux procédés de soudage : | 47 |
| III.9.1 Soudage à l'arc submergé (SAW) : | 47 |
| III.9.1.1 Définition du procédé : | 47 |
| III.9.1.2 Principe du procédé : | 48 |
| III.9.1.3 Avantages du procédé : | 49 |
| III.9.1.4 Flux et matériau d'apport : | 50 |
| III.9.1.5 Etuvage des flux en poudre : | 53 |
| III.9.1.6 Rôles des flux en poudre : | 54 |
| III.9.1.7 Caractères des flux : | 54 |
| III.9.1.8 Désignation des flux de soudage à l'arc submergé d'après la spécification | 55 |
| III.9.1.8.1. Courbes de fusion [: | 56 |
| III.9.1.8.2. Symbolisation des fils électrodes nus massifs pour soudage à l'arc : ... | 57 |
| III.9.1.8.3 : Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé : | 58 |
| III.9.2 Soudage à l'électrode enrobée (SMAW) : | 61 |
| III.9.2.1 Définition de procédé : | 61 |
| III.9.2.2 Principe de procédé : | 62 |
| III.9.2.3 Sources d'alimentation : | 63 |
| III.10 Conclusion : | 72 |
| CHAPITRE IV: TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET PROCEDURES AVEC RESULTATS | 73 |
| IV.1 Introduction : | 73 |
| IV.2 Défauts des soudures : | 73 |
| IV.2.2 Fissuration à chaud : | 74 |
| IV.2.3 Fissuration à froid : | 74 |
| IV.2.4 Porosités : | 76 |
| IV.2.5 Soufflures : | 76 |
| IV.2.6 Inclusions : | 77 |

| | |
|--|------------|
| IV.2.7 Retassures et criques de solidification : | 77 |
| IV.2.8 Défauts de pénétration : | 77 |
| IV.2.9 Collage ou manque de fusion : | 78 |
| IV.2.10 Morsures et caniveaux : | 78 |
| IV.3 contrôle des soudures : | 80 |
| IV.4 Les essais destructifs : | 80 |
| IV.4.1 Prélèvement d'échantillons des plaques : | 80 |
| IV.4.2 Examen métallographique: | 81 |
| IV.4.3 La microstructure : | 82 |
| IV.4.4 Essai de traction : | 82 |
| IV.4.5 Essai de DWTT (Drop Weight Tear Test) : | 86 |
| IV.4.6 Essai de pliage : | 87 |
| IV.4.7 Essai de résilience (flexion par choc) : | 89 |
| IV.4.8 L'essai de dureté : | 91 |
| IV.4.9 Essai Vichers HV : | 92 |
| IV.4.10 : Essais de micro dureté : | 93 |
| IV.5 Les essais semi destructifs : | 96 |
| IV.6 Les essais non destructifs (CND) : | 96 |
| IV.6.1 Introduction : | 96 |
| IV.6.2 Généralités sur le contrôle non destructif : | 96 |
| IV.6.3 : Mise en œuvre des contrôles non destructifs : | 97 |
| IV.6.4 : Principaux contrôles non destructifs : | 97 |
| IV.6.5 Examen visuel : | 97 |
| IV.6.6 contrôles par ressuage : | 98 |
| IV.6.7 Contrôle par rayons ionisants (Radiographie) : | 100 |
| IV.6.8 Contrôle par ultrasons : | 103 |
| IV.6.9 Examen ultra-sons : | 104 |
| IV.7 Conclusion : | 104 |
| CONCLUSION GENERALE : | 106 |
| REFERENCE BIBLIOGRAPHIES | 107 |
| RESUMES | 110 |

Introduction Générale

L'acier de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux. Les tubes soudés en acier à haute limite d'élasticité laminés à chaud trouvent leurs applications dans de nombreux domaines : gros tubes pour transport du gaz liquéfié et d'hydrocarbures, est le moyen de transport de l'eau pour l'agriculture à partir des barrages et l'eau potable pour les grandes villes et les villes du grand sudetc.

D'une part le développement industriel des pipes en acier exige une maîtrise parfaite du processus de fabrication, par conséquent, le produit doit satisfaire plusieurs conditions techniques tel que :

Absence de défauts métallurgique et de défauts de procédé de soudage.

Propriétés mécaniques (résistance, ductilité).

Tolérance dimensionnelles (épaisseur, largeur et longueur).

D'autre part, le soudage présente la méthode la plus utilisée pour l'assemblage des Installations industrielles, l'opération de soudage est réalisée, soit par chauffage, soit par intervention de pression soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Les deux procédés utilisés pour la construction des tubes sont

-Le SAW : qui est un procédé utilisé par l'usine ANABIB pour la fabrication des tubes (gazoduc et hydraulique) en chaîne, le plus demandé par le cahier de charge.

-Le SMAW (soudage à l'arc avec électrode enrobée) : le procédé expérimenté, à l'effet de Vérifier l'efficacité du mode opératoire utilisé en chaîne.

Le travail a donc pour but d'étudier les performances de la nuance d'acier X70 avec ces deux procédés de soudage en se basant sur le critère

Le premier chapitre : est consacré la présentation du lieu de stage, l'entreprise ALFAPIPE GHARDAÏA.

Le deuxième chapitre : traite généralités sur les aciers.

Le troisième chapitre : le soudage et ses procédés SAW(submerged arc welding) Soudage sous flux et SMAW (Shielded metal arc welding) soudage à l'arc à l'électrode enrobée

Le quatrième chapitre : Techniques expérimentales et procédures (les contrôles destructifs et semi destructifs et non destructifs CND) avec résultats

Chapitre I :

Généralité sur

entreprise alfa

pipe

Chapitre I : Généralité sur entreprise alfapipe

I.1 introduction :

La société que nous avons choisie pour exécuter ce travail est la société **ALFAPIPE (GHARDAIA)**. Elle est implantée dans la zone industrielle de Bounoura à Gharदाïa, à 10km du chef-lieu de wilaya, l'usine occupe une superficie de 23000m² et son effectif s'élève en moyenne à 500 employés [1].

Spécialisée dans la production et commercialisation de tube soudé en spirale destiné à la construction de pipeline (gazoduc oléoduc), et aux infrastructures de transfert d'eau et travaux publique.



Figure I.1 : Situation géographique d'ALFAPIPE GHARDAIA [2]

I.2 Présentation lieu de stage :

I.2.1 Historique :

Les puits de pétrole et de gaz se trouvent à proximité de Hassi R'mel et Hassi Messaoud, la tuerie spiral d'El-Hadjar ne peuvent pas seul satisfaire les gros besoins de SONATRACH en matière de transport des hydrocarbures. Il a été décidé de créer cette 2eme unité similaire au 1er.

La mise en chantier de l'unité a démarré en Avril 1977 par une société allemande, et celle entrée en production en 1977 d'une capacité de 120000 tonnes annuelle, d'une équivalence de 375km de tube de 42 pouces de diamètre. Les machines installées dans cette usine peuvent produire des tubes de 16 à 64 pouces de diamètre, 7,92 à 15mm d'épaisseur et d'une longueur de 7 à 13m.

Les bobines sont transportées par voie ferroviaire d'Annaba à Ghardaïa où elles sont stockées dans un dépôt d'une capacité de 40000 tonnes, pour être transporté par camion SNTR jusqu'à GHARDAIA (350km). Le transport constitue pour limiter un goulot d'étranglement qui gêne par fois les paramètres de production [3]

I.2.2 La norme de fabrication le tube :

En dehors des dérogations ou des exigences particulières de la présente spécification et/ou de la commande, tous les tubes seront rigoureusement contrôlés suivant les normes **API** : [4]

API: American Petroleum Institute Standards.

-**API 5L**: spécification for line Pipe, 44 ème édition,

-**API Q1**: spécification for qualité programs.

ASME : American Society for MechanicalEngineers

-**ASME** Partie C: Spécification pour baguettes d'apport, électrodes et métaux d'apport.

ASNT: American Society for Non-Destructive Testing ASNT

-**SNT-TC-1A**, Pratiques Recommandées pour la Qualification et la Certification du personnel du Contrôle Non Destructif.

I.2.3 Objectifs visés par le projet :

L'entreprise ALFAPIPE a pour but de transformer les bobines et les produits plats aux tubes spiraux pour transporter le pétrole, le gaz, l'eau et tous autres liquides sous haute pression.

Pipeline :

- _ oléoducs (transport du pétrole).
- _ Gazoducs (transport du gaz) Hydraulique
- _ Transport d'eau.
- _ Alimentation en eau potable.
- _ Infrastructure hydraulique.
- _ Assainissement.
- _ Drainage.
- _ Soutien puits.

I.2.4 Définition les abréviations :

On appliquera, dans le cadre de la présente spécification, les définitions et abréviations suivantes :

SPF : spécification de procédé de fabrication

CND: control non destructive.

API: American petrole uminstitute

ASME: American society of mechanical engineers

ASNT: American society of non-destructive testing

ISO: international organisation for standardisation

I.2.5 L'organigramme de direction générale d'alfapipe : [5]

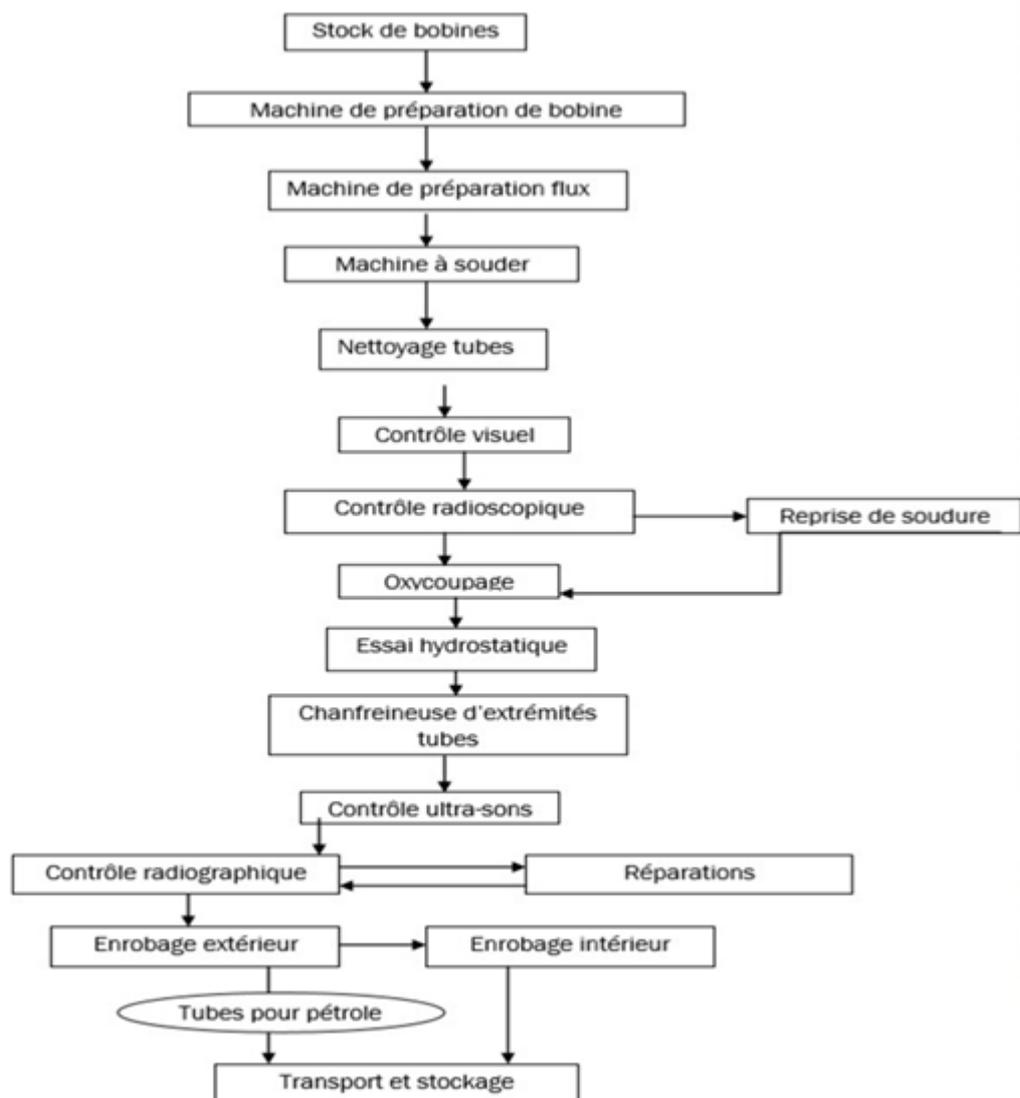


Figure I.2 : Organigramme de direction général d'alfapipe

I.3 Procès de fabrication :

I.3.1 Introduction :

Les tubes sont obtenues à partir des bobines laminés à chaud de tonnage 10 à 30 tonnes et d'une largeur 600 à 1800 mm, selon le diamètre du tube.

Les bobines sont déroulées planées, et formées en hélice puis soudées à l'arc immergé sous flux en deux passes successives sur une même machine dite machine à souder en spirale.

La qualité des tubes soudés en spirale fabriquer par ALFA PIPE est basé sur le contrôle dès la réception de la matière première (bobine) jusqu'au produit fini (tube) en suivant la norme Américaine API 5L, en passant par plusieurs étape de contrôle. [6]



Figure I.3.A : Les bandes en aciers



Figure I.3.B : Soudure intérieur.



Figure I.3.C : Entrée bobine.



Figure I.3.D : Couper le tube



Figure I.3.E : Soudure extérieur



Figure I.3.F : nettoyage le tube.

Figure I.3 : Cycle de fabrication du tube

Ces éléments essentiels sont constituées par :

Élément de préparation de bobine (la bande).

Élément de formage de tube.

Élément de sortie du tube.

L'élément de réparation des bandes : s'étend du dispositif de déroulage des bandes dévidées jusqu'aux rouleaux de l'entraîneur. Dans cette zone la bobine est tirée au travers de la machine et passe par différents stades d'usinage. Elle est dressée, guidée et rongée des deux côtés par la cisaille circulaire de rognage qui fait ensuite

L'élimination des bords de laminage est liée à la mise au point d'une largeur constante de bande. Ensuite à l'aide des outils raboteurs et de brosse de nettoyage, on prépare les rives pour la soudure.

Le rabotage des bobines pour obtenir une sans fin fait également partie de la réparation des bandes. L'opération se fait comme suit :

Couper les languette de fin de bande.

Aligner les rives.

Souder voir

Pendant cette phase d'usinage, la soudure de tube est interrompue, pendant un court laps de temps. Tous les éléments de la partie préparation des bobines sont boulonnés fixés sur le châssis de base de la machine, celui-ci repose sur des galets et il est pivoté dans la position correspondante (angle d'entrée) selon la largeur et le diamètre du tube.

Dans la cage de formage, la bande est formée en tube selon le principe de la cintreuse à rouleaux multiples. Les rives qui convergent dans la cage de formage sont soudées intérieurement d'abord, extérieurement ensuite sur un châssis orientable pour le réglage de la fonte de soudure sont montées la lunette de commande (dispositif de guidage du tube) le support avec la traverse pour l'installation de soudage extérieur et le contrôle aux ultra-sons, et le dispositif de descente du tube.

Le tronçon du tube sortant se réduit à la longueur correspondante par le chariot mobile d'oxycoupage.

Le tube sectionné à longueur voulut, pendant son passage continu, est descendu sur l'installation de transport (grille) est évacuée latéralement hors de la machine

I.3.2 Les caractéristiques techniques :

Tableau I.1 : Caractéristiques techniques des bobines

| | |
|---|------------------------------|
| Largeur de bande Bande non range Bande rongée | 630 à 1830mm 600 à 1800mm |
| Poids de bobine | Max 30 MP=30 tonnes |
| Diamètre extérieur de bobine | 1200 à 2000 mm |
| Diamètre intérieur de bobine | 600 à 820 mm |
| Angle d'entrée de bobine | 18° à 45° |
| Epaisseur de paroi de tube | 8 à 16 m |
| Gamme de diamètre de paroi de tube | 16 à 64 pouces |
| Gamme de longueur de tube | 9 à 16m |
| Qualité de tube | Acier + fer |

Diagramme des diamètres des tubes et des épaisseurs des parois pour la soudure en spirale type R-SSP 1800 [6].

Tableau I.2 : Diamètres des tubes et des épaisseurs des parois pour la soudure en spirale

| Diamètre des tubes en pouces | Largeur Max Feuillard (mm) | Qualité et épaisseur max des Paroi (mm) | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--|-------|-------|-------|
| | | X52 | X56 | X60 | X70 |
| 16 | 800 | 9.52 | 8.74 | 7.52 | 7.52 |
| 24 | 1200 | 11.13 | 9.52 | 9.52 | 7.52 |
| 30 | 1500 | 12.70 | 11.13 | 11.13 | 9.52 |
| 36 | 1800 | 15.88 | 12.7 | 12.7 | 9.52 |
| 42 | 1800 | 15.88 | 12.7 | 12.7 | 12.7 |
| 48 | 1800 | 15.88 | 13.49 | 13.49 | 12.7 |
| 52 | 1800 | 15.88 | 15.88 | 15.88 | 13.49 |
| 60 | 1800 | 15.88 | 15.88 | 15.88 | 15.88 |
| 64 | 1800 | 15.88 | 15.88 | 15.88 | 15.88 |

I.3.3 Fonctionnement de la machine à souder en spirale :

Conformément à la largeur de la bande selon l'échelle graduée, la chaise support de la bobine se trouve dans la position requise transversalement à la direction du déroulement de la bobine (bande).

Le chariot récepteur de bobine est avancé, c'est-à-dire que le dispositif de serrage se trouve face à face La bobine se trouve dans la machine, la précédente bobine est épuisée, il y a lieu,

maintenant, de souder l'extrémité de la bande de la nouvelle bobine, sur l'extrémité (fin) de la précédente Planeuse avec guide bande.

Cisaille circulaire avec râcheuse.

Support de raclage avec outil de raclage des rives.

Brosse des rives et des surfaces.

Cylindre de l'intérieur, galet de préformage des rives et barre de guidage sont pré-réglés sur l'épaisseur respectivement, la largeur de la bande.

Cage de formage, tête de soudure extérieur avec dispositif de réglage, lunette de commande avec dispositif de réglage de la fente de soudure, dispositif de control aux ultra-sons, chevalet support du tube, chariot d'oxycoupage et dispositif de descente son pré-réglé sur le diamètre du tube, respectivement sur l'angle d'inclinaison.

Le châssis de la machine est réglé sur l'angle d'entrée de la bande.

L'arrêt automatique sur le pupitre de commande un est mise en point.

Les réservoirs à flux pour la soudure spirale et transversale sont remplis.

Le tambour de fil à souder pour soudure intérieur et extérieur, comme pour le rabotage des bandes, sont équipé de bobine de fin à souder.

Propane et oxygène pour dispositif de rabotage et chariot d'oxycoupage sont branchés, la veilleuse sur le chariot d'oxycoupage est allumée. L'air comprimé pour les dispositifs de soufflage entre le racleur et la brosse de surface et avant les cisailles circulaires sont branchés.

Il en est de même pour le raccordement de l'eau de refroidissement du tube sur le dispositif du control aux ultra-sons et l'eau de couplage pour refroidissement du support de soudure (soudure intérieur).



Figure I.4.A : Machine à soudée
Extérieurement



Figure I.4.B : Machine à soudée
Intérieurement

Figure I.4 : Tube préparé à la machine soudé en spirale

I.4 Les contrôles non destructifs :

I.4.1 Contrôle visuel :

Le but est de contrôler visuellement la qualité de soudure intérieure et extérieure par des agents professionnels. S'il existe un défaut le tube sera réparé avant de continuer la fabrication.



Figure I.5 : contrôle visuel par des agentes professionnelle

I.4.2 Examen ultra-sons :

La surveillance interne de la qualité de la soudure spirale a lieu immédiatement après le soudage à l'aide d'installation automatique. Ils existent deux examens aux ultra-sons, l'un est fait pour le contrôle de la soudure, l'autre est fait pour le contrôle et la détection des dédoubleurs.

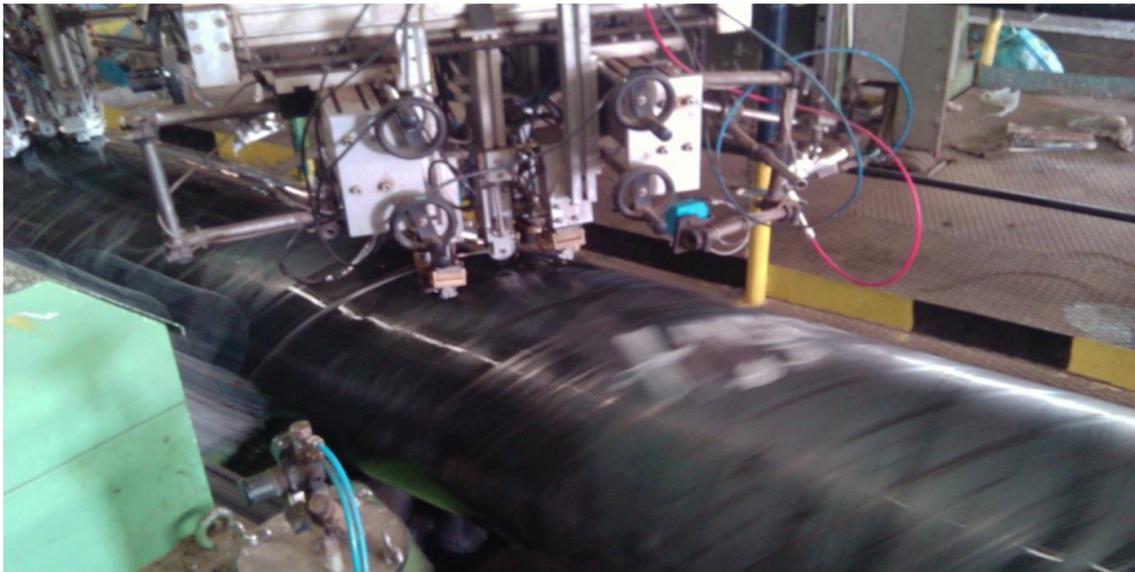


Figure I.6 : Tube à l'examen ultra-sons

I.4.3 Radioscopie :

Ce contrôle est basé sur l'absorption différentielle du rayonnement X ou gamma. Les différences de rayonnement émergent de la pièce engendrent sur le film une « image latente » qui sera ensuite révélée par voie chimique [7]

C'est une installation composée d'un tube de rayon porté par une barre de fer et qui entre dans le tube pendant que celui-ci tourne hélicoïdalement, cela permet la transmission de l'image sur l'écran. A l'aide de cette installation radioscopie, le contrôleur détecte les défauts signalés auparavant et même cause non signalées en marquant exactement sur l'endroit du défaut et décide si le tube peut être dirigé vers la réception finale ou bien il doit être renvoyé à la réparation d'une soudure non admissible ou au tronçonneur pour la coupe, le cas de débouleur irréparable



Figure I.7 : Contrôle de la soudure par radioscopie

I.4.4 Contrôle radiographique :

Il existe une même installation à rayon X mais radiographique c'est-à-dire la transmission de l'image sur film qui est après développé et étudié par un contrôleur spécialisé en contrôle radiographique pour voir si le tube n'a subi aucun défaut ni capteur au niveau de la soudure. Si le tube est bon on passe à l'étape suivant. Si non à la réparation pour régler le défaut.



Figure I.8 : Contrôle de la soudure par radiographie

I.4.5 L'épreuve hydrostatique :

Chaque tube est soumis à une épreuve hydraulique le tube est bloqué entre deux tête remplis d'eau et soumis à l'aide de pompe haute pression à la pression prescrite, qui correspond à une sollicitation qui voisine la limite élastique. Elle est maintenue pendant un temps fixé.



Figure I.9 : L'épreuve hydrostatique

I.5 Les contrôles destructifs :

Les essais de traction, de pliage, de dureté, et de résilience sont effectués sur des éprouvettes prélevées sur la bobine et sur le tube. Ces essais sont effectués selon la norme API 5L. Les essais chimiques pour déterminer les taux d'alliage en carbone, soufre, phosphore, silicium, manganèse, niobium, vanadium, titane, etc. Les contrôles destructifs sont effectués au niveau du laboratoire essais mécaniques et chimiques.

I.5.1 Les revêtements

Le tube est protégé par deux (02) revêtements (intérieur et extérieur).

I.5.2 Revêtement externe

Ses étapes de l'enrobage externe sont les suivantes :

Grenailage par jet de grains d'eau.

Projection d'une couche peinture avec pistolet.

Enroulement de l'adhésif.

Enroulement des P.E



Figure I.10 : Revêtement extérieur

I.5.3 Revêtement intérieur :

Les étapes de l'enrobage intérieur sont les suivants [8] :

Le rinçage des tubes présentant des parties graisseuses et huileuses avec un jet d'eau chaude à haute pression.

Séchage des tubes rincés ou humides par un bruleur à gaz.

Grenailage par jet d'acier pour enlever la calamine et l'oxyde et l'oxyde de fer.

Enrobage des tubes par projection de peinture avec pompe RS, ceci pour faciliter l'écoulement surtout quand ils sont utilisés pour le transport du gaz et des fluides et les préserver contre la corrosion.



Figure I.11 : Revêtement intérieur

I.6 Parc de stockage :

Transport par camion SNTR jusqu'à la zone du projet.



Figure I.12 : Transport des tubes par camion SNTR

I.7 Conclusion

Pendant 40 jours de stage que j'ai exécuté dans la société Alfa Pipe à Ghardaïa, j'ai l'occasion pour développer ma connaissance théorique et d'avoir des idées assez concrètes de l'environnement industriel électrique.

A titre de conclusion, il semble intéressant de mettre en évidence les questions actuelles qui se posent sur l'avenir de l'industrie de métal, de savoir comment les acteurs économiques vont faire développer le contrôle et la maintenance. Au centre de cette question se trouve naturellement le problème de qualité des équipements. En effet, mon stage a été très bénéfique à cet égard : pour lesquels je me suis interrogé moi-même sur leur fonctionnement pour comprendre les différents types d'entraînement. Il en résultera une grande dépendance entre la théorie et la pratique.

Chapitre II :

Les aciers

Chapitre II : les aciers

II.1. Généralités Sur Les Pipelines Et Les Aciers

II.1.1. Introduction :

L'acier de par ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux, d'où son utilisation dans divers domaines comme dans le transport par canalisation des hydrocarbures (pétrole et gaz naturel). Il est utilisé pour la fabrication des pipelines (gazoducs et oléoducs) pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de grandes distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation. A nos jours il existe plus d'un million de Km de réseau de pipelines en exploitation dans le monde. Le réseau en Algérie est évalué à plus de 16.000 Km pour des diamètres allant de 8 à 48 pouces. Pour leur efficacité ces canalisations doivent répondre à des impératifs de rentabilité et de sécurité. Plus de 95% des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers micro alliés à haute résistance. Ils sont obtenus par des schémas métallurgiques de plus en plus performants en augmentant la vitesse de refroidissement après laminage contrôlé, comme les tôles TMCP (Thermo Mechanical Controlled Process) obtenues par laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré.

Les canalisations enterrées dans le sol sont soumises à des contraintes importantes et un environnement corrosif. Pour cela le développement de nouveaux aciers HSLA (HLE) a été orienté vers une modification des propriétés mécaniques afin d'éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes. On est arrivé à obtenir un compromis entre une haute limite d'élasticité pour supporter les grandes pressions et une bonne ténacité afin de résister à la propagation de fissures grâce au développement des tôles TMCP. Les aciers sont passés du grade X52 au grade X70 employés de nos jours avec des microstructures ferritoperlitique. Le passage à des grades supérieurs X80, X100 passe par le développement d'aciers de structures ferritobainitiques.

Nous présenterons dans ce deuxième chapitre, le matériau d'étude, les compositions chimiques, les structures et les propriétés mécaniques, enfin, nous terminerons [9]



Figure II.1 : Pipeline dans l'environnement [6]

II.2 Les aciers :

II.2.1 Définition :

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferroalliages par exemple. [10]

Cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé, d'où son utilisation dans divers domaines comme dans le transport par canalisations des hydrocarbures (pétrole et gaz Naturel).

Il est utilisé pour la fabrication des pipelines (gazoducs et oléoducs) pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de grandes distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation. A nos jours il existe plus d'un million de Km de réseau de pipelines en exploitation dans le monde.

Le réseau en Algérie est évalué à plus de 19599 Km pour des diamètres allant de 8 à 48 pouces (203.2 à 1219.2 mm). Pour leur efficacité ces canalisations doivent répondre à des impératifs de rentabilité et de sécurité. Plus de 95% des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers Micro alliés à haute résistance [11].

Les aciers des tubes peuvent être divisés en deux groupes :

- ✚ 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.[12]

II.2.2 fabrication d'acier :

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [13]

II.2.3 Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers :

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier inox austénitique est typiquement un peu supérieure à 8, en raison de la structure cristalline.

Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis. Le traitement thermo mécanique est l'association :

- d'un traitement thermique, sous la forme d'un cycle chauffage-refroidissement (trempe, revenu...).
- d'un traitement mécanique, une déformation provoquant de l'écaillage (laminage, forgeage, tréfilage...).

Les aciers de transport des hydrocarbures sont des aciers faiblement alliés qui doivent présenter des propriétés à l'amorçage de rupture d'une part et vis-à-vis de la propagation de l'arrêt des fissures lors de rupture fragile par clivage. D'autre part, Ils présentent également une limite d'élasticité élevée due à la recherche d'une rentabilité accrue et une bonne soudabilité. Par conséquent concilier une haute limite d'élasticité et une bonne ténacité est exigé pour la fiabilité des aciers. [8]

Le Tableau II.1 rassemble les propriétés mécaniques requises pour les pipelines en acier, d'après l'American Petroleum Institute (API)

Tableau II.1 : Les pipelines en acier de grade API [14]

| Grade | Limite d'élasticité(Mpa) | Rm (MPa) | Allongement (%) |
|----------|---------------------------|----------|-----------------|
| API-X65 | 448 | 530 | 24 |
| API-X70 | 483 | 566 | 23 |
| API-X80 | 551 | 620 | 22 |
| API-X100 | 690 | 770 | 25 |

II.2.4 Classification d'acier :

Plusieurs classifications des aciers se font sur la base de la composition chimique, le procédé D'élaboration et le mode d'emploi. On s'intéresse à quelques classifications :

a) Classification selon leur composition chimique :

Le tableau II.2 présente la composition chimique typique des aciers pour tubes communément utilisés

Tableau II.2 : composition chimique des aciers de pipelines, norme API [15] .

| GRADE | C | Mn | Nb | V | Ceq Max |
|-------|-------------|---------------|-------------|-------------|---------|
| B | 0.06 à 1.2 | 0.7 à 1 | - | - | 0,320 |
| X52 | 0.06 à 1.2 | 1 à 1.400 | 0.03 à 0.05 | - | 0.400 |
| X65 | 0.06 à 1.0 | 1.300 à 1.600 | 0.04 à 0.07 | 0.03 à 0.07 | 0.420 |
| X70 | 0.06 à 1.20 | 1.450 à 1.650 | 0.04 à 0.07 | 0.04 à 0.07 | 0.420 |

b) Classification par le mode d'emploi :

On distingue les types suivants :

Les aciers de construction : Ils sont utilisés pour la construction,

Les aciers à propriétés physiques et chimiques spéciales : ils contiennent les aciers Inoxydables, les aciers à propriétés magnétiques spéciales, les aciers à propriétés de Dilatation, etc...

Les aciers à outils : ils sont utilisés dans la fabrication d'instruments (permettant de Façonner les matériaux). Les nuances d'aciers à outils sont rangées selon le mode de travail de l'outil, en quatre classes comme le montre le Tableau II.3

Tableau II.3: Composition variable suivant l'emploi

| Elément allié | Ratio | Observation |
|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Carbone | 0.2÷0.7 | |
| Silicium | 0.1÷0.7 2÷4 (acier spéciaux) | Ressorts tôlés de transf |
| Magnésium | 0.3÷0.8 12÷14 (acier très durs) | Viosferrees |
| S, P, Cu, Ni, Cr, V, M, Molybdène | <0.1 | |

II.2.5 Influence spécifique des éléments d'addition:

Chaque élément d'addition a un effet spécifique que l'on résume ci-dessous :

- **La faible teneur en carbone** et en éléments d'alliage permet de garantir la bonne soudabilité de l'acier.
- **Les éléments d'alliage gamma gènes (Mn, Ni, Cu) :** abaissent la température de Transition $\gamma \rightarrow \alpha$ de l'acier, favorisant ainsi la germinative des grains fins de ferrite.
- **Molybdène (Mo) :** élément noble, il accroît la résistance à chaud ou diminue la fragilité des aciers.
- **Chrome (Cr) :** élément trempant, il augmente la résistance à la rupture. et augmente La Résistance à la corrosion.
- **Le silicium** agit principalement par effet de solution solide, il a également un rôle De désoxydant.
- **Soufre(S) et Phosphore (P) :** Impuretés très nocives aux joints soudés, ils augmentent la fragilité des Aciers et les risques de soufflures ou de criques.

- **Le vanadium et le titane** : précipitent à plus basse température, participent au durcissement final de la ferrite.

Chacun de ces éléments a un rôle vis-à-vis du durcissement par solution solide ou par précipitation.

II.2.6 Microstructure de l'acier API5L X70 :

Les aciers de type X60, X65, X70 présentent une microstructure de type ferrite-perlitique, les bandes de perlite marquées dans les aciers de type X60, X65, X70 expliquent la sensibilité de ces aciers à la fissuration. Cette microstructure en bandes favorise la propagation des fissures

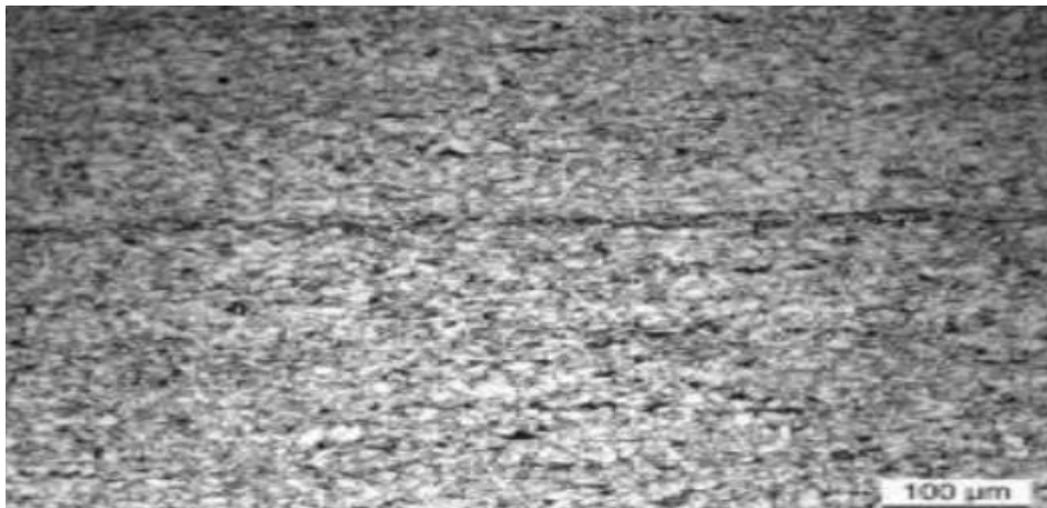


Figure II.2 : Micro structure ferrite-perlitique de l'acier API 5L X70[16]

II.3 Les aciers à haute limite d'élasticité :

II.3.1 Introduction :

Le laminage à chaud est une technique puissante de mise en forme dont les applications sont très variées. Une grande majorité des matériaux métalliques est soumise à un formage par laminage au cours de son cycle de fabrication. Bien que le mot laminage évoque plus spécifiquement les produits plats, de nombreux autres procédés de laminage sont utilisés pour obtenir d'autres géométries (fils, ronds, barres, tubes, rails, etc.). [18]

Le laminage à chaud a donc une position importante parmi les diverses techniques de mise en forme et ne cède le pas que pour des applications particulières qui révèlent d'autres techniques telles que le forgeage, le filage.....etc.

II.3.2 Influence de la composition chimique :

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont des aciers micro alliés au niobium, au vanadium, et au titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium, et le Molybdène. Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersives relativement aux éléments formant des phases d'insertion stable (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont : la ferrite, la perlite, et les phases secondaires qui des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersives.

Les HLE sont généralement laminés à chaud et s'emploient à l'état brut de laminage ou à l'état amélioré pour les constructions soudées et les pipelines. Selon la norme américaine API ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70,....

II.3.2.1 Le manganèse :

En raison de ces propriétés, le manganèse se trouve, en plus au moins grande quantité, dans presque tous les aciers, il joue un rôle déterminant lors de l'élaboration de l'acier. Il participe à la désoxydation, réagit avec le soufre (donc désulfurant), évitant ainsi la fissuration à chaud, pendant la fusion de l'acier, il absorbe les gaz, détruit les oxydes se trouvent dans le bain en fusion en forte dose et contribue ainsi à la formation d'un métal dense et sans soufflures et régissant l'état inclusion aère du métal. Il intervient sous multiples formes :

- ✚ Il abaisse la teneur en carbone à l'eutectodie.
- ✚ Il durcit la ferrite en solution solide et modifie la solubilité du carbone et de l'azote dans cette phase.
- ✚ Il empêche la formation des carbures inter granulaires fragilisant.
- ✚ Il élargit le domaine de métastabilité de l'austénite et retarde donc le début de la transformation en conditions isothermes aussi bien dans le domaine ferrique que dans le domaine baintique

C'est un élément efficace pour la trempabilité, surtout si on veut éviter un grossissement du grain ou un accroissement du taux d'austénite résiduelle.

- ✚ Il a un effet favorable sur la résistance à la rupture.

- ✚ Il diminue la susceptibilité au vieillissement après écrouissage car il abaisse les températures auxquelles se produit la transformation.

Dans le cas des aciers à haute limite d'élasticité (acier au Nb, V), sa teneur est de l'ordre de 1.5%, il à fixer le soufre sous forme de Mn S insoluble dès la solidification.

II.3.2.2 Le silicium :

Il se rencontre à faible teneur dans les aciers, il est alors utilisé comme désoxydant. A plus forte teneur, il augmente la résistance à l'oxydation et confère certaines propriétés particulières (perméabilité meilleure). Il durcit l'acier, mais l'empêche de souder. Les aciers contenant le Si et le Mn sont appelés manganosiliceux, ils ont la faculté de présenter après traitement thermique un taux élevé d'allongement élastique.

Leur résilience est bien meilleure que celle des aciers au carbone, ils supportent une trempe énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet durcissant du silicium en solution solide est aussi fort que celui du manganèse, de plus le silicium augmente la trempabilité que l'on doit contrôler pour améliorer la soudabilité (la teneur limite dans le cas des aciers à dispersives au Nb-V est de l'ordre de 0.3%).

II.3.2.3 molybdène :

C'est un élément alpha gène qui tend à former des carbures et qui augmente largement la capacité de trempe des aciers. Il repousse vers la droite le domaine perlitique en affectant peu la position du domaine bainitique, le molybdène est donc particulièrement favorable à l'obtention des structures bainitique. A teneur équivalente, sa contribution est supérieure à celle du chrome.

II.3.3 Influence des éléments formants des précipités :

II.3.3.1 L'aluminium :

C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitrure d'aluminium, qui inhibe le grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement (effet durcissant).

II.3.3.2 Le vanadium :

En faible proportion, cet élément augmente la dureté des aciers sans diminuer leur allongement ni leur résilience, c'est un désoxydant énergétique qui améliore la qualité de l'acier. Une teneur en vanadium de 0.5 à 0.7% suffit pour transformer les propriétés d'un acier. La résistance à la traction et à la fatigue est sensiblement augmentée et l'acier est moins sujet aux tapures de trempe. Cet élément élève la température, pour éviter des plages douces après traitement. Les carbonitrides du vanadium sont mis en solution à une température proche de 1000°C et ne peuvent donc pas empêcher le grossissement du grain austénitique. Leur précipitation a lieu en partie dans l'austénite et en partie en ferrite.

II.3.3.3 Le niobium :

Ce métal résiste à la plupart des aciers, il est ajouté sous forme d'alliages ferreux appelés Ferro-niobium, plus faciles à introduire à la fusion. Il a été révélé qu'en ajoutant dans des aciers à bas taux de carbone une faible proportion (0.1%) de niobium, on élève avantageusement la limite d'élasticité, cette amélioration est due au fait que le métal présente un grain plus fin que l'acier de carbone de même nuance, et que ce résultat a été obtenu, dans des produits laminés beaucoup plus économiquement avec le niobium que toute autre méthode. La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Sont livrés sous forme de tôles, barres et peuvent être améliorés davantage par traitement thermique et ils présentent une bonne soudabilité.

Il est utilisé pour :

- ✚ Freiner la recristallisation de l'austénite en solution solide.
- ✚ Former des précipités lors de la transformation austénite-ferrite.

Cette précipitation a un effet durcissant mais également fragilisant. La présence des carbonitrides (carbures) du niobium non dissout freinent le grossissement du grain austénitique avant écrouissage

II.3.3.4 Le titane :

Il forme des carbonitrides (carbures), il permet de fixer l'azote. Il se combine avec le soufre en donnant naissance des sulfures non déformés. L'emploi de cet élément demande des précautions car il a tendance à former gros précipités de nitrures qui ne se dissolvent pas, d'où la difficulté d'éviter la fragilisation. Il a un effet durcissant à l'état brut de laminage ; il freine

la recristallisation dans l'austénite ou dans la ferrite ; il sert à affiner les grains lors d'une normalisation.

II.3.3.5 Influence de la perlite :

La présence du carbone confère aux aciers leurs propriétés. Le carbone n'a pas besoin d'être ajouté comme addition, mais il doit être réglé à la valeur désirée. Le carbone en solution a un effet durcissant important :

- ✚ La quantité de perlite est proportionnelles à la teneur en carbone et dépend des éléments d'alliage en solution solide ; elle augmente fortement la résistance de l'acier, mais son effet est bien moindre sur la limite d'élasticité, environ deux à trois fois moins.
- ✚ Le rôle du carbone sur la résistance à la rupture fragile est très important car les lamelles de cémentite servent à la fois de défauts d'amorçage et pour la propagation des clivages

II.4 Mécanismes de durcissements des aciers HLE :

Afin de satisfaire à toutes les exigences liées aux multiples applications de l'acier, celui-ci doit présenter un grand nombre de caractéristiques alliées à un bas prix de revient. L'emploi d'aciers de construction ayant des caractéristiques améliorées constitue le seul moyen pour alléger les constructions, de même le rendement des machines dépend dans une large mesure de la résistance de leur éléments les fortement sollicités. [18]

Des améliorations peuvent être apportées aux caractéristiques des différentes façons suivantes :

- ✚ Par solution solide.
- ✚ Par précipitation.
- ✚ Par dispersion.
- ✚ Par affinement de grain.
- ✚ Par écrouissage.
- ✚ Par traitement thermique

II.4.1 Solution solide :

Quand ils ne réagissent pas avec le métal de base, les atomes d'éléments d'alliage peuvent soit occuper des sites naturels dans le réseau de la matrice (en formant des solutions solides de

substitution), soit s'insérer entre ces sites(en formant une solution solide d'insertion). La distorsion du réseau qui en résulte le rend plus dur.

Le durcissement peut aussi être dû du fait que ces atomes de soluté se logent de préférence au voisinage de défauts réticulaires (lacunes et dislocations), dont le mouvement est ainsi ralenti. Il semble une solution solide d'insertion provoque un durcissement plus important qu'une solution solide des substitutions, car elle entraîne des distorsions du réseau plus importantes

II.4.2 Précipitation :

Il a durcissement par précipitation lorsque les éléments d'alliages réagissent avec le carbone ou l'azote. Les précipités formés s'apposent aux mouvements des dislocations ou tout au moins ralentit ces mouvements. Ces composés peuvent précipiter de façon cohérente (auquel cas les distorsions du réseau sont importantes et effectuent fortement la résistance et la fragilité) ou de façon non cohérente (auquel cas l'effet est plus faible, en raison de la relaxation des contraintes

II.4.3 Dispersion :

Lorsque les précipités sont très (de 50 à 500Å)et bien dispersés dans la matrice, ils peuvent provoquer une très importante consolidation. Ce type de précipitation a été appelé dispersion. Ce terme issu de la morphologie des particules a été étendu à des structures qui ne résultent pas d'une réaction de précipitation.

II.4.4 Affinement du grain :

Certains éléments (carbures et nitrures) empêchent tout grossissement des grains pendant le chauffage. Il en résulte une structure à grain fin offrant beaucoup plus d'obstacles au mouvement des dislocations, puisque l'énergie nécessaire pour franchir un joint de grain est plus grande que celle nécessaire pour franchir une particule précipitée. Il faut mentionner ici que l'affinement du grain est le seul mécanisme ayant une influence favorable sur toutes les caractéristiques : limite d'élasticité, résilience...).

II.4.5 Traitements thermiques :

Des améliorations notables peuvent être apportées aux caractéristiques de l'acier par un traitement thermique. Conformément au diagramme TTT, on peut obtenir des structures et des grosseurs de grains différentes en faisant varier la vitesse de refroidissement. Les effets de la trempe peuvent être atténués par une restauration, tandis qu'un recuit atténue les effets d'une

déformation grâce à une recristallisation ou à une restauration et à la précipitation de phases dispersées. Les aciers alliés au chrome, molybdène, nickel...présentent une forte trempabilité et donc une grande aptitude aux traitements thermiques

II.5 propriété mécanique :

Tableau II.4. : Caractéristiques mécaniques de l'X70 selon l'API 5L

| Caractéristique API 5L | EPAISSEUR (mm) | Re (MPA) | RM (MPA) | A% | Re/RM |
|---------------------------|-------------------|-------------|-------------|------|-------|
| X70 | 5_25 | 485_605 | 570_605 | >=18 | 0.90 |

Avec :

- ✚ **Re** : la limite d'élasticité.
- ✚ **Rm** : la résistance à la traction.
- ✚ **A%**: le pourcentage d'allongement après rupture.

II.5.1 Avantage des aciers HLE :

Ils combinent soudabilité améliorée due au très faible niveau de carbone et bonne formabilité, leurs caractéristiques mécaniques facilitent le formage sur presses et sur lignes automatisées. Ils se caractérisent de plus par une bonne tenue à la fatigue et à la résistance au choc. Grâce à leur limite élastique élevée (Re), ils sont particulièrement adaptés lorsqu'une réduction de poids est recherchée, c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction

II.5.2 Bobinage :

En sidérurgie, le coil (mot anglais) est une bobine de tôle issue du laminage à chaud. On désigne occasionnellement ainsi les tôles laminées à froid, mais le terme « bobine » est plus fréquent.

Issu du laminage à chaud, il s'agit donc d'un demi-produit pour la sidérurgie, lui-même issu des brames.

Les colis ont un poids moyen de 12 tonnes, mais peuvent dépasser les 25 tonnes avec, généralement, une largeur de 1 250 à 2 000 mm. L'épaisseur de la tôle bobinée va de 2 à 6 mm. L'intérêt de grosses bobines pour l'industrie de la transformation est lié à la manutention et aux temps de mise en place et de réglage. Pareillement, le sidérurgiste essaie généralement de laminier le plus fin possible pour améliorer la ajoutée de son produit et, si possible, éviter l'étape du suivante du laminage à froid

Généralement, les colis à chaud sont laminés à froid pour obtenir l'épaisseur finale requise. Ce laminage est précédé d'une étape de décapage, pour enlever la couche de calamine qui s'est déposée sur la tôle pendant le laminage à chaud. Les coils sont aussi transformés sur des installations de parachèvement du sidérurgiste, ou chez de gros transformateurs très proches de la sidérurgie, et destinés soit :

- ✚ Au découpage en feuilles
- ✚ Au refend âge (cisaillage dans le sens de la longueur et reformation de bobines de faible largeur, les feuillards)
- ✚ À la fabrication de profilés reconstitués soudés (poutrelles, cornières, tés, tubes etc.)
- ✚ À l'emboutissage (jante d'automobile, bouteilles de gaz, etc.)



Figure II.3 : Bobine

II.6 Conclusion :

L'acier est un alliage de fer et de carbone comportant 0,1 % à 2 % de carbone.

, l'acier peut être allié à de nombreux éléments modifiant ainsi sensiblement ses propriétés (les aciers alliés au chrome sont par exemple inoxydables).

De plus, les aciers sont susceptibles de recevoir des traitements thermiques (trempe, revenu, etc.) ou thermochimiques (cémentation, nitruration, etc.) qui modifieront ses propriétés intrinsèques.

D'une part son coût de revient faible, les diversités de ses nuances et ses propriétés mécaniques, l'acier est le métal le plus utilisé en construction mécanique. Ses applications trop nombreuses sont présentes dans quasiment tous les secteurs de l'industrie.

Chapitre III:

Le soudage et ses procédés

Chapitre III : le soudage et ses procédés

III.1 Généralités sur le soudage :

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle, le soudage compte parmi les modes d'assemblage les plus répandus dans l'industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique, pour fabriquer des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyauteries, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.[19]

III.2 Définition de soudage :

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. [20]

III.3 Classification de procédés de soudages :

On peut classer les procédés de soudages selon différents tel que:

- ✚ Le mode de transfert d'énergie utilisée
- ✚ Sans ou avec un métal d'apport
- ✚ La manuelle ou l'automatique
- ✚ La nature de matériaux
- ✚ La destination des éléments soudés (17)

La nature de l'énergie de chauffage est un moyen commode pour classer les procédés de soudage afin de faciliter leur mémorisation (Figure III.1).



Figure III.1: Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie utilisée [21]

III.4 Les différents types de soudage :

Tableau III.1 : Des différents types de soudage

| Soudage avec fusion local des pièces a assemblé | Soudage avec fusion local des pièces a assemblé |
|--|---|
| Le soudage a gaz Le soudage a plasma Le soudage a l'arc Le soudage par faisceau d'électrons Le soudage par faisceaux laser Le soudage par résistance Le soudage par aluminothermique | Soudage par diffusion Soudage par friction Soudage par ultra son Soudage par explosion |

III.5 Types des assemblages soudés :

La création d'une liaison métallique implique le rapprochement des surfaces à unir, ce qui permette de loger le métal d'apport entre eux et le soudage en pleine pénétration.

Il existe quatre principaux types d'assemblages différents, chacun ayant ses particularités qui répondent à différents besoins bien précis. [22]

III.5.1 Assemblage bout-à-bout :

La soudure bout-à-bout (Figure III.2) est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle.

Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfrein âge) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égales à 5 mm.

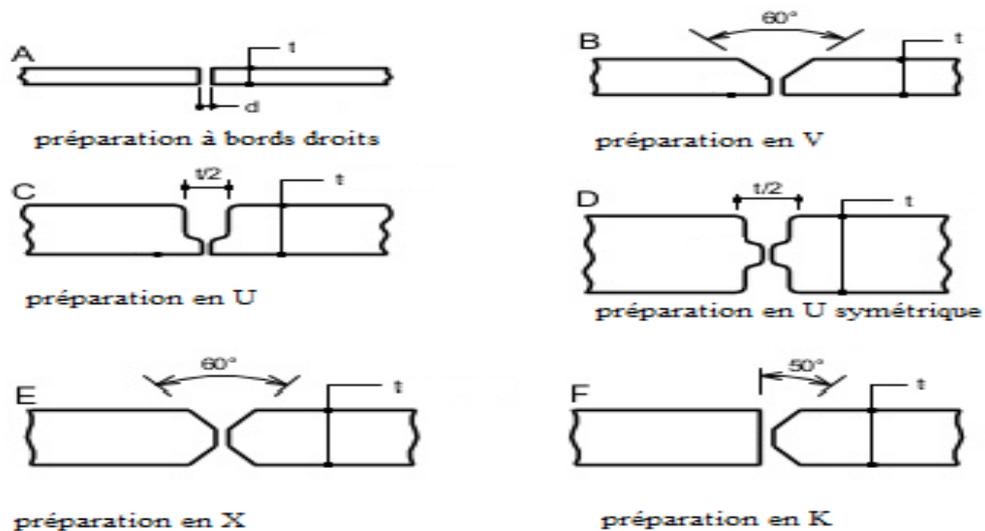


Figure III.2: Préparation des bords en assemblage bout-à-bout [23]

III.5.2 Assemblage en coin ou en angles :

Comme son nom l'indique, il est utilisé pour connecter deux pièces ensemble à un certain angle et le jeu entre eux doit être approprié pour éviter l'effondrement du bain de fusion.

Lorsque les deux pièces se croisent à un angle de 90° faisant en sorte que les bords se réunissent au centre d'une composante ou d'une plaque on parle d'un assemblage en T (Figure III.3).

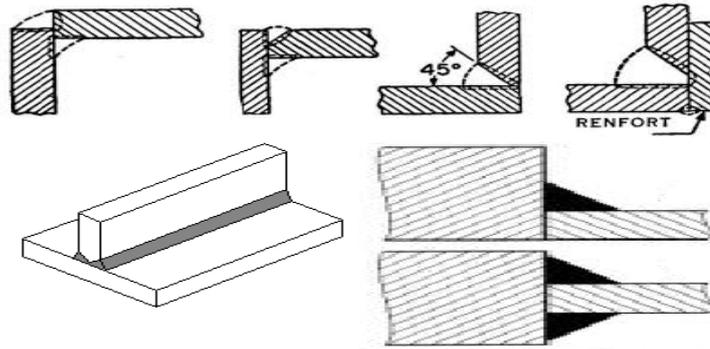


Figure III.3: Assemblages en angles

III.5.3 Assemblage à bords relevés :

Un type soudure à rainure, est fait de deux pièces placées côte à côte et soudés sur le même côté. Il s'agit du type de joint qui doit être remplacé le plus fréquemment en raison des résidus qui s'accumulent sur ses rebords. Il est souvent appliqué aux pièces de tôlerie qui ont des rebords incurvés ou formés de façon à ce qu'une soudure doive être faite pour réunir deux pièces adjacentes (Figure III.4).

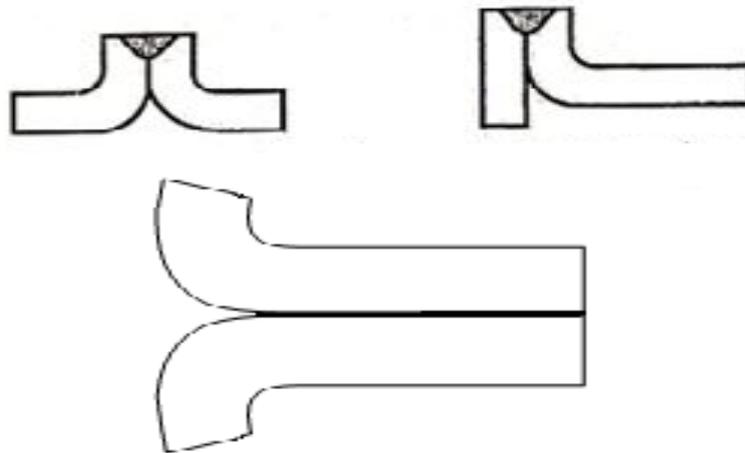


Figure III.4 : Assemblage à bords relevés

III.5.4 Assemblage par recouvrement :

Il se forme lorsque deux pièces sont placées une au-dessus de l'autre sur une certaine distance le long du bord (Figure III.5). Le soudage peut être fait sur une ou deux faces, en fonction du symbole de soudure ou des exigences du plan. C'est la méthode la plus utilisée pour joindre des pièces d'épaisseur différente.

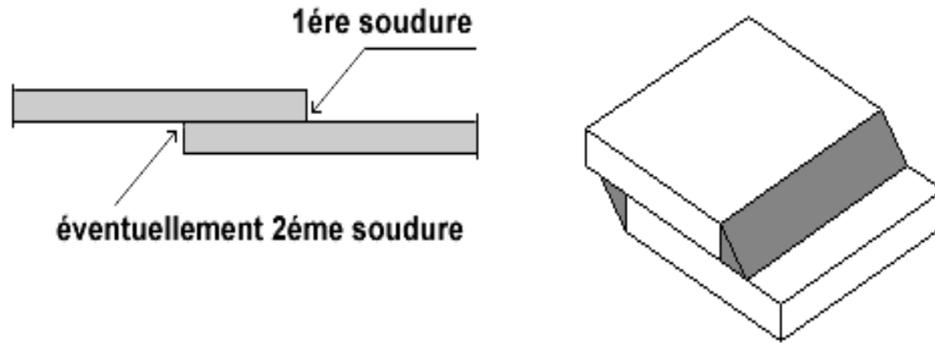
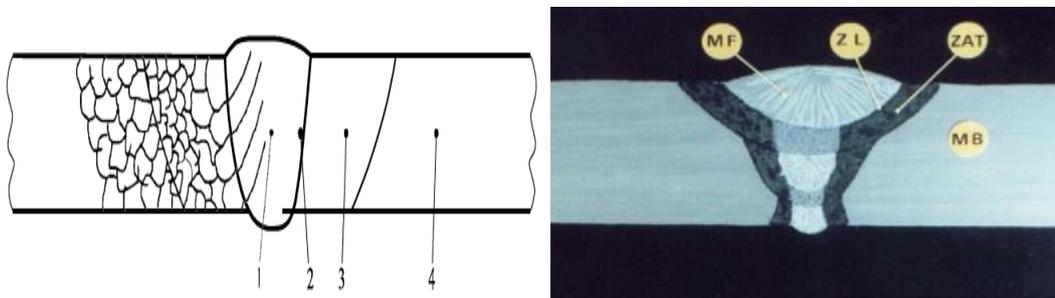


Figure III.5: Assemblage à recouvrement

III.6 Différentes zones du joint soudé :

Sur la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé, on distingue les zones suivantes :

1. zone fondue «ZF»
2. zone de liaison «ZL»
3. zone affectée thermiquement «ZAT»
4. métal de base «MB»



Figures III.6 : Différentes zones d'un joint soudé

III.6.1 Zone fondue :

C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y ait eu ou non apport de métal.

III.6.2 Zone de liaison :

C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu

III.6.3 Zone affectée thermiquement :

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physicochimiques (natures et proportions des constituants). Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage. Et constitue le domaine le plus délicat.

III.6.4 Métal de base :

Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physicochimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations.

Cette zone commence à l'isotherme A1 pour le soudage d'une tôle d'acier normalisé.

III.7 Aspects métallurgiques de la zone soudée :

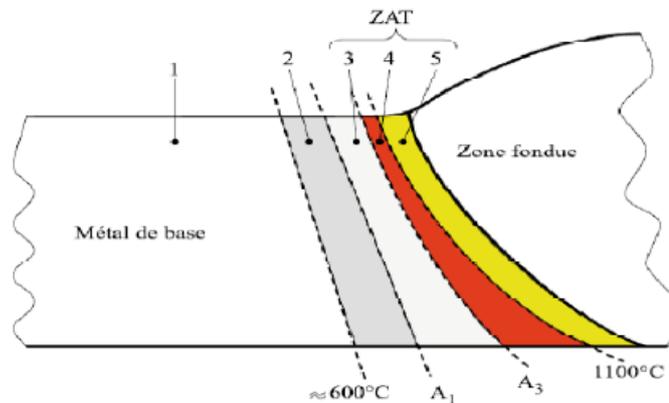


Figure III.7 : Modification structurale de la ZAT

Partie 1 :

Aucune modification décelable sur la constitution et la microstructure.

Partie 2 :

La température proche de A1 permet de déceler des modifications selon l'état initial du métal de base : précipitations, revenu, globulisation.

Partie 3 :

La température est comprise entre A1 et A3. Les modifications sont importantes, l'austénitisation partielle peut conduire à un affinement de la structure au refroidissement.

Partie 4 :

La température est comprise entre A3 et 1100°C environ. Après refroidissement on obtient des structures normalisées.

Partie 5

La température est comprise entre 1100°C et 1500°C environ. Le grossissement du grain austénitique est tel que la trempabilité est considérablement augmentée et les structures obtenues après refroidissement varient de structures aciculaires très grossières à des structures de trempe pour les vitesses les plus élevées. La majorité des problèmes métallurgiques du soudage sont relatifs à la constitution de la zone sous cordon dans laquelle a lieu un véritable traitement thermique dans des conditions d'austénitisation particulières, à une température supérieure à 1200°C pendant un temps très court[23].

III.8 Cycle thermique de soudage :

Il est divisé en deux périodes :

- a) Chauffage
- b) Refroidissement

a) Période de chauffage :

Elle est caractérisée par la vitesse de chauffage (V_c) et par la température maximale atteinte (θ_m).

L'importance de la zone affectée par la température est fonction pour un matériau et une pièce donnée de l'énergie de soudage et de la température initiale (T_0) des pièces les phénomènes suivants apparaissent :

- Austénitisation ;
- Recristallisation ;
- Grossissement du grain ;
- Dissolution des carbures.

b) Période de refroidissement :

Elle est caractérisée par la vitesse de refroidissement V_r ou le temps de refroidissement entre 850°C et 550°C ($t_{r 850 / 550}$).

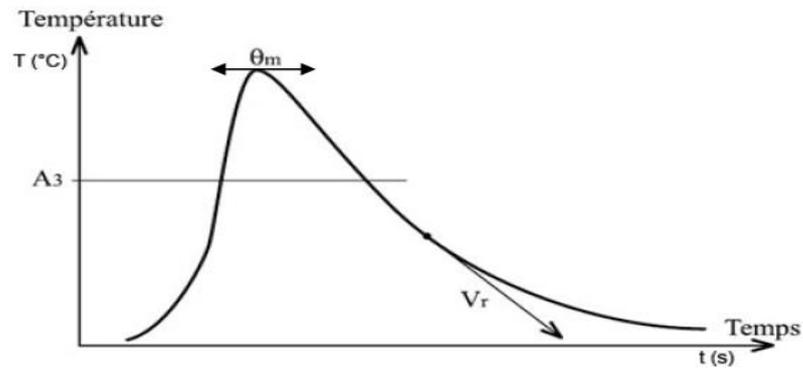


Figure III.8 : Cycle thermique de soudage

III.9 Principaux procédés de soudage :

Les procédés de soudage présentés dans ce chapitre sont des procédés de soudage à l'arc manuels, et automatiques. Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité, le choix d'un gaz protecteur, la vitesse de dévidage du fil-électrode, l'élaboration de la séquence de soudage et enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.)[23].

III.9.1 Soudage à l'arc submergé (SAW) :

Le soudage électrique à l'arc submergé (submerged arc welding), plus communément appelé soudage sous flux en poudre est un procédé de soudage automatique découvert aux USA en 1935 par KENNEDY

III.9.1.1 Définition du procédé :

Le soudage électrique à l'arc sous flux solide électro-conducteur est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de métal (de $\varnothing 1,2$ à $\varnothing 6$ mm) dévidé à une vitesse constante et la pièce à souder. Un dépôt continu de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder. L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une

partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.

III.9.1.2 Principe du procédé :

Le procédé de soudage est essentiellement utilisé en installation automatique sur banc ou potence de soudage. Il est principalement utilisé pour le soudage à plat. La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la tête de soudage. La tête de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie généralement positive du générateur de soudage à courant continu. Le courant peut être alternatif dans certains cas. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une trémie assure l'alimentation gravitaire en poudre qui est branchée par une dérivation sur la tête de soudage. L'arc jaillit lorsque l'opérateur actionne le bouton électrique du coffret de commande et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder. Le flux en poudre non fondu est récupéré à l'aide d'un aspirateur et le flux est recyclé après tamisage.

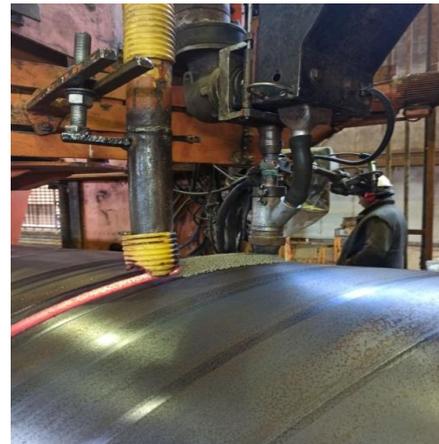
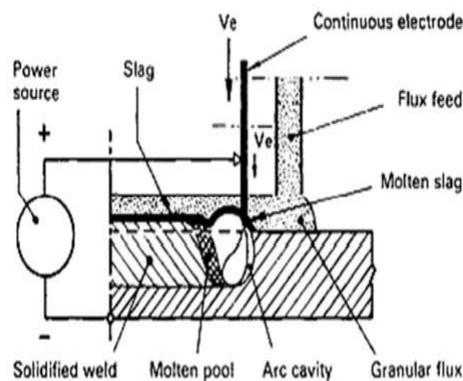


Figure III.9 : Soudage à l'arc submergé (SAW)

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues. Le procédé est représenté sur la (Figure III.9)et qui comporte :

- une tête de soudage regroupant la torche proprement dite, l'entraîneur de fil, le
- dévidoir recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;

- un coffret d'automatisme et des accessoires.

L'opération de soudage comprend les différentes phases :

- mise en place des pièces et maintien de celles-ci dans leur position relative ;
- mise en position de la tête sur le point de départ de la soudure, l'électrode émergeant du tube contact.
- appui sur le bouton de commande, ce qui déclenche le cycle proprement dit, à savoir
- ouverture de la trappe de la trémie de flux, lequel se répand dans la zone d'arc,
- mise sous tension du générateur en apparition de la tension à vide,
- avance du fil par mise et marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contact
- électrode-pièce et la fusion ainsi que le dépôt de métal s'installent instantanément ;
- commande du déplacement relatif tête-pièce pour former le cordon de soudure.

Le flux en poudre et le fil continuent à être alimenté d'une façon régulière et l'arc s'établit sous la poudre, dans les vapeurs et sous le laitier liquide qu'il y crée, qui constituent ainsi la protection du métal en fusion. Le comportement particulier du flux, qui le distingue de l'enrobage, réalise un certain confinement de l'arc.

L'amenée du courant à l'extrémité de l'électrode permet également de travailler à des densités de courant plus élevées que ne l'autorisent les électrodes enrobées et permet par suite d'obtenir des pénétrations, des taux de dépôts et des dilutions plus importantes (jusqu'à 70 %). Le transfert de métal s'effectue essentiellement par pulvérisation.

Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (Figure III.9), qu'il est nécessaire d'enlever par piquage.

La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même.

Pendant le soudage, le flux s'appauvrit en éléments essentiels et doit être retraité avant réutilisation [24].

III.9.1.3 Avantages du procédé :

- ❖ Grande vitesse de soudage
- ❖ Pénétration très importante
- ❖ Pas de préparation de chanfrein dans certains cas
- ❖ Très bel aspect du cordon lorsque les paramètres sont correctement réglés
- ❖ Limitation des déformations

- ❖ Arc non visible (pas d'émission de rayons U.V.)
- ❖ Aucune émission de fumées
- ❖ Large gamme d'épaisseur
- ❖ Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- ❖ Bonne répétitivité des paramètres de soudage

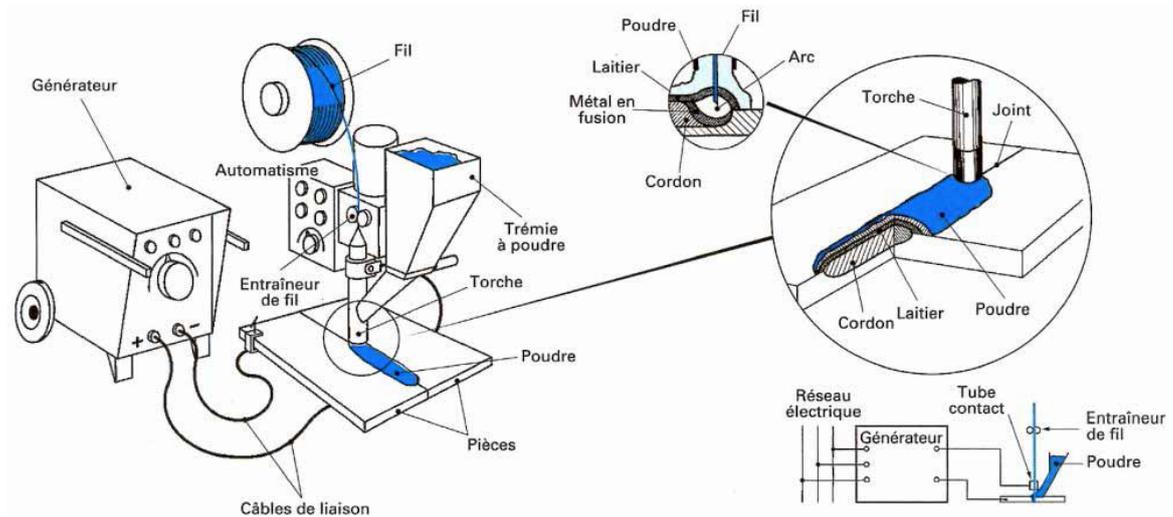


Figure III.10 : Soudage sous flux en poudre [24]

III.9.1.4 Flux et matériau d'apport :

Le fil d'apport et la composition des flux déterminent la qualité de soudure obtenue.

L'objectif est d'obtenir un métal soudé dont la composition et la résistance sont identiques à celles du matériau de base. La composition du métal soudé dépend de celle du fil d'apport, qu'il faut donc choisir en conséquence en tenant compte de la possibilité de perte d'éléments d'alliage brûlés par l'arc, de fusion du métal de base et de production d'alliage sous l'effet du flux.

L'utilisation d'un flux à forte capacité d'alliage en soudure multi-passes risque d'entraîner une accumulation d'éléments d'alliage d'une passe à l'autre [23].

1. Flux :

Le flux en poudre crée le milieu ionisé (ou conducteur) et protège la soudure. De plus, comme l'enrobage, il partage avec le fil la responsabilité des caractéristiques des soudures.

Il est obtenu également à partir de divers oxydes minéraux et conditionné en mélanges poudreux selon essentiellement trois méthodes.

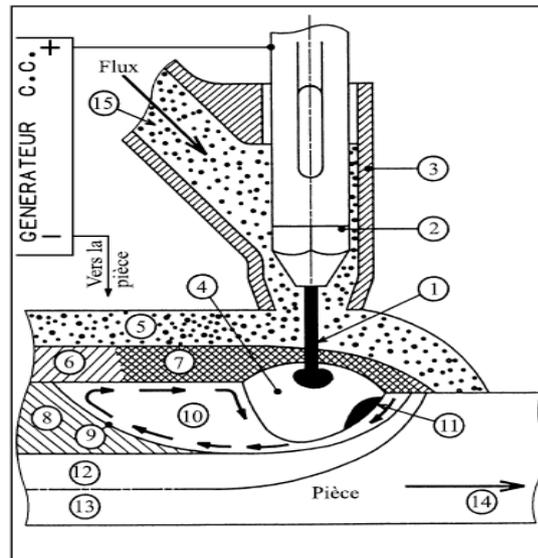


Figure III.11: Principe du procédé de soudage sous flux en poudre [25]

| | |
|---|--|
| <p>1 - Fil électrode. 2 - Tube contact relié en général au pôle + du générateur. 3 - Buse qui canalise l'arrivée du flux. 4 - Arc électrique non visible. 5 - Flux non fondu, récupérable. 6 - Laitier solidifié. 7 - Laitier en fusion. 8 - Métal déposé solidifié.</p> | <p>9 - Front de solidification. 10- Métal en fusion ou bain de fusion. 11- Goutte de métal détachée. 12- Zone affectée par la chaleur. 13- Métal de base non affecté par la chaleur. 14- Sens de soudage. 15- Arrivée de flux.</p> |
|---|--|

2) Types de flux en poudre utilisés :

- **Flux fondus (F) :**

Ils sont obtenus par fusion dans un four à haute température (1300 à 1400 °C) des divers constituants soigneusement dosés. Les pâtes très homogènes et refroidies sont ensuite broyées et tamisées pour obtenir la granulométrie désirée.

Les caractéristiques principales des flux fondus sont leur faible hygroscopicité, leur stabilité aux courants élevés, leur homogénéité. Ils ont, par suite de leur élaboration, une faible activité dans le processus de soudage.

- **Flux agglomérés (B) :**

Ils sont des mélange de divers composants, agglomérés ensuite par un liant soit à froid, soit à chaud mais toujours à basse température. On évite ainsi la décomposition des éléments ou leur interaction et cela permet d'introduire des éléments (alliages ou désoxydants) actifs.

Plus sensibles à l'humidité, les flux agglomérés doivent être soigneusement séchés avant emploi et leur mise en œuvre est plus fragile. Leur caractère désoxydant est un avantage.

- **Flux mixtes (M) :**

Ils sont des mélanges des deux types cités ci-dessus.

Granulométrie des flux en poudre :

- **Granulation des flux fondus selon la norme NFA 81-319**

La granulométrie d'un flux en poudre est désigné par deux nombres qui représentent les dimensions maximales et minimales des particules, correspondant aux dimensions de la maille des tamis ayant été utilisés.

Tableau III.2 : Granulation des flux fondus selon la norme NFA 81-319

| Symbole | Dimensions nominales de la maille en micromètres | Grosseurs des grains (en millimètres) |
|---------|--|---------------------------------------|
| 20 | 80 | 0.08 |
| 21 | 100 | 0.100 |
| 22 | 125 | 0.125 |
| 23 | 160 | 0.125 |
| 24 | 200 | 0.200 |
| 25 | 250 | 0.250 |
| 26 | 315 | 0.315 |
| 27 | 400 | 0.400 |
| 28 | 500 | 0.500 |
| 29 | 630 | 0.630 |
| 30 | 800 | 0.800 |
| 31 | 1000 | 1.000 |
| 32 | 1250 | 1.250 |
| 33 | 1600 | 1.600 |
| 34 | 2000 | 2.000 |
| 35 | 2500 | 2.500 |

- **Selon norme Américaine :**

La granulation est exprimée par deux nombres correspondant chacun à un nombre de mailles, au pouce linéaire, de deux tamis utilisés pour la mesure.

Exemple :

Un flux de granulation 20*200 est tel que toutes ses particules passent au tamis de 20 mailles au pouce, tandis que toutes ses particules sont retenues par le tamis de 200 mailles au pouce.

S'il n'est pas utile de fixer un minimum aux dimensions des particules, le second nombre est remplacé par la lettre D.

$20 \cdot D$ exprime la granulation d'un flux dont toutes les particules passent au tamis de 20 mailles au pouce, sans limite pour la dimension minimale.

- **Influence de la granulométrie :**

Généralement plus la granulométrie est fine:

- Meilleur est le mouillage. (Plus bel aspect) ;
- La pénétration est moins importante ;
- La consommation de flux augmente ;
- Le soudage en angle avec forte gorge est plus facile ;

Plus la granulométrie est grosse:

- Plus le dégazage est facile.

III.9.1.5 Etuvage des flux en poudre :

L'étuvage des flux devient indispensable si les emballages sont détériorés ou s'il est souhaité une teneur en H₂ diffusible dans le métal fondu inférieure à 5 ml/100g.

A titre indicatif, les températures d'étuvage sont au minimum de 200°C pendant deux heures ou 400°C pendant une heure.

L'étuvage évite l'apparition de porosités et la formation secondaire de fissures à froid dues à une teneur excessive en hydrogène.

Les flux agglomérés sont plus ou moins hygroscopiques selon leur composition chimique, ce qui signifie qu'ils absorbent l'humidité.

Pour les flux fondus, l'étuvage n'est pas indispensable, compte tenu de leur non reprise en humidité. A noter qu'une Récupération des flux est possible [23].

- **Conservation des flux sans étuvage**

Pour éviter une condensation d'eau superficielle sur les grains, les flux doivent être stockés à une température égale à celle du lieu d'utilisation, plus 10°C.

- **Conservation des flux après étuvage**

L'humidité étant susceptible de se déposer sur le flux à la sortie de l'étuve, il est conseillé de conserver ceux-ci dans une enceinte fermée à une température supérieure à 60°C.

III.9.1.6 Rôles des flux en poudre :

- **Rôle électrique**

Isolants à froid, les flux deviennent conducteurs à chaud et participent de ce fait à la fusion du métal déposé.

- **Rôle physique**

Le flux transformé en laitier liquide pendant le soudage maintient et moule le métal déposé. De là, les effets du flux sur l'aspect du cordon, sa forme, son profil et ses raccordements avec les bords soudés, ainsi que celui très important sur la compacité du métal déposé du fait du dégazage en cours de soudage

- **Rôle métallurgique**

- Le flux protège le bain de fusion contre l'action de l'oxygène et de l'azote atmosphérique.
- Il participe à la scorification de l'oxyde de fer existant sur les bords à souder.
- Affine le métal en fusion par l'action de ses éléments calmants. (Manganèse, silicium....)
- Incorpore en faible quantité des éléments d'alliage tels que chrome, nickel, etc.
- Assure un refroidissement lent du bain.

III.9.1.7 Caractères des flux :

Selon la composition, on distingue des flux actifs et des flux non actifs. Un flux est dit actif lorsqu'il est à l'origine des teneurs en manganèse et en silicium du métal déposé.

On distingue également, pour un flux déterminé, son caractère acide, basique ou neutre.



Figure III.12 : le flux

- **Flux acides**

Ils ont un pourcentage élevé de silice (SiO₂), le laitier est dense et visqueux, les cordons ont un bel aspect. Le métal déposé a une bonne résistance à la fissuration mais des résiliences moyennes.

- **Flux basiques**

Les flux basiques, à faible pourcentage de silice, sont généralement riches en CaO, MgO, BaO, et fournissent un laitier fluide. L'aspect des soudures est moins régulier. L'action métallurgique est excellente et donne lieu à d'excellentes fortes intensités.

- **Flux neutres**

Les flux neutres allient les propriétés des deux précédents [23].

III.9.1.8 Désignation des flux de soudage à l'arc submergé d'après la spécification SFA 5.23 (aciers faiblement alliés) [23].

- Symbole général.....la lettre F.
- Symbole relatif aux caractéristiques mécaniques.....un chiffre.
- Symbole relatif aux valeurs de résiliences.....une lettre ou un chiffre

Fil d'apport [24]

Le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé. Les fils sont ainsi classés selon leur composition métallurgique et leurs conditions d'emploi.

Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui facilite l'arrivée du courant et reste sans effet sur le métal déposé.

Les fils sont bobinés en tourets et livrés tels quels pour leur utilisation immédiate après mise en place sur les dévideurs.

Les diamètres de fils utilisés en soudage sous flux sont normalisés :

1,2 ; 1,6 ; 2 ; 2,4 ; 3,2 ; 4 ; 4,8 ; 5 et 5,55 mm

- **Intensité moyenne (I_s) :**

On peut calculer les valeurs moyennes approximatives de l'intensité de soudage que peut supporter le fil électrode à l'aide des formules suivantes:

$$\text{Limite inférieure} = \varnothing \text{ du fil (mm)} * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Limite supérieures} = \varnothing \text{ du fil (mm)} * 200 \quad \text{Eq. 2}$$

- **Tension de soudage (U_s) :**

Il est possible de déterminer la tension de soudage d'après la formule:

$$U_2 = 20 \text{ volts} + 0,02 * I_2 \quad \text{Eq. 3}$$

Tableau III.3 : Valeurs approximatives d'intensités et de tension de soudage pour des travaux courants

| Ø (mm) | Plage d'intensité en ampères et tensions correspondantes approximatives | |
|--------|---|---------|
| 2,0 | 160 - 400 | |
| 2,4 | 180 - 220 - 500 - 520 | 28 + 6V |
| 3,2 | 250 - <u>320</u> - <u>650</u> - 700 | 30 + 6V |
| 4,0 | 400 - <u>460</u> - <u>800</u> - 900 | 31 + 7V |
| 5,0 | 450 - <u>550</u> - <u>1100</u> - 1200 | 33 + 6V |

Les chiffres soulignés indiquent la plage d'utilisation normale.

III.9.1.8.1. Courbes de fusion [23] :

Les courbes de fusion permettent de déterminer la vitesse de fusion du fil en fonction de l'intensité de soudage.

La vitesse de fusion est, principalement en fonction de:

- Du diamètre du fil électrode.
- De la nature du courant de soudage (continu ou alternatif).
- De l'intensité appliquée.
- De la longueur de la partie terminale.
- De la polarité adoptée en courant continu (+ ou - au fil électrode).
- De la nature du fil électrode (acier ou inox).
- Du type de flux en poudre utilisé;

Remarque:

La vitesse de fusion d'un fil inox est différente d'un fil en acier.

- **Utilisation des courbes de fusion**

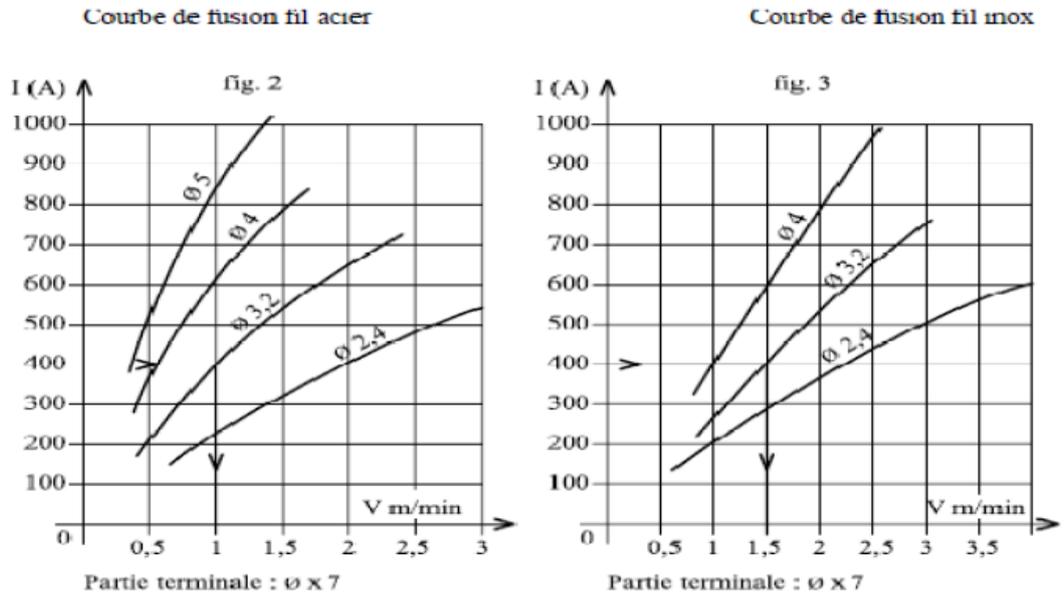


Figure III.13 : Courbe de fusion [26]

Avec une intensité de 400 A, il faut adopter une vitesse de dévidage du fil acier de 1 mètre/mn pour un diamètre de 3,2. Avec un fil inox de diamètre 3,2, une vitesse de dévidage de 1,5 m/mn est nécessaire.

III.9.1.8.2. Symbolisation des fils électrodes nus massifs pour soudage à l'arc :

Submergé suivant la norme ASME

La symbolisation se fait de la façon suivante:

- Symbole relatif à la désignation du fil électrode.....la lettre E.
- Symbole relatif à la composition chimique du fil électrode.....une lettre:

A = acier au carbone, molybdène. (% silicium inférieur à 0,05)

B = acier au chrome, molybdène.

Ni = acier au nickel.

D = acier au manganèse, molybdène. (% silicium compris entre 0,05 et 0,3)

F ou M = acier contenant plusieurs éléments d'alliage.

- Symbole relatif à la teneur des éléments d'addition.....un chiffre.

Exemple:

E A 3 (SFA 5.23)

- E = fil électrode nu massif pour soudage à l'arc submergé;
- A = acier au carbone molybdène ;
- 3 = composition chimique du fil.

III.9.1.8.3 : Influence des paramètres en soudage à l'arc submergé :

La géométrie du cordon peut évoluer sous l'influence des principaux facteurs ci-après:

- Intensité de soudage (I_s);
- Tension de soudage (U_s);
- Vitesse de soudage (V_s);
- Densité de courant (d);
- Diamètre du fil électrode (\emptyset);
- Nature du courant et polarité;
- Longueur libre de fil électrode;
- Position du fil et inclinaison par rapport à la surface de la tôle ;
- Position de la prise de masse.

a. Influence de l'intensité (I_s) :

L'intensité influence la profondeur de pénétration, la hauteur du cordon, la quantité de métal déposé et parfois les pertes en éléments d'alliage. La figure ci-dessous illustre l'influence de l'intensité sur la pénétration et la surépaisseur d'un cordon.

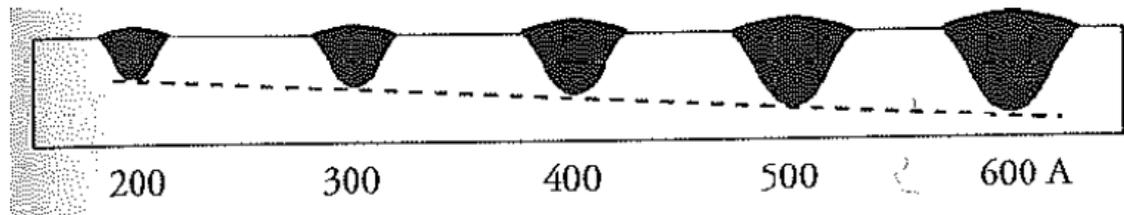


Figure III.14: Effet du courant de soudage sur l'aspect de la soudure. [26]

• Courbes de fusion:

Les courbes de fusion des fils électrode précisent la relation entre l'intensité de soudage et la vitesse de dévidage du fil pour différents diamètres.

On constate qu'une augmentation de l'intensité provoque:

- Une vitesse de dévidage plus rapide.
- Une quantité de métal déposé plus importante.

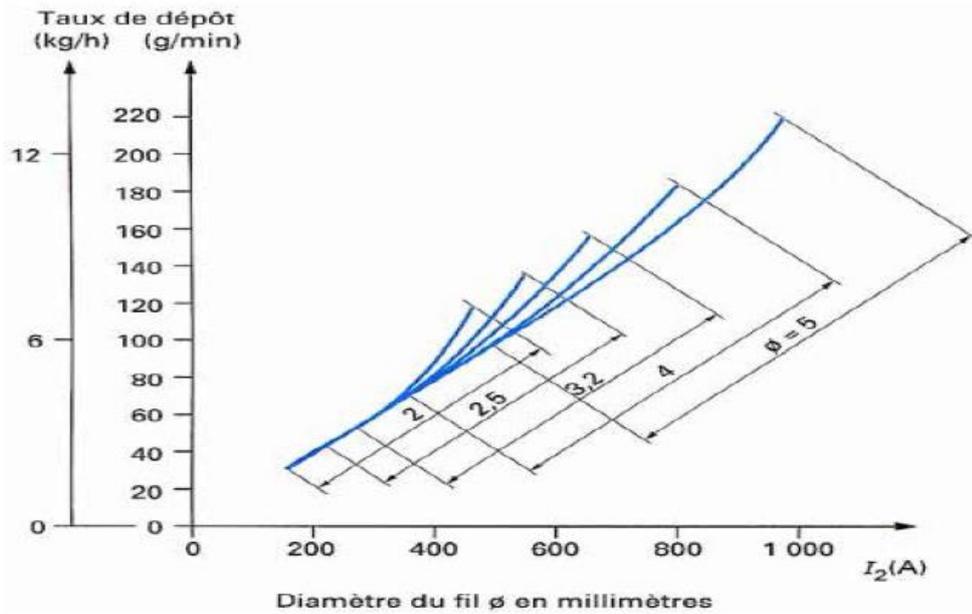


Figure III.15 : Taux de dépôt moyen en soudage sous flux [24]

En moyenne, la vitesse de dépôt croît d'environ 1.5 kg/heure par tranche d'augmentation d'intensité de 100 ampères.

- **Influence de l'intensité (I_s) sur les pertes en éléments d'alliage**

L'influence de l'intensité sur les pertes en éléments d'alliage (manganèse et silicium) est déterminée par la composition chimique du fil électrode et du flux.

b. Influence de la tension de soudage (U_s)

Une tension d'arc élevée donne une soudure large et peu pénétrante, qui convient au soudage de bords très écartés et permet l'incorporation d'un plus grand nombre d'éléments d'alliage au flux. Mais une tension d'arc élevée augmente aussi la consommation de flux et complique l'élimination du laitier refroidi en même temps. Elle accroît le risque de formation de caniveaux, notamment lors de la réalisation de soudures d'angle. A l'inverse une faible tension d'arc donne à la soudure une convexité excessive ainsi qu'un mauvais angle de contact avec la pièce à souder.

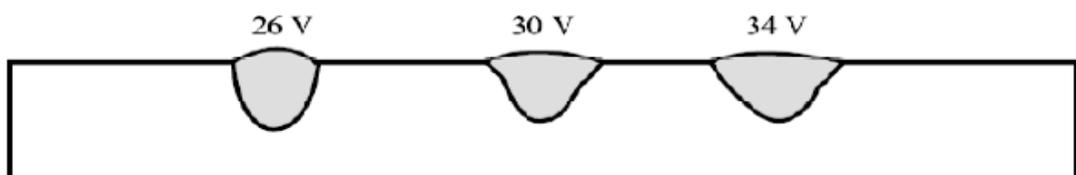


Figure III.16: Effet de la tension d'arc sur l'aspect de la soudure [26]

- **Influence de la tension de soudage sur les pertes en éléments d'alliage :**

La tension doit être ajustée suivant les recommandations du fabricant de flux. La géométrie d'un cordon correspond pour un flux donné au rapport Intensité/tension de soudage.

La consommation de flux s'accroît avec la tension d'arc croissante, tandis que la variation de cette dernière peut influencer les transferts d'éléments d'alliage entre métal déposé et flux.

c. Influence de la vitesse de soudage (V_s)

La vitesse influence sur la pénétration et la géométrie du cordon.

A tension et intensité de soudage constantes, l'accroissement de la vitesse a pour effet d'affiner le cordon.

La profondeur de pénétration diminue avec la vitesse de soudage.

Un accroissement de la vitesse de soudage peut provoquer l'apparition de porosités du fait de la solidification rapide du bain de fusion entraînant un dégazage insuffisant.

Un soudage trop rapide peut également provoquer l'apparition de caniveaux.

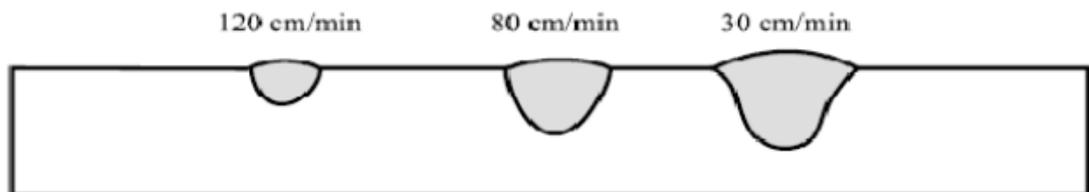


Figure III.17 : Influence de la vitesse de soudage sur la forme du cordon [26]

d. Influence de la polarité

On pratique habituellement le soudage sous flux en poudre avec le fil électrode relié au pôle+, polarité qui conduit à une pénétration plus forte avec la plupart des flux.

Par contre, la vitesse de dépôt est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive.

Toutefois des défauts de liaison peuvent apparaître en soudage avec une polarité négative car la pénétration est réduite [23].

Tableau III.4 : Influence des différents paramètres sur la morphologie du cordon desoudure [25]

| Augmentation du paramètre | Largeur | Pénétration | Poudre/fil | Taux de dépôt |
|---------------------------|---------|-------------|------------|---------------|
| Intensité | → | ↗ | ↘ | ↗ |
| Diamètre du fil | ↗ | ↘ | ↗ | ↘ |
| Tension | ↗ | → | ↗ | → |
| Vitesse soudage | ↘ | ↘ | → | → |
| Longueur libre | → | ↘ | ↘ | ↗ |
| Polarité + / • | → | ↗ | ↗ | ↘ |
| Granulométrie | ↘ | ↗ | ↘ | → |

Tableau III.5 : Influence des paramètres de soudage sur le cordon

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

III.9.2 Soudage à l'électrode enrobée (SMAW) :

III.9.2.1 Définition de précède:

Shielded metal arc welding (SMAW)

Procédé de soudage qui produit la fusion et la coalescence des métaux en les chauffant avec un arc électrique entre une électrode métallique couverte et la pièce, dans lequel l'arc et le métal fondu sont protégés par la décomposition du revêtement d'électrode.

III.9.2.2 Principe de procédé :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la Figure III.17

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse.

L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode,

Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

- la technologie des électrodes;
- l'habileté de l'opérateur.

L'électrode enrobée constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre.



Figure III.18 : Soudage à l'électrode enrobée

III.9.2.3 Sources d'alimentation :

Lorsque l'on soude avec des électrodes enrobées, l'intensité du courant se règle au niveau de la source d'alimentation. La longueur de l'arc peut varier, mais le courant de soudage ne doit pas varier au-delà de certaines limites. Si l'on veut éviter les projections dues au court-circuit provoqué par le métal fondu dans l'arc reliant l'électrode et la pièce à souder, le courant de court-circuit ne doit pas dépasser de plus de 60% le courant de soudage. D'un autre côté, si le courant de court-circuit est trop faible, l'électrode risque de « coller » à la pièce à souder. Il est donc nécessaire que la source d'alimentation présente une caractéristique de charge plongeante.

Pour le soudage SMAW, les sources d'alimentation ne requièrent pas un facteur d'intermittence aussi élevé que pour les autres méthodes mécanisées (35% est une valeur normale).

Etant donné que le soudage SMAW peut être réalisé en courant alternatif ou en courant continu, tous les types de sources d'alimentation peuvent être utilisés. Les avantages du courant alternatif sont la simplicité de la source d'alimentation et la diminution de l'effet de soufflage magnétique. Cependant, le choix des électrodes est alors limité et il est nécessaire que la source d'alimentation fournisse une tension à vide d'au moins 50V et, si possible davantage [23].

1) Définition de l'électrode enrobée :

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (Figure III.18). L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures. C'est pourquoi il en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés (norme ASME).

On donne ci-après quelques données générales concernant l'âme métallique et son enrobage.

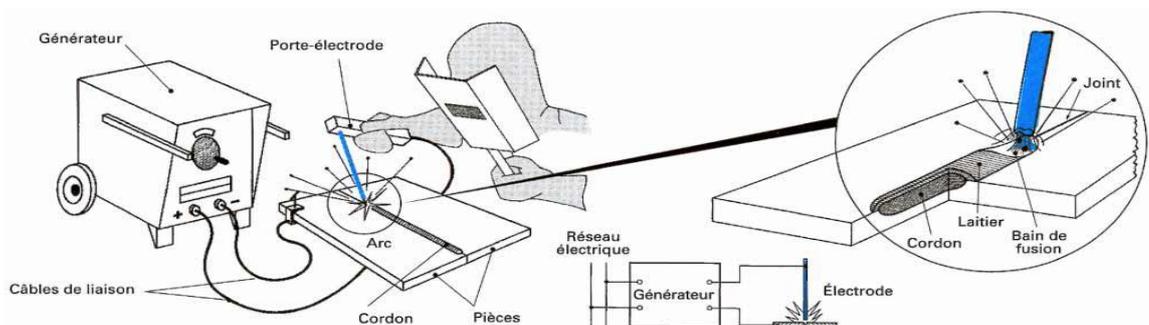


Figure III.19 : Procédé de soudage à l'électrode enrobée [24]

2) Enrobage

L'enrobage est constitué par un mélange de corps très divers agglomérés autour de l'âme par un liant. Compte tenu des effets nombreux et variés que ces différents corps peuvent produire grâce à leurs comportements physico-chimiques pendant le soudage et dans les soudures elles-mêmes, il existe une grande diversité d'enrobages dont l'élaboration relève souvent de secrets de fabrication.

Les éléments les plus employés sont des minerais, silicates, carbonates, matières organiques, métaux en poudre, graphite, etc.

Différentes épaisseurs d'enrobage existent dans les normes : minces, semi-épais et épais, respectivement $< 140 \%$, $140 \text{ à } 180 \%$ et $> 180 \%$ du diamètre de l'âme.

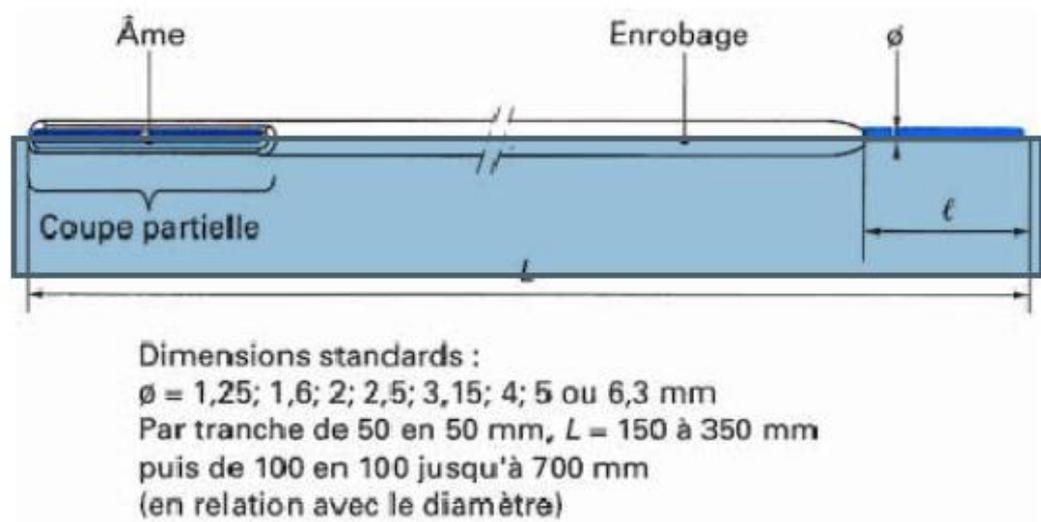


Figure III.20: Caractéristiques de l'électrode enrobée [24]

2) Types d'enrobage :

- **Électrode acide**

L'enrobage des électrodes acides se compose d'oxyde de fer et de manganèse. Le laitier qui se solidifie, devient poreux et se retire facilement. Le métal ainsi soudé a une limite d'élasticité et une résistance à la traction plus faible que celles du métal produit par les électrodes rutiles et basiques. En revanche, la résistance à la rupture est plus élevée.

- **Électrode rutile**

L'enrobage des électrodes rutiles se compose de grandes quantités (environ 25 à 45 %) de dioxyde de titane (TiO₂). Les électrodes de ce type facilitent l'amorçage de l'arc. Elles sont très faciles à utiliser, elles produisent une belle soudure avec un laitier facile à retirer.

Malheureusement, la teneur en hydrogène dans la soudure étant plus élevée, il y a un risque de fragilisation et de fissuration par l'hydrogène. Ceci limite l'utilisation de ce type d'électrodes au soudage des aciers au carbone, dont la résistance à la traction est inférieure à 300 Mpa.

Il existe deux catégories d'électrodes rutiles :

-Celles qui comportent une faible proportion de cellulose et dont l'enrobage est semi-épais. Elles produisent une importante quantité de laitier. Elles sont utilisées pour le soudage horizontal et ne produisent que peu de projections.

-Celles dont l'enrobage est plus fin et produit un laitier qui se solidifie plus rapidement et un arc plus intense en raison de l'inclusion d'une grande quantité de substances produisant des gaz. On utilise ces électrodes pour le soudage horizontal, vertical et au plafond. La pénétration est plus profonde et la quantité de laitier est réduite. Les soudures horizontales peuvent être plates ou légèrement convexes.

- **Électrode basique**

L'enrobage des électrodes basique se compose de fluorure de calcium (fluorspar CaF₂). Le laitier réagissant comme une base, la soudure obtenue ne contient qu'une faible quantité de soufre et d'oxygène. La résistance à la fissuration à chaud est supérieure à celles obtenue par d'autres électrodes. Le risque d'inclusion de laitier est faible, ces électrodes conviennent dans toutes les positions de soudage.

Les électrodes basiques étant fabriquées à très haute température (jusqu'à 500°C), la teneur en humidité de l'enrobage est faible. Le métal soude contient donc peu d'hydrogène et le risque de fissuration à froid est faible.

Toutefois, les électrodes basiques étant hygroscopiques, elles doivent être conservées à l'abri de l'humidité. L'idéal est que ces électrodes soient maintenues à une température de 50 à 80 °C pendant toute la période de travail, et que celles qui n'ont pas été utilisées soient remises en fin de journée dans un four à une température d'environ 150 °C.

Les électrodes basiques présentent néanmoins un inconvénient :

La surface de la soudure est plus grossière et rugueuse et généralement convexe.

- **Électrode cellulosique**

L'enrobage des électrodes cellulosiques comporte une quantité relativement élevée de substances cellulosiques qui apportent une importante quantité d'hydrogène à l'arc quelles que soit la position de soudage. On obtient ainsi une excellente pénétration. On utilise exclusivement ce type d'électrodes pour le soudage de gazoducs et d'oléoducs : La teneur en humidité de l'enrobage est relativement élevée. Il faut utiliser des méthodes particulières de soudage et travailler à des températures de 100 à 250 °C, même pour le soudage de faibles épaisseurs (8 à 10 mm).

Tableau III.6 : Facteurs déterminant le choix de l'électrode. [26]

| Facteur | Électrode rutile | Électrode acide | Électrode basique |
|---------------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Stabilité de l'arc | ++ | + | - |
| Aspect du cordon de soudure | + | ++ | - |
| Amorçage de l'arc | ++ | + | - |
| Solidité de la soudure | - | - | ++ |
| Différentes positions de soudage | + | -- | ++ |
| Risque d'inclusions de laitier | - | -- | ++ |
| Résistance à la corrosion | + | + | - |
| Formation de fumée | ++ | + | - |
| Enlèvement du laitier | + | ++ | - |
| Inclusion d'hydrogène dans la soudure | - | - | ++ |

4) Rôles de l'enrobage :

- **Rôle électrique**

C'est le premier rôle essentiel de l'enrobage ; il permet d'amorcer l'arc et de le maintenir de façon stable par les vapeurs et divers dégagements gazeux qui y prennent place. Le potentiel d'ionisation des éléments dégagés définit directement, pour un courant donné, la tension

d'arc. Selon la composition de l'enrobage, cette tension peut varier dans de larges limites comprises entre 4 et 30 V. Deux conséquences en résultent :

- la stabilité de l'arc et sa facilité d'amorçage et de réamorçage d'autant plus aisées que la tension d'arc est basse, grâce par exemple à des éléments tels que le potassium, le sodium aux potentiels d'ionisation très bas ;
- la puissance obtenue dans l'arc et par suite la fusion de l'électrode et la pénétration qui lui sont liées, d'autant meilleures que la tension est élevée.

En découleront les principales conditions d'utilisation :

- ✚ type de courant approprié (alternatif ou continu) ;
- ✚ tension d'amorçage (à vide) du générateur ;
- ✚ pénétration et taux de dépôt ;
- ✚ diversité d'emploi, etc.

- **Rôle mécanique**

Le retard de la fusion de l'enrobage sur l'âme métallique forme un cratère à l'extrémité de l'électrode. Ce cratère dirige l'arc dans le prolongement de l'électrode et contribue à la stabilité mécanique de l'arc. La grosseur des gouttes dépend principalement de la nature de l'enrobage. Les électrodes à enrobages basiques et cellulosiques donnent des grosses gouttes de métal transféré, alors que les autres types d'électrodes produisent des gouttes plus fines. L'action capillaire et visqueuse du laitier maintient les gouttes de métal et permet le soudage en position.

La nature du laitier influe sur la tension superficielle du métal en fusion et par conséquent sur la forme et l'aspect du cordon.

- **Rôle métallurgique**

L'enrobage doit, pour exercer son second rôle essentiel de protection pendant le soudage, émettre des vapeurs chassant l'air de la zone d'arc et posséder des qualités neutres, légèrement réductrices ou au pouvoir oxydant contrôlé.

Pendant et après la fusion, l'enrobage forme laitier et surnage par sa faible densité au-dessus du bain jusqu'au refroidissement complet au cours duquel il se solidifie tout en conservant son action protectrice ; il doit être enlevé par piquage.

On a constaté que certains éléments de l'enrobage se diluaient dans le métal en fusion et se retrouvaient dans le cordon. De là, l'idée d'introduire par ce biais des corps tels que le

manganèse, le silicium, le titane, le nickel, le chrome, etc. de nature à participer à la texture métallurgique résultante de la zone fondue.

5) Fusion de l'électrode :

Les caractéristiques de fusion de l'électrode répondent à des lois générales rappelées ci-après:

Constante de fusion : La quantité de métal déposé par unité de temps dépend linéairement du courant d'arc (figure III.20). Le coefficient de proportionnalité qu'il est possible de relever varie d'un modèle d'électrode à l'autre et peut être considéré comme une caractéristique propre à chacun d'eux. On appelle ce coefficient constante de fusion, il s'exprime en kg/(Ah). Sa connaissance permet d'établir le temps nécessaire pour réaliser un dépôt de poids donné, à une intensité fixée.

Pertes de fusion : Elles sont dues aux projections qui se produisent pendant le soudage et pour diverses raisons (type d'enrobage, caractéristiques du générateur, type de transfert, température relative du métal apporté par rapport aux pièces, conditions opératoires, etc.). Selon le cas, ces pertes peuvent atteindre des proportions importantes, de l'ordre de 20 à 25 %. Signalons en outre que l'électrode n'est jamais complètement consommée, la longueur prise dans la pince étant inutilisable et représentant une perte supplémentaire de 5 % environ.

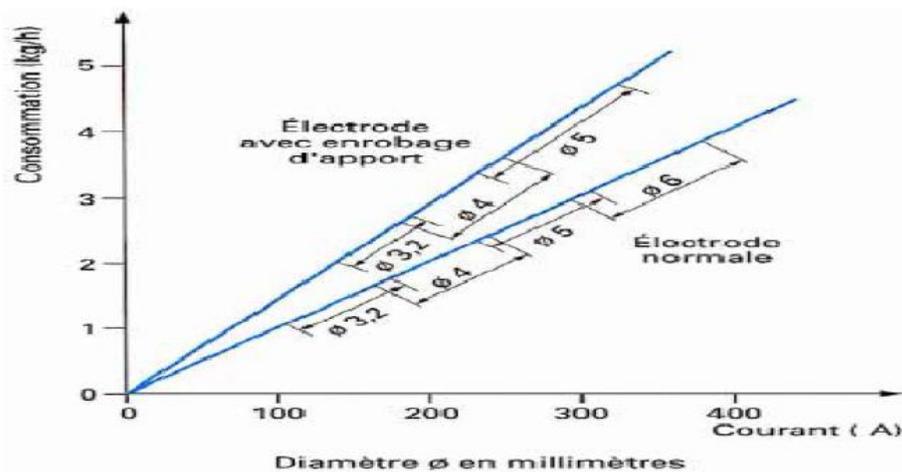


Figure III.21 : Fusion des électrodes [24]

- **Rendement**

Il est défini comme le rapport entre le poids du métal déposé et celui de l'âme effectivement fondue. Sachant que l'on peut effectuer un apport de métal par l'enrobage (figure III.20), ce

rendement de l'électrode enrobée exprime donc en définitive la proportion de cet apport dans l'apport total. On produit ainsi des électrodes ayant des rendements pouvant atteindre 200 %.

6) Pénétration, vitesse de soudage, vitesse opératoire :

La pénétration et la vitesse de soudage dépendent non seulement de la nature de l'électrode mais aussi de ses conditions d'utilisation : nature du travail, position de soudage, intensité, etc.

Tableau III.7 : Consommations d'électrodes [24]

| | Fusion des électrodes | |
|----------|------------------------|-----------|
| Diamètre | Nombre d'électrodes | |
| (mm) | Par kg de métal déposé | Par heure |
| 3.2 | 49 | 20 à 25 |
| 4 | 32 | 14 à 15 |
| 5 | 21 | 12 à 14 |

7) Principaux composants des enrobages [23] :

Parmi les matériaux utilisés dans l'enrobage, il y a des substances organiques, des minéraux, des composés chimiques, de l'argile et des alliages ferreux.

La cellulose : c'est un produit dérivé de la pulpe de bois ou du papier recyclé. Elle produit en brûlant du CO₂ et de l'hydrogène qui fournissent une protection gazeuse au métal fondu et améliorent les caractéristiques de pénétration.

Le carbonate de calcium : on le rencontre dans la nature sous forme de pierre à chaux, de calcite ou de marbre. C'est un composant important des électrodes à basses teneur en hydrogène. Il se décompose dans l'arc pour produire du CO₂, qui protège le bain de fusion et abaisse la teneur en hydrogène dans l'atmosphère de l'arc. Le laitier aide à réduire au minimum la quantité d'oxygène présente dans le métal fondu, et contribue ainsi à produire un dépôt sain aux propriétés satisfaisantes.

Le spath-fluor : le spath-fluor (ou fluorine) est du fluorure de calcium naturel. On l'utilise pour contrôler la fluidité du laitier et permettre ainsi aux gaz de s'échapper. Il y en a

habituellement dans l'enrobage des électrodes à basse teneur en hydrogène car il aide à réduire au minimum la quantité de gaz présente dans le métal fondu.

Le rutile : les minéraux qui, comme le rutile et l'ilménite (FeTiO_3) contiennent du dioxyde de titane (TiO_2) contribuent à stabiliser l'arc et donnent un laitier fluide qui solidifie rapidement. La surface de la soudure obtenue est belle et lisse. Potassium, tels que le feldspath de potassium et le titane de potassium, dans l'enrobage des électrodes. Le potassium favorise l'ionisation et aide ainsi à stabiliser l'arc et à faciliter son réamorçage. Les électrodes conçues essentiellement pour le soudage en courant alternatif en contiennent souvent dans leur enrobage.

Les ferro-alliages : lorsque des éléments ou des agents réducteurs sont requis, on les ajoute souvent sous forme de ferro-alliages. Le ferro-manganèse et le ferro-silicium sont ceux que l'on utilise le plus fréquemment car ils désoxydent le métal fondu et permettent de contrôler la résistance du dépôt.

Le silicate de sodium : il est également connu sous le nom d'ortho silicate. Il s'agit d'un liant liquide que l'on emploie pour garder agglomérés, les composants du flux pendant la cuisson de l'électrode.

L'oxyde de fer : il est inclus dans l'enrobage de certaines électrodes, sous forme de minerais comme la magnétite et l'hématite. Il sert principalement à former le laitier.

La poudre de fer : on peut employer la poudre de fer dans l'enrobage de certaines électrodes. Il arrive qu'elle constitue 50 % ou plus de la masse de l'enrobage. La poudre de fer sert surtout à augmenter le taux de dépôt de l'électrode car elle fond et s'ajoute au métal déposé provenant de l'âme.

Elle peut également influencer sur l'aspect du cordon, et sur la formation, à la pointe de l'électrode, du cratère qui permet d'utiliser la technique de soudage par traînage.

8) Utilisation des électrodes à enrobage basique :

Bien que les indications de ce graphique ne soient pas exactement valables pour chaque type d'électrodes basiques, il montre bien qu'en pourcentage d'humidité important est rapidement

atteint lorsque les électrodes restent exposées à l'air libre. Un taux d'humidité d'enrobage de l'ordre de 1% risque de donner naissance à des porosités dans les dépôts pour tous les aciers courants ; il suffit de dépasser environ 0,3 % pour que les risques de fissuration sous cordon apparaissent au soudage des aciers sensibles à la trempe.

La prise d'humidité est si rapide que ces électrodes nécessitent bien souvent un étuvage avant leur utilisation et des précautions accrues pour éviter leur reprise d'humidité entre l'opération d'étuvage et l'emploi.

Le séchage des électrodes basiques n'est effectif que lorsqu'il est pratiqué dans une étuve à une température dépassant 250°C pendant une période allant de 2 heures minimum pour 400°C à plus de 24 heures pour 250°C.

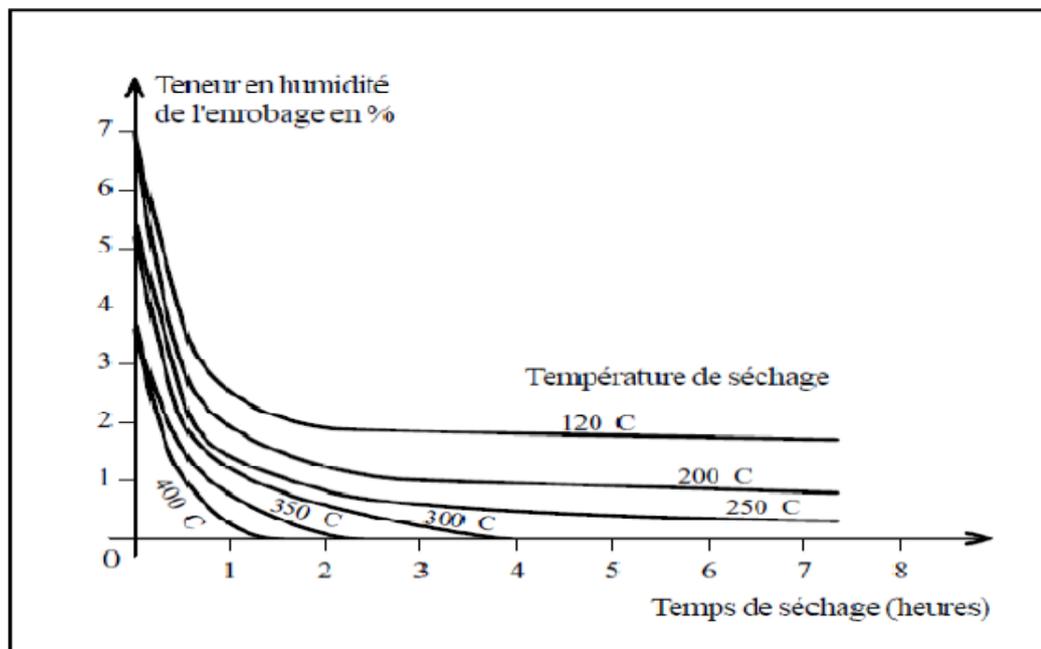


Figure III.22 : Teneur en humidité de l'enrobage% en fonction de t(h) [23]

9) Influence des paramètres de Soudage avec électrode enrobée :

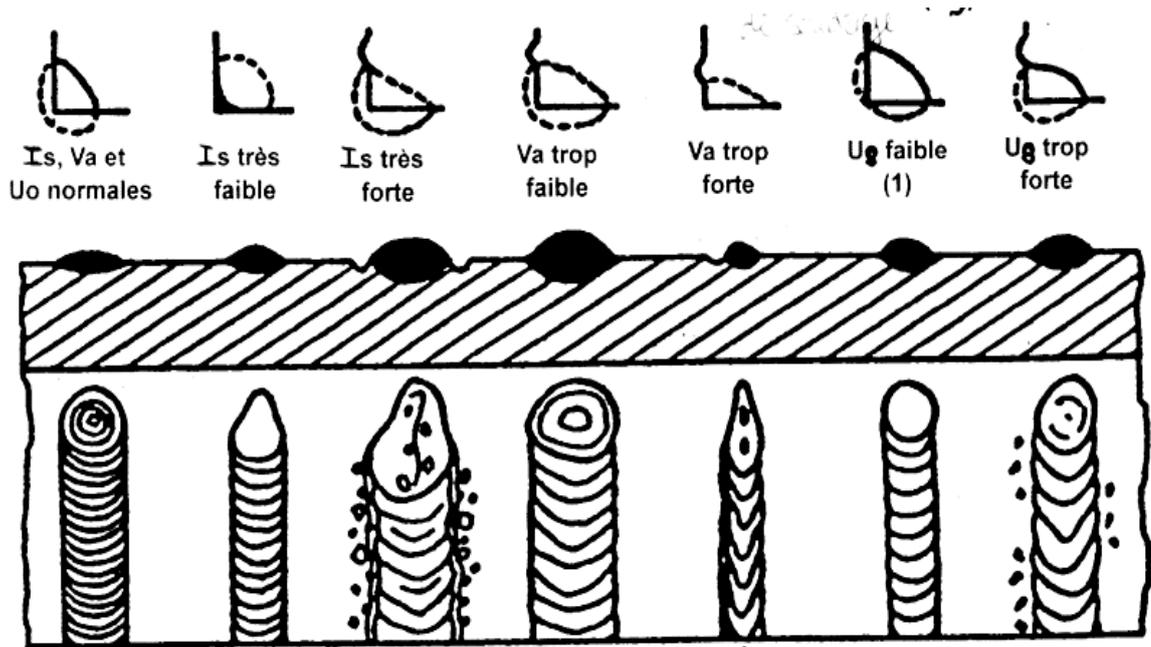


Figure III.23 : Influence de l'intensité de soudage (I_s), la vitesse d'avancement (V_s), de l'électrode et de la tension (U) sur l'aspect du cordon [23]

III.10 Conclusion :

Le soudage est un moyen d'assemblage permanent. Il a pour objet d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux,

L'opération peut être appliquée aux métaux ainsi qu'aux thermoplastiques et au bois . Le soudage permet d'obtenir une continuité de la nature des matériaux assemblés : matériau métallique, matière plastique, etc. De ce fait, les techniques d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage...) ou par adhésion (collage), ainsi que les techniques de brasage ne répondent pas à la définition du soudage.

Chapitre IV:
Techniques
expérimentales
et procédures
avec résultats

Chapitre IV: Techniques expérimentales et procédures avec résultats

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter toutes les expériences qui ont été réalisées durant notre stage pour le mémoire réalisé, l'objectif principal de ce travail est optimiser la qualité des soudures de l'acier API 5L X70 PSL2 réalisées par les procédés SAW et SMAW utilisés par Alpha pipe de Ghardaïa pour la fabrication des pipelines

L'acier étudié, est prélevé à partir d'un tube en acier de type API 5L X70 PSL2 destiné pour la canalisation du gaz naturel pour le projet GR7.

IV.2 Défauts des soudures :

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

IV.2.1 Fissurations :

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

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

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

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

IV.2.2 Fissuration à chaud :

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

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure (Figure IV.1). On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal.

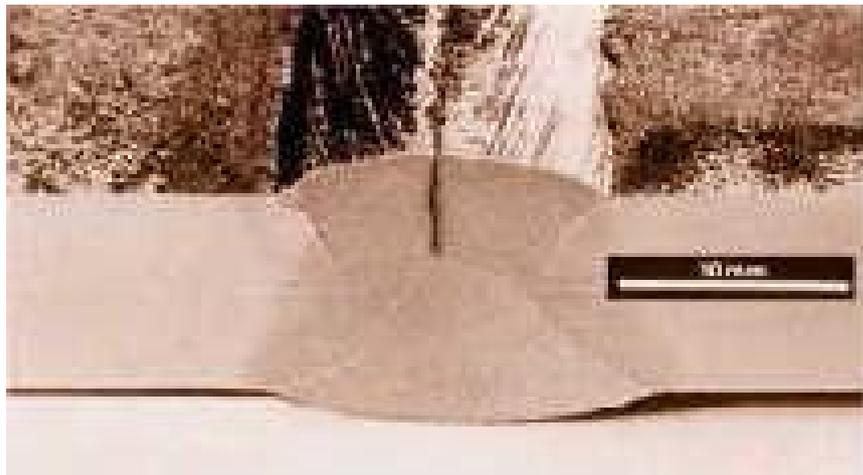


Figure IV.1: Fissure longitudinale (Fissuration à chaud)

IV.2.3 Fissuration à froid :

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZTA (Figure IV.2) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.



Figure IV.2 : Fissure à froid. [27]

Tableau IV.1 : présente les causes les plus fréquentes de fissurations à chaud et à froid, et les moyens de les prévenir

| | cause | Moyen de prévention |
|----------------------------|---|---|
| Fissuration à chaud | <ul style="list-style-type: none"> - joints trop étroits - présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) - métal d'apport incompatible avec le métal de base - cordon trop petit - trop de retrait durant ou après le soudage | <ul style="list-style-type: none"> - bonne mesure des angles des chanfreins - préchauffage et chauffage en cours de soudure - bon choix du métal d'apport - refroidissement lent - traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) - cordon suffisamment large, réduction de la vitesse au besoin - en cas de retrait, léger roture en arrière et ajustement de la procédure de soudage |
| Fissuration à froid | <ul style="list-style-type: none"> - hydrogène coince dans la soudure - tensions internes résiduelles importantes | <ul style="list-style-type: none"> - Préchauffage et chauffage en cours de soudage - refroidissement lent - utilisation d'électrodes basiques - entreposage des électrodes dans un four, au chaud - Traitement thermique après soudage (normalisation, recuit) - Dessoudage (au besoin) |

IV.2.4 Porosités :

Il s'agit de défauts sphériques creux qui peuvent être ou non débouchant, Figure IV.3. Elles sont causées par les courants d'air, le manque de gaz, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder...etc.



Figure IV.3 : Porosités débouchâtes en surface de cordon de soudure [27]

IV.2.5 Soufflures :

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz (Figure IV.4). Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchâtes (en surface).

Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance graisseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.

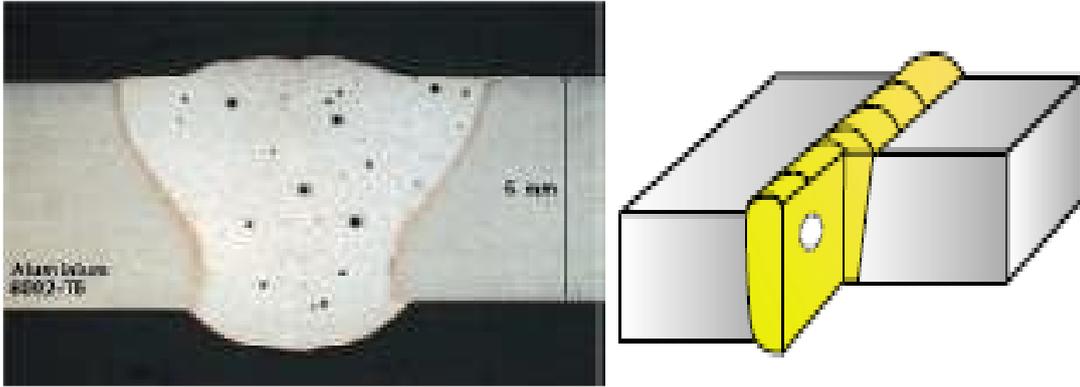


Figure IV.4 : Soufflures sphéroïdales non débouchantes [27]

IV.2.6 Inclusions :

Elles désignent un composé étranger à la soudure et peuvent contenir du Tungstène (Cas du Soudage TIG) ou du laitier (Soudage à l'électrode enrobée) ou encore des oxydes.

IV.2.7 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. 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.

IV.2.8 Défauts de pénétration :

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi-passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé (Figure IV.5).



Figure IV.5 : Excès de pénétration [27]

IV.2.9 Collage ou manque de fusion :

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure (Figure IV.6).

Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut. Aussi, il peut être très difficile à repérer même avec les rayons X puisqu'il n'a que deux dimensions.

On le retrouve plus fréquemment avec le procédé GMAW. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs.



Figure IV.6 : Manque de pénétration et collage en bord du joint. [27]

IV.2.10 Morsures et 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 IV.7). 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.

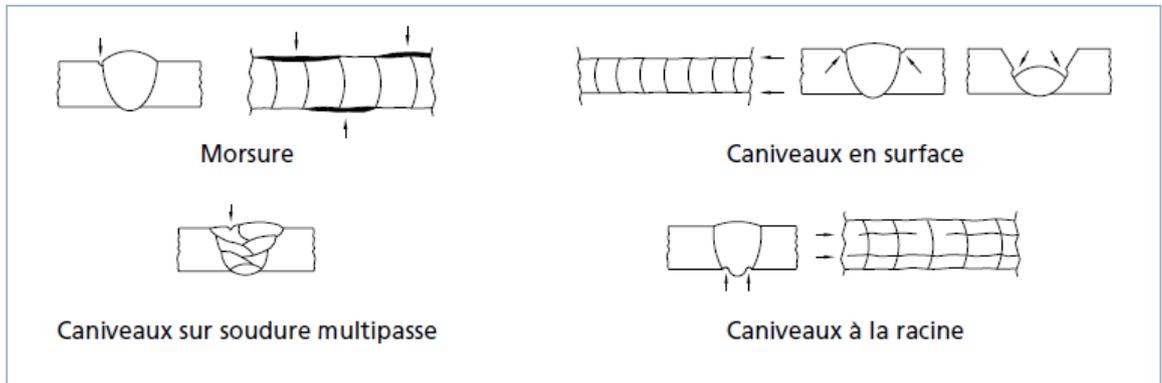


Figure IV.7 : Morsures et caniveaux [23]

Caractérisation chimique microstructurale et mécaniques d'un acier de pipelines

:

Propriétés chimiques de l'acier X70 :

La composition chimique de l'acier utilisé dans la fabrication du tube fourni selon cette spécification doit être conforme aux exigences de l'API 5L. Comme le montre le (Tableau IV.2), il convient de noter que ce matériau est un acier faiblement allié.

Tableau IV.2 : La composition chimique de l'acier API 5L X70

| Elément | C | S | P | Si | Mn | Al | Nb | V | Ti | Ni | Cu |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Acier garde API X70 | 0.072 | 0.001 | 0.007 | 0.352 | 1.687 | 0.033 | 0.059 | 0.003 | 0.022 | 0.016 | 0.016 |

| Cr | Mo | N | B | Fe | Ce |
|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 0.013 | 0.015 | 0.002 | 0.0003 | 0.973 | 0.0002 |

Discussion :

- ✚ D'après le (Tableau IV.2), nous constatons que l'acier API 5L X70 a une faible teneur en carbone.
- ✚ La faible teneur en carbone est nécessaire pour améliorer la soudabilité et la résilience de l'acier.

- ✚ Les éléments niobium, le titane et le vanadium contribuent à l'amélioration de la limite d'élasticité, la micro dureté, la résilience et la soudabilité
- ✚ Le teneur des éléments d'alliage ne dépasse pas 5% donc l'acier API 5L X70 est un acier faiblement allié. [21]



IV.3 contrôle des soudures :

a) Avant soudage :

- Analyse du matériau et de la matière (nature, composition chimique)
- Contrôle des électrodes (nature, type, composition chimique)
- Contrôle de la préparation des bords (type et dimensions des chanfreins)
- Conception des séquences de soudage bridage des pièces, répartition des passes)
- Qualification du soudeur (suivant la norme)

b) Pendant soudage :

- Température de préchauffage
- Nature du courant son intensité
- Disposition des passes dimensions et vitesse de soudage

c) Après soudage :

Le contrôle après soudage peut être groupé en 3 catégories.

- Les essais destructifs
- Les essais semi destructifs
- Les essais non destructifs

IV.4 Les essais destructifs :

IV.4.1 Prélèvement d'échantillons des plaques :

Les échantillons destinés aux essais destructifs sont prélevés sur un anneau du tube bouché à une extrémité, désigné pour les essais (lot ou coulée). La paire de plaques (métal de base, métal de base soudé) est prélevée transversalement à l'axe du tube.

Les échantillons sont prélevés et découpés dans le sens du laminage (L) de la bobine, Figure IV.8. a) et b). et la Figure IV.8 montrent les résultats de l'évolution classique et rationnelle de la contrainte de traction en fonction de la déformation du matériau. La forme générale de cette courbe a montré un comportement ductile.

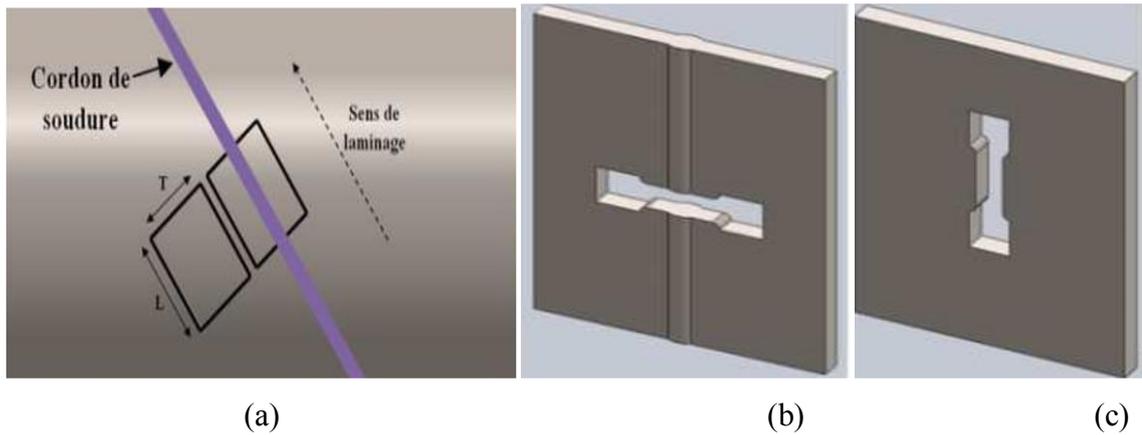


Figure IV.8 :(a) Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tuyau (b) Eprouvette de traction de la soudure (c) Eprouvette de traction MB

À partir d'un tube à essai, nous avons découpé un échantillon de la plaque de base métallique, Figure IV.9. (A) Ensuite, nous avons pris une plaque dans laquelle nous avons observé la soudure du carbone au métal (Figure IV.9. (B). [36]



(a)

(b)

Figure IV.9 : Prélèvement des plaques : (a) en métal de base transversale par rapport au virole et (b) transversales au cordon de soudure

IV.4.2 Examen métallographique:

L'examen macroscopique (examen à l'œil nu) ou macrographique (examen avec un optique comme une binoculaire) permet de révéler la structure métallographique homogène ou

hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée. Le réactif chimique appliqué sur la surface polie de l'éprouvette révèle, par dissolution à vitesse inégale, les hétérogénéités physiques et chimiques de la surface métallique examinée.

IV.4.3 La microstructure :

Afin de réaliser l'étude microstructurale de ce matériau par examen micrographique, nous faisons un prélèvement dans les trois zones d'un cordon soudure puis effectuée d'un enrobage à froide puis un polissage à l'aide des papiers abrasifs de plus en plus fins, L'analyse micrographique de l'acier X70 réalisée à l'aide d'un microscope optique (Figure IV.10) a été effectuée après attaque chimique au réactif Nital (95% alcool+5% acide nitrique).



Figure IV.10 : Microscope optique

IV.4.4 Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (la résistance ultime à la traction, la limite apparente d'élasticité à 0.2% et l'allongement caractéristiques pour le métal de base et la résistance à la traction du cordon de soudure. [28]

- ✚ La limite d'élasticité (R_e)
- ✚ La résistance à la traction (R_m) MPa
- ✚ Le pourcentage d'allongement après rupture ($A\%$) MPa



Figure IV.11 : Epreuve de traction : (a) contenant le cordon de soudure. (b) en métal de base

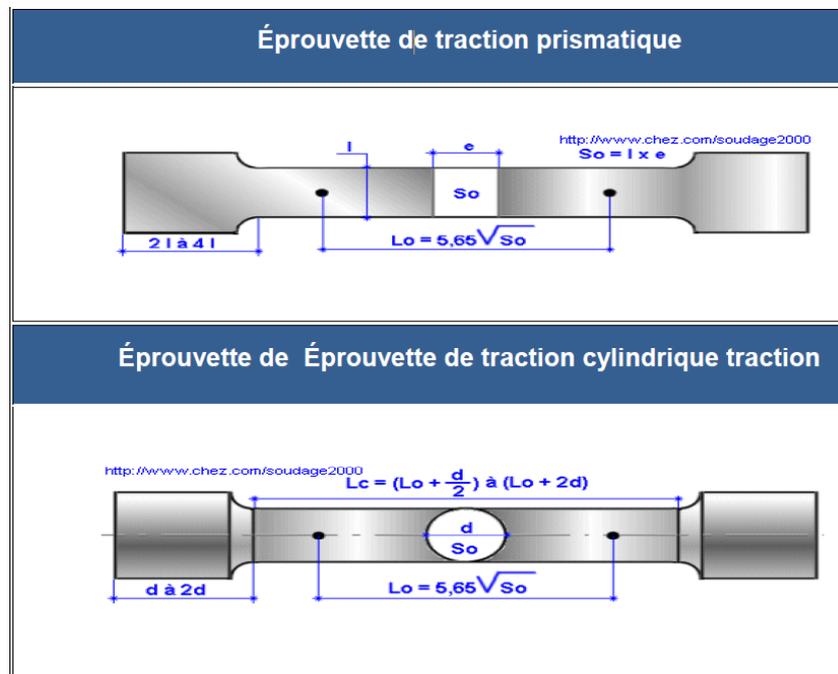


Figure IV.12 : Dimensions de l'éprouvette de traction

a) Les caractéristiques mécaniques de la traction

Tableau IV.3 : Caractéristique mécanique l'essai de traction

| Caractéristiques de traction | Formules de calculs |
|------------------------------------|---|
| Limite élastique apparente - R_e | $R_e \text{ (N/mm}^2\text{)} = F_e \text{ (Mpa ou N)} / S_0 \text{ (mm)}$ |
| Résistance à la rupture - R_m | $R_m \text{ (N/mm}^2\text{)} = F_m \text{ (Mpa ou N)} / S_0 \text{ (mm)}$ |
| Allongement en % - $A \%$ | $A \text{ (\%)} = ((L_u - L_0) / L_0) \times 100$ |
| Striction en % - $Z \%$ | $Z \text{ (\%)} = ((S_0 - S_u) / S_0) \times 100$ |
| Allongement de striction en % | $Z_u \text{ (\%)} = ((S_0 - S_u) / S_u) \times 100$ |

b) Procédé d'essais de traction :

Les essais de traction ont été effectués à l'aide d'une machine de traction de type PROF UND MESS SYSTEM N°8601 (Figure IV.13) directement reliée à un système informatisé d'acquisition de données expérimentales.



Figure IV.13 : Machine de traction.

Résultats :

Sur des éprouvettes en métal de base :

Les résultats de la contrainte-déformation obtenus sur le métal de base sont présentés à la Figure IV.14 et au Tableau IV.4. Il est donc préférable de travailler avec la moyenne des courbes ou d'utiliser directement les résultats obtenus lors du premier test (test 1).

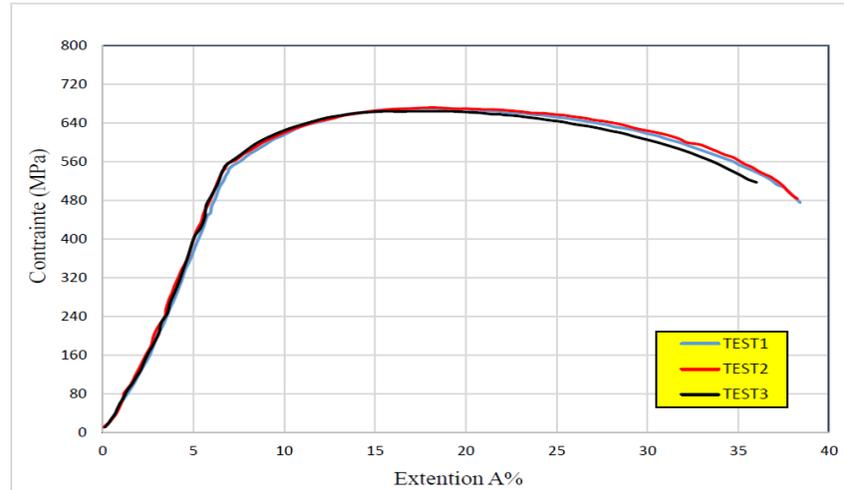


Figure IV.14 : Courbes d’essais de traction sur le métal de base

Tableau IV.4 : Résultats des essais de traction sur le métal de base

| N°d’essai /d’éprouvette | Largeur | Épaisseur | Re(MPa) | Rm(MPa) | A % |
|-------------------------|---------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 38,4 | 12,89 | 645 | 713 | 27,32 |
| 2 | 38,2 | 12,96 | 620 | 714 | 29,0 |
| 3 | 38,4 | 12,95 | 638 | 716 | 29,6 |

Sur des éprouvettes contenant le cordon de soudure :

Dans l’essai sur l’éprouvette contenant le bain de soudure, la déformation et la limite d’élasticité sont illustrées par (Figure IV.15) donnant un bon assemblage dans la zone de soudure (Tableau IV.5). deux courbes des test 2 et 3 ou bien utiliser directement les résultats obtenus par l’un des deux test (test2 ou test3).

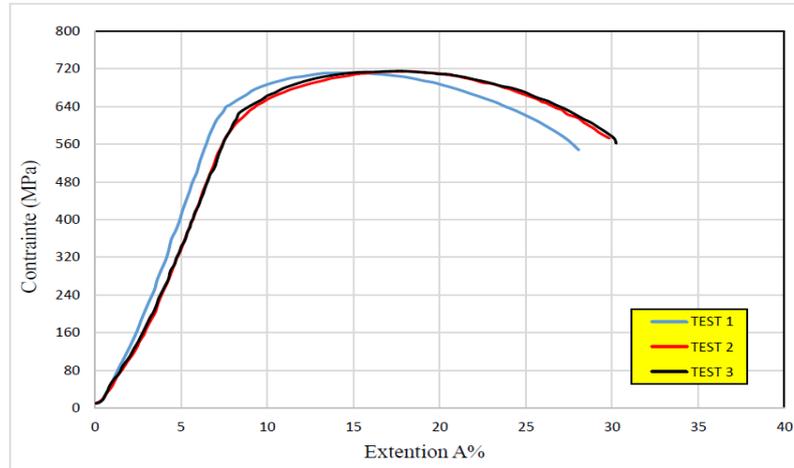


Figure IV.15 : Courbes d’essais de traction sur le métal content le cordon de soudage

Tableau IV.5 : Résultat d’essai de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure

| N°d’essai /d’éprouvette | Largeur r | Épaisseur | Re(MPa) | Rm(MPa) | A % |
|-------------------------|-----------|-----------|---------|---------|-------|
| 1 | 38,4 | 12,89 | 645 | 713 | 27,32 |
| 2 | 38,2 | 12,96 | 620 | 714 | 29,0 |
| 3 | 38,4 | 12,95 | 638 | 716 | 29,6 |

Discussion :

- ✚ Toujours la rupture de l’échantillon contenant le cordon de soudure, arrive au métal de base. une conséquence de la soudure (bigue position aussi le matériel de soudure.
- ✚ L’acier API 5L X70 possède des limites élastiques et à la rupture très élevée.

IV.4.5 Essai de DWTT (Drop Weight Tear Test) :

Utilisé pour déterminer les caractéristiques de rupture des pipelines et des récipients sous pression, les essais de déchirure à poids de chute (DWTT) sont un élément essentiel des programmes de qualification des matériaux pour les applications pétrolières et gazières et industrielles. Nos experts veillent à ce que vos matériaux soient adaptés à l’usage prévu dans des situations à haut risque et à haute pression. [29]



Figure IV.16 : Epreuve de DWTT

IV.4.6 Essai de pliage :

L'essai de pliage consiste à soumettre une éprouvette rectiligne de section pleine, polygonale à une déformation plastique par pliage. L'éprouvette est pliée jusqu'à l'obtention d'un angle spécifique.

L'essai de pliage est régi par la norme NF EN 910 [30]

Pour but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc d'un vérifier la ductilité. Ses résultats sont :

- Après pliage la surface tendue de l'éprouvette ne doit pas être fissurée
- L'éprouvette ne doit se rompre au pliage.

L'éprouvette de cette essai sont les mêmes utilisées dans l'essai de traction [31].

Préparation l'éprouvette :

L'essai de pliage est un essai qualitatif simple et bon marché qui utilisé pour déterminer tant la flexibilité que la résistance d'un matériau. Il est souvent utilisé comme essai de contrôle de qualité pour les soudures bout à bout. L'avantage de l'essai de pliage est que tant l'éprouvette de pliage que l'appareillage nécessaire pour l'essai sont simples. Des appareillages d'essai onéreux ne sont pas nécessaires, les éprouvettes sont faciles à réaliser et l'essai peut être réalisé à l'atelier. Le résultat peut être utile comme contrôle qualitatif pour assurer la continuité de la production



Figures IV.17 : a) Éprouvette de pliage

b) Machine de pliage

Résultat :

Tableau I V.6 : L'essai de pliage selon la norme API 5 LX70[31]

| | |
|---------|---|
| | Longueur de critique |
| Endroit | Dans le métal de base $\leq 1.5\text{mm}$ |
| Envers | Dans le cardon soudé $\leq 3\text{ mm}$ |

Exécute opération :



Figure IV.18 : Résultat final

IV.4.7 Essai de résilience (flexion par choc) :

Principe de l'essai résilience :

La résilience, de symbole général K , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre.



Figure IV.19 : Machine de résilience



Figure IV.20 : Un refroidisseur



Figure IV.21 : Eprouvettes de résilience

Important : Un afficheur numérique est intégré à la machine de résilience pour afficher directement l'énergie absorbée et l'angle de remontée. Nous avons réalisé quatre types d'éprouvettes:

Entaille effectuée au centre du métal de base (éprouvette complètement en métal de base)

Entaille effectuée au centre du cordon de soudure

Entaille effectuée au ZAT et ZAT+2.

Localisation des éprouvettes de résilience dans un cordon soudure :

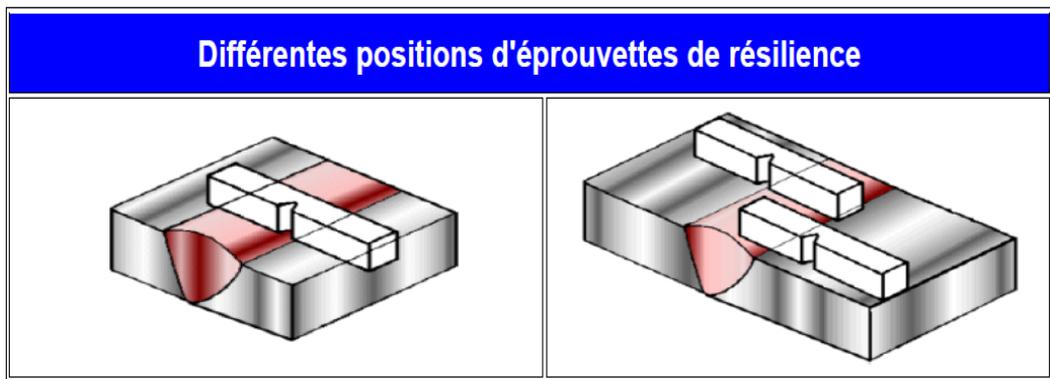


Figure IV.22 : Représente différentes positions de résilience

Les températures d'essais des résiliences :

Les éprouvettes du type (Charpy V) seront prélevés transversalement au sens de laminage la température de l'essai (-10°C) suivant la norme EN 10045-1 ou ASTM A370

Résultat :

Les résultats obtenus de l'énergie absorbée et de la résilience pour chaque type d'éprouvette sont présentés respectivement dans les tableau IV .7. Notant que la résilience est obtenue en divisant l'énergie absorbée par la section S de l'éprouvette($S=0.8\text{cm}^2$)

Tableau IV.7 : Les valeurs de la résilience et énergie absorbée pour les différentes zones

| Type de texte | L'énergie absorbe(j) | Resilience(j/cm^2) |
|--------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Métal de base (MB) | 173.9 | 286.1 |
| ZAT | 154.3 | 216.7 |
| Soudure | 154.2 | 234.1 |

Discussions :

Il est intéressant de remarquer que l'acier API 5L X70 est un acier ductile, ce qui justifie également son choix pour la fabrication des pipelines. En outre, on peut constater aussi que la ductilité diminue en s'approchant du cordon de soudure du fait que la ZAT est plus ductile que le cordon de soudure et moins ductile que le métal de base

Résilience que mesurer énergie par unité de surface

IV.4.8 L'essai de dureté :

Principe l'essai de dureté :

L'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer, un pénétrateur sous une charge d'appui F donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions de l'empreinte du pénétrateur laissée sur la surface du matériau contrôlé. L'empreinte est d'autant plus importante que le matériau est mou. Les essais de dureté caractérisent la résistance qu'offre un matériau à la pénétration. Suivant la norme NF EN ISO 6507-1

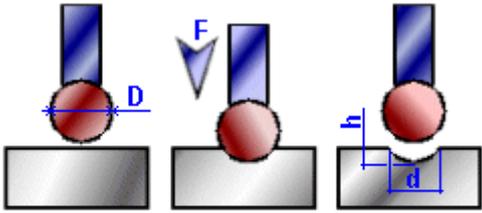
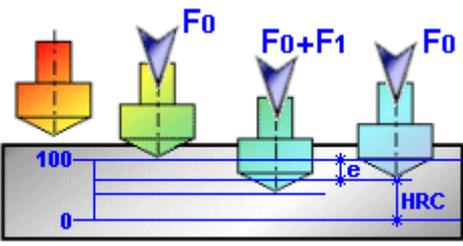
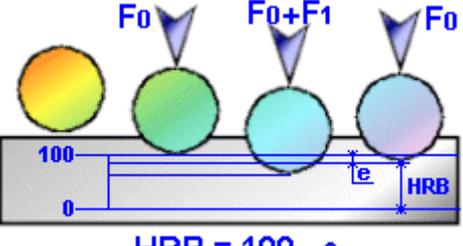
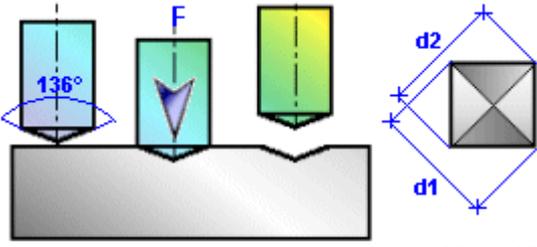


Figure IV.23 : Appareil mesuré la dureté HV



Figure IV.24 : Eprouvettes de dureté

Les différents types d'essais de dureté :

| Différents types d'essais de dureté | |
|--|--|
| Type d'essai | Observations |
|  $HB = \frac{0,102 \times 2(K \times 9,81 \times D \times D)}{3,14 \times D(D - \sqrt{(D \times D) - (d \times d)})}$ | <p>Essai Brinell - HB Le pénétrateur est une bille en acier trempé ou carbure de tungstène de Ø D sous une charge F en Newtons maintenue 15 secondes. On mesure le "d" de l'empreinte (d doit être compris entre 0,2 à 0,5 x D). K = 30 pour les aciers</p> |
|  $HRC = 100 - e$ | <p>Essai Rockwell C - HRC</p> <p>Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° d'angle et de charge égale à 1373 N. On mesure l'accroissement "e" en profondeur ou enfoncement rémanent.</p> |
|  $HRB = 100 - e$ | <p>Essai Rockwell B - HRB</p> <p>Le pénétrateur est une bille en acier trempé de 1,6 mm de diamètre et de charge égale à 883 N. On mesure l'accroissement "e" en profondeur ou enfoncement rémanent.</p> |
|  $HV = 0,189 \times \frac{F}{d \times d}$ $d = \frac{d1 + d2}{2}$ | <p>Essai Vickers - HV</p> <p>Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F. On mesure les diagonales "d" de l'empreinte.</p> |

IV.4.9 Essai Vichers HV :

L'essai consiste à appliquer un pénétrateur en diamant de forme pyramidale à base carrée basse sur le matériau à un angle de 136° au sommet, sous l'action d'une charge F maintenue pendant 15 secondes, et à mesurer la diagonale d'une empreinte après le retrait de la charge.

La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S. Elle est exprimée par un nombre sans unité, HV, suivi de la valeur de la charge,

Par exemple : 255 HV 30.

$$HV = (0.189) / d^2$$

Avec :

- ✚ F : force appliquée (N)
- ✚ d : valeur moyenne des diagonales de l’empreinte (mm)
- ✚ g : accélération terrestre (9,80665 m.s-1)

Arranger des éprouvettes :

En utilisant le reste de la plaque 2 (plaque qui contient le cordon de soudure), nous avons découpé une éprouvette de dimension 50mm × 30mm (Figure IV.25). Ensuite, nous avons effectué un polissage mécanique aux papiers abrasifs de carbure de silicium jusqu'à l'obtention d'une surface lisse. Afin de faire apparaître les différentes zones (métal de base, ZAT, cordon de soudure), une attaque chimique avec une solution de Nital (4% d'acide nitrique et 96% d'éthanol) a été effectuée. Enfin, l'éprouvette a été rincée avec de l'eau pour arrêter l'effet de l'attaque.

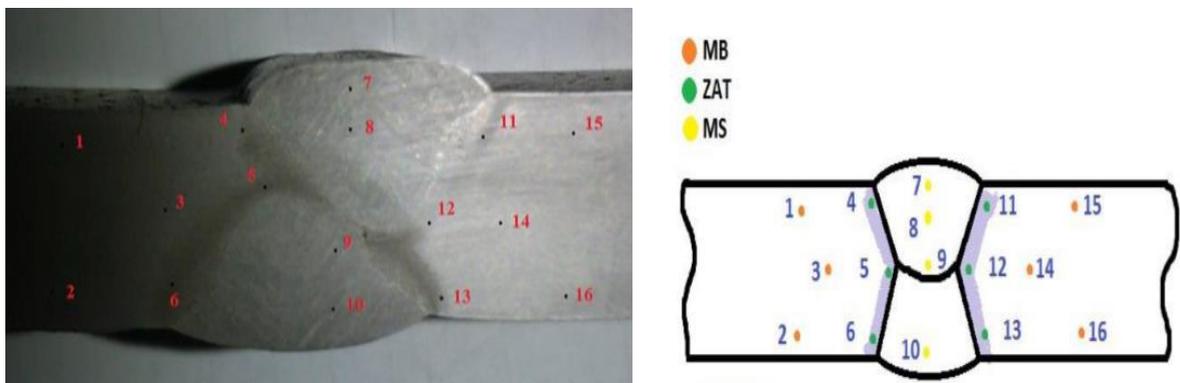


Figure IV.25 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones. [33]

IV.4.10 : Essais de micro dureté :

Calibré les essais de dureté sur la machine (ZWICK) HV10, étalonnée et certifiée, au laboratoire ALFAPIPE, sur des éprouvettes voir la Figure IV.26, comme la machine et assistée par ordinateur, qui nous a permet de tracer la courbe de la dureté



Figure IV.26 : Micro duromètre utilisée pour les mesures de la micro dureté (Type Vickers)

Résultat :

Les résultats obtenus en mesurant les différentes régions (voir Figure IV.25) sont résumés dans

Tableau IV.8 : en utilisant la notation suivante pour distinguer les différentes régions.

| ESSAISDEDURETE | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|-----|
| HV10(N/mm2) | | | | | | | | | | | | | | | |
| M B | M B | M B | Z T | Z T | Z T | S E | S E | SI | SI | Z T | Z T | Z T | M B | M B | MB |
| 21 6 | 21 3 | 22 1 | 20 1 | 20 3 | 2 0 6 | 23 3 | 2 3 5 | 23 2 | 23 0 | 2 0 5 | 20 2 | 19 9 | 21 5 | 21 3 | 217 |

Discussions :

La figure III.13 montre la variation des valeurs de micro dureté mesurées : 230HV, 227 HV, 228 HV et 237 HV, qui sont nettement plus élevées que dans la région des métaux de base, avec des pics beaucoup plus élevés dans la région des cordons de soudure.

Dans la région du cordon de soudure, on a constaté que les valeurs de micro dureté

obtenues à 7, SE et 10, SI étaient en plus élevées que celles obtenues à 8, SE et 9, SI. Un tel avantage peut être attribué au fait que le mode de refroidissement est relativement rapide dans la zone externe en contact avec l'air par rapport à la zone interne au centre du cordon de soudure.

Principe de l'essai :

Le but de l'essai de flexion par choc d'entaille est de déterminer la résistance du matériau à une défaillance soudaine. Il est souvent appelé "test d'impact Charpy" ou "test de Charpy". Le test est conçu pour mesurer l'énergie nécessaire pour séparer chaque fois un échantillon d'essai pré-coupé. Le vérin du pendule doit utiliser un couteau à son extrémité pour développer l'énergie qui lui est donnée au moment de l'impact.

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence entre l'énergie potentielle au début du pendule et à la fin de l'essai. La nouvelle machine doit être équipée d'un affichage numérique indiquant la hauteur du pendule au début et la position la plus haute que le pendule atteindra après que l'échantillon ait été en dommage. L'énergie obtenue (en ignorant les frottements)

$$W = m \times g \times h - m \times g \times h'$$

$$W = m \times g \times (h - h')$$

Avec :

- ✚ W : l'énergie absorbée (joule).
- ✚ M : masse du mouton-pendule [kg].
- ✚ g : Accélération terrestre [ms^{-2}](9.80665).
- ✚ H : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m].
- ✚ h' : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m].

Arranger des éprouvettes :

A partir du reste des deux plaques, nous avons découpé quatre parties de dimensions : 60 mm, 45 ° au niveau des zones suivantes :

- ✚ Métal de base (MB)
- ✚ Soudure au centre
- ✚ ZAT au centre
- ✚ ZAT+2 au centre

IV.5 Les essais semi destructifs :

- Prélèvement d'échantillons dans la soudure

IV.6 Les essais non destructifs (CND) :

IV.6.1 Introduction :

Le contrôle non destructif 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. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

Comme il existe plusieurs méthodes de contrôle non destructif nous allons parler des quatre les plus utilisées avec la méthode des ultrasons qui sera détaillée dans le prochain chapitre.

IV.6.2 Généralités sur le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (CND) consiste à rechercher la présence éventuelle de défauts au sein des matériaux constituant les objets ou parties d'objets à tester par l'utilisation de techniques diverses, sans attenter à l'intégrité de ceux-ci.

La mise en œuvre d'un contrôle non destructif demande la connaissance :

- Des possibilités et limites des procédés utilisables,
- De l'histoire de la pièce (forme et mode de fabrication),
- Des défauts recherchés (nature, position, dimensions, ...),
- Des propriétés physiques du matériau contrôlé.

Ces connaissances permettent de choisir :

- La méthode de contrôle la mieux adaptée,
- La procédure permettant :
- D'observer les défauts recherchés avec le maximum de chances de détection,
- De quantifier de façon la plus fidèle ces défauts.

IV.6.3 : Mise en œuvre des contrôles non destructifs :

La mise en œuvre correcte de contrôles non destructifs comporte trois volets :

- La qualification des opérateurs,
- Le choix des équipements,
- La définition des modes opératoires.

IV.6.4 : Principaux contrôles non destructifs :

Les contrôles non destructifs peuvent se classer en trois catégories :

- Les méthodes dites de surface pour lesquelles l'anomalie est localisée, soit en surface, soit dans une zone proche de la surface (Examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les courants induits),
- Les méthodes dites volumiques pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce (Ultrasons, rayonnements ionisants),
- Les méthodes complémentaires (Etanchéité, thermographie, émission acoustique).

| PROCEDE | DEFAUTS DE CIBLLES | AVANTAGES | LIMITES |
|------------------|--|--|---|
| Examen visuelle | -défauts de surface (manque de pénétration, caniveaux) -forme de cordon incorrect | -contrôle permanent pendant le soudage -peu couteux | -défauts de surface -pas de documents |
| Ressuage | -défauts de surface invisibles à l'œil (fissures débouchantes) | -simple d'emploi -peu couteux | - défauts de surface -pas de documents d'archive -interprétation délicate -non utilisable sur matériaux poreux |
| Magnétoscopie | -défauts de surface (fissures, manque de pénétration,...) | -méthode sensible et simple -peu couteux | -défauts de surface -interprétation délicate -utilisable que sur matériaux ferromagnétiques |
| Rayons ionisants | -défauts volumiques porosité, inclusions, manque de pénétration, | -détection de défauts internes -résultats archivables | -matériel couteux -opérateur qualifié -sensibilité fonction de l'orientation du défaut |

Tableau IV.9 : principaux contrôles non destructifs.

IV.6.5 Examen visuel :

Principe du contrôle :

L'examen visuel est le premier des procédés de contrôle, le plus simple et le plus général puisque c'est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

•Principe du contrôle :

Le ressuage comprend trois phases illustrées sur la « Figure IV.28 » :

Application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « Révélateur » sur la surface. À la suite de quoi, l'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure ou l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance. [34]. [35].

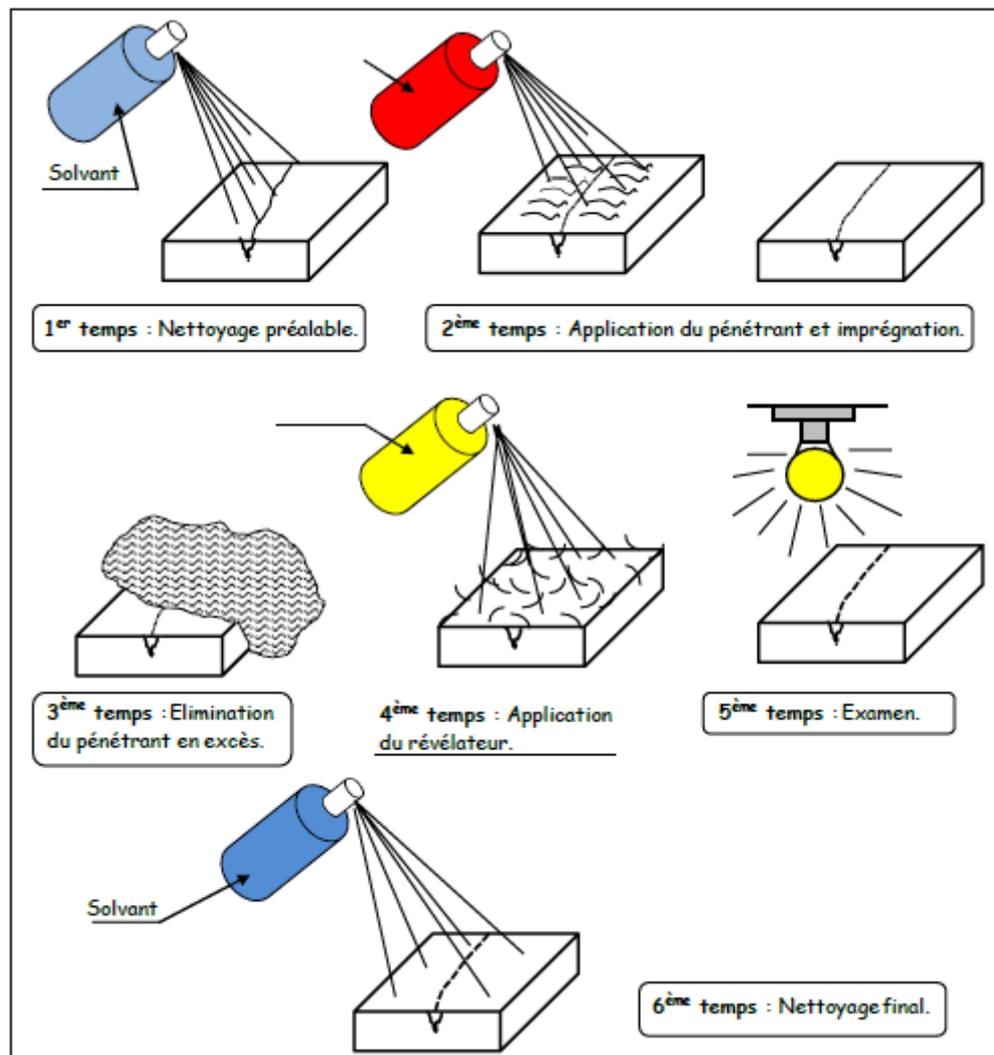


Figure IV.28 : contrôle par ressuage.

1er temps : Nettoyage de la surface à contrôler de toutes traces de matériaux étrangers solides ou liquides qui risqueraient de gêner l'entrée du pénétrant dans les discontinuités.

2ème temps : Application du pénétrant sur toute la surface à examiner et maintien d'une couche continue de pénétrant pendant tout le temps d'imprégnation.

3ème temps : Elimination du pénétrant étalé à la surface de la pièce (c'est une phase très délicate : il ne faut pas enlever le pénétrant situé dans les défauts).

4ème temps : Application régulière du révélateur sur toute la surface à examiner.

5ème temps : Pendant et après développement des indications, inspection soignée en lumière blanche ou/et sous lumière ultraviolette pour repérer la présence, localiser, donner la « nature » et la « grandeur » des discontinuités débouchant à la surface.

6ème temps : Nettoyage de la pièce pour éliminer toutes traces de produits de ressuage.

Procédure de contrôle :

La mise au point d'un contrôle par ressuage réclame la détermination précise :

- Des conditions de préparation de la pièce,
- De la nature des produits de ressuage,
- Des conditions d'application du pénétrant,
- Des conditions de nettoyage,
- Des conditions d'application du révélateur,
- Des conditions d'examen.

Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme à respecter. Le lecteur se reportera aux normes NF A 09-120, NF A 09-122, NF A 09-123, NF A 09-130.

IV.6.7 Contrôle par rayons ionisants (Radiographie) :

L'examen de la structure ou de la sante interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas, comme l'illustre la Figure IV.29. Selon le même principe, on peut obtenir des images en utilisant d'autres particules que les photons et ainsi mettre en œuvre des techniques. [34]

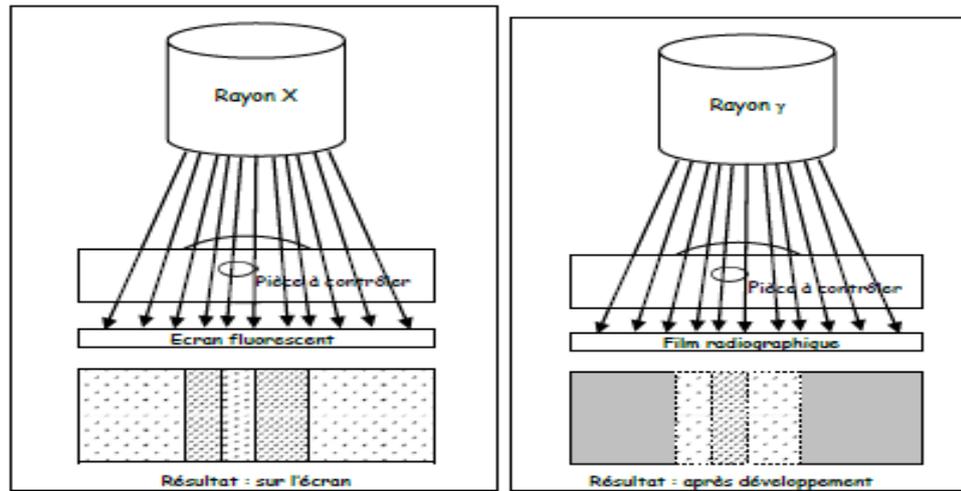


Figure IV.29 : a) Radioscopie

b) Radiographie

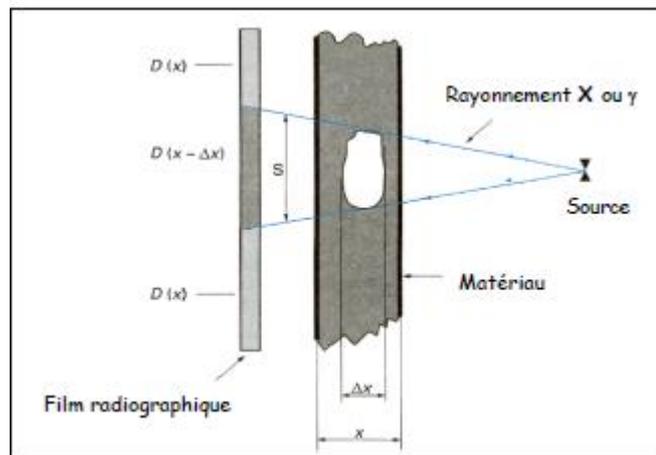


Figure IV.30 : Contrôle par radiographie.

-Principe du contrôle :

Le contrôle par rayonnements ionisants est le suivant :

- La pièce est soumise à l'action d'une source de rayonnement. Le rayonnement sortant de la pièce est fonction de l'épaisseur traversée. Au droit d'un défaut, l'intensité transmise sera plus élevée ou plus faible.
- Une image se forme sur le film après exposition pendant un temps donné fonction du matériau, de l'épaisseur et de la puissance de la source, de la qualité du rayonnement.
- Le film est développé et interprété sous un éclairage adapté. [34]. [35].

- Méthode de contrôle :

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par :

- L'impression de films photographiques,

- L'utilisation d'écrans fluorescents et caméras de télévision,
- L'utilisation de détecteurs de rayonnements.

Par la suite, nous ne traiterons que le cas de la radiographie. Pour chaque contrôle, il existe un cahier des charges ou une norme à respecter. Le lecteur se reportera aux normes NF EN 444, NF EN 462-1, NF EN 462-2, NF A 89-550, NF A 89-551, NF A 89-552, NF A 89-562, NF A 89-565.

-Le film radiographique

Les films sont constitués d'un support plastique recouvert sur les deux faces d'une émulsion de sels d'halogénures d'argent dans une couche de gélatine. Une des caractéristiques des films est la taille du grain. Les films à gros grains sont plus rapides que les films à grains fins, mais la définition des images est plus faible.

-Visibilité des défauts :

Cette visibilité des défauts est déterminée par les facteurs suivants :

- La nature et l'épaisseur traversée par le rayonnement du défaut,
- Les facteurs géométriques (distance du foyer de la source au film par exemple) qui vont conditionner la netteté des contours du défaut (problème de flou),
- Les propriétés du film (granulation, voile de base, présences d'écrans filtrants et (Ou) de renforçateurs),
- La qualité du rayonnement utilisé.

-Qualité du contrôle :

Pour apprécier la qualité de l'image radiographique, il faut la traduire sous forme numérique. Pour cela, on utilise des indicateurs de qualité d'image (IQI). Ils sont placés au contact de la pièce face à la source de rayonnement. L'image de l'IQI sur le film traduira la qualité de l'image.

Les principaux IQI utilisés sont les suivants:

- Indicateurs à fils (utilisés dans la plupart des pays européens),
- Indicateurs à gradins percés (utilisés surtout en France),
- Indicateurs à plaquettes percées (utilisés aux USA).

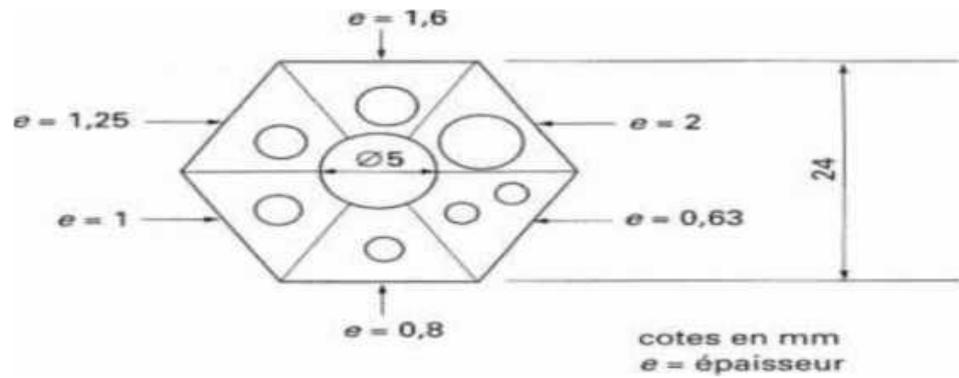


Figure IV.31 : Exemple d'indicateur de qualité d'image (IQI).

-Protection :

L'emploi de source de rayonnement demande le respect des réglementations sur la sécurité des opérateurs de contrôle.

IV.6.8 Contrôle par ultrasons :

Les ondes ultrasonores 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 caractéristiques 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 traducteur 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].

Matériel mis en œuvre :

Postes U.S. analogiques ou numériques

Transducteurs OL, OT et à angles variables

Mesureurs d'épaisseurs

Logiciels de saisi et de suivi des mesures d'épaisseurs

IV.6.9 Examen ultra-sons :

La surveillance interne de la qualité de la soudure spirale a lieu immédiatement après le soudage à l'aide d'installation automatique. Ils existent deux examens aux ultra-sons, l'un est fait pour le contrôle de la soudure, l'autre est fait pour le contrôle et la détection du dédoubleurs.



Figure IV.32 : Examen ultra son

IV.7 Conclusion :

On détermine pour chaque soudure une classe de qualité qui fixe les conditions nécessaires et suffisantes, à prescrire à la conception et à respecter à la fabrication, pour obtenir un assemblage capable de supporter sans dommage les contraintes en service, ainsi que celles qui peuvent résulter de la fabrication.

D'une façon générale, la définition d'une classe de qualité doit tenir compte :

D'une part, des sollicitations en service auxquelles est soumis le joint soudé, d'autre part, de l'emplacement et de l'importance du joint soudé dans la construction.

Dans un ensemble soudé chaque joint soudé, ayant une importance propre et ,tant soumis à des sollicitations différentes

Les méthodes de contrôle non destructif sont appliquées souvent sur les joints de soudures

Quel que soit le procédé de soudage utilisé, les contrôles non destructifs sont nécessaires pour qualifier les pièces à assembler.

Conclusion générale :

Ce travail nous a permis de bien maîtriser l'aspect matériaux utilisés dans la fabrication des pipelines et d'acquérir de nouvelles connaissances sur leurs procédés de fabrication, et précisément ceux utilisés l'usine Alphapipe.

Bien que la technologie du soudage adoptée (SMAW et SAW) est très efficace, néanmoins on a pu constater quel que précautions prendre en compte :

- Pour avoir un faible taux de défauts et les niveaux élevés de résilience. Il faut un ajustement de la composition du fil d'apport à celle de l'acier utilisé X70, dans le but d'avoir un soudage le plus homogène possible pour éviter la fissuration causée par les contraintes de dilations thermique des différents matériaux.
- Aussi l'adaptation appropriée de l'énergie de soudage par rapport à une vitesse de soudage donnée est nécessaire pour avoir une soudure de bonne qualité, l'énergie de soudage et représentée par la tension et le courant de soudage pour les deux face du cordon tout en tenant compte de la forme des bords à souder ainsi que l'utilisation de la formule Eq1 , E2 et Eq3.

Les 3 essais de traction ont montré que la rupture se manifeste loin du cordon de soudure et dans les tous les essais ; la rupture se produit dans le métal de base. Ce qui qualifie l'acier X70 à être utilisé pour ce procédé en toute satisfaction de la qualité.

L'utilisation des procédés SAW et SMAW, et suivant les essais de choc, de pliage, de la dureté et l'essai de la résilience, on a constaté que les résultats obtenus sont très satisfaisants avec l'utilisation de l'acier X70, et représente les avantages suivants :

- Taux de dépôt élevé,
- Pénétration profonde, permettant de déduire la quantité de matériau d'apport,
- Haute qualité de la soudure
- Environnement de travail amélioré par rapport à l'autre procédé de soudage

En reste à souligner que le procédé SMAW présente quelques défauts par rapport au procédé SMAW qui sont les inclusions de laitiers et le manque de pénétration.

Les inclusions de laitier reviennent à l'utilisation d'électrode enrobées qui favorise l'apparition, sur le joint, d'une couche de laitier qui doit être éliminée à la fin du soudage au moyen d'un marteau à piquer ou d'une brosse métallique.

Le manque de pénétration est fréquent avec électrode surtout si la forme du joint n'est pas régulière.

Référence Bibliographies

- [1] <https://www.google.dz/maps/place/ALFAPIPE> (2015)
- [2] alfapipedz.com/spip.php?article15 (2010)
- [3] alfapipedz.com/spip.php?article12 (2010)
- [4] laboratoire mécanique Alfapipe Ghardaïa
- [5] documentation ALFAPIPE Ghardaïa
- [6] laboratoire mécanique Alfa pipe Ghardaïa
- [7] alfapipedz.com/spip.php?article15 (2010)
- [8] alfapipedz.com/spip.php?article14 (2010). Nafta News, document numérique, a partir : www.naftal.dz (2010)
- [9] Pierre HOUSSIN, Georges WESSELS Des matériaux (Jean-Paul Bailon)
- [10] BOUMELITA Yassine < Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier API X70 en fonction de la succession des réparations Application dureté> thème de master mécanique de matériaux 2017.
- [11] sonatrach.com/transport-par-canalisation.html (2015)
- [12] :Gartner A.W, Graf .M .K et Hillenbrand .H .G. (1992) a producer's view oflargediameter line pipe in the next decade in: the international conference onpipeline reliability. Calgary
- [13] Des matériaux (Jean-Paul Bailon).
- [14] Dr. HADJOUI Fathi
- [15] American society for métal ASM Ohio, USA 1985 p. 259 et suivi.
- [16] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Teste, p. 329-377, Internatl. Student Edition McGraw-Hill, 1976.
- [17] YAGOUB ABDERRAHMANE (Etude expérimentale et simulation numérique de l'effet de différents types de défauts sur le comportement mécanique de l'acier API 5L X70)

Mémoire de fin d'études Pour l'obtention du diplôme master Université M'Hamed Bougara - Boumerdes - Faculté de science d'ingénierie INGM 2019/2020

[18] MEZRAG Bachir (Etude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenu par soudage à l'arc MIG-CMT.) THESE EN COTUTELLE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR Université Abou Bekr BelKaid-Tlemcen 10 septembre 2015

[19] K. Weman. Aide-mémoire : procédés de soudage. Dunod Paris, 2005.

[20] Mostefa BENEDDEB. " Étude les défauts de soudage des pipelines" mémoire de MASTER, Université Mohamed Khider Biskra. pp2.

[21] F. Aissaoui, « Comportement mécanique des soudures par points. Effets d'arrangement des points de soudures dans le cas des tôles en acier inoxydable. » Mémoire de fin d'étude de l'université de Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 24 juin 2018.

[22] BELABED Abdelmadjid (Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angle) Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 06/06/2017.

[23] AMER HAMAI, YOUNES MADJOUR (Contrôle qualité des soudures X52M réalisées par les procédés SAW et SMAW) Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou me 2014

[24] Roland CAZES. "Soudage à l'arc" techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage. Article B7730.

[25] MOUICI Derradji (Procédé 121 Arc automatique sous flux solide) Alfapipe 11/03/2014

[26] Comité sectoriel de la main-d'œuvre de la fabrication métallique industrielle, "Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage", Edition CSMOFMI, Québec. pp160, pp 164,pp167

[27] Gilbert Riverin .. Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage

- [28] <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap4/site/html/3.html> (2010).
- [29] <https://www.element.com/materials-testing-services/drop-weight-tear-test-dwtt-methods>.
- [30] <https://www.rocdacier.com/essai-de-plier-selon-910/>
- [31] O. Bouledroua Qualification d'un Acier API 5L X70 : Etude Expérimentale et Validation Numérique Article · June 2015
- [32] BOUCHELLIGA HOCINE « Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 D'ALFAPIPE » mémoire de master en génie de matériaux. Université badji Mokhtar Annaba 2016
- [33] Gubicza J., Juhasz A. et Voros G.(Determination of the hardness and elastic modulus from continuous Vickers indentation testing) Journal of materials science. 31(12), p. 3109, 1996.
- [34] Jacques DUMONT-FILLON : Contrôle non destructif.
- [35] . DUBRESSON (J.). – Caractéristiques dominantes et évolution des matériels de CND. Soudage et Techniques connexes nov. déc. 1991.
- [36] H.El bakouri. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide ortho phosphorique par un antibiotique organique. Mémoire pour du DESA. Université Mohammed
- [37] Contrôle non destructif des assemblages soudés (normes).
Diffusée par AFNOR 1997.

Résumés

Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions de Transport élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité. De plus, la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation Rapide de fissures et de défauts divers

L'apparition de fissures et de défauts divers est un problème complexe dans la fabrication de pipelines

Par conséquent, le tuyau doit passer une série de tests avant et après la fabrication pour surveiller la qualité de l'acier et du soudage.

Dans cette étude, la qualité de l'acier API 5L X70 et du soudage (SAW et SMAW) sont étudiées par un ensemble d'essais destructifs et non destructifs pour détecter les défauts de fabrication avant l'utilisation effective de ces pipelines par les entreprises de transport de gaz .

Saw : Soudage à l'arc submergé, **Smaw** : Soudage à l'arc sur métal blindé, **HLE** : aciers à haute limite d'élasticité, **DWTT** : Test de larme de poids de chute, **API** : Normes de l'Institut américain du pétrole, **Cnd** : control non destructive, **SPF** : spécification de procédé de fabrication

Summary

Transporting gas under economic conditions requires the use of high transport pressures, and therefore the use of steels with high yield strength. In addition, the safety of installations requires good toughness to avoid the ruin of the structure by rapid propagation of cracks and various faults.

The appearance of cracks and various defects is a complex problem in the manufacture of pipelines.

Therefore, the pipe must pass a series of tests before and after fabrication to monitor the quality of the steel and welding.

In this study, the quality of steel API 5L X70and welding (SAW et SMAW) are investigated by a set of destructive and non-destructive tests to detect manufacturing defects before the actual use of these pipelines by gas transport companies.

Saw : submerged arc welding ,**Smaw** : Shielded metal arc welding, **HLE** : steels with high yield strength, **DWTT** : Drop Weight Tear Test, **API** : American Petroleum Institute Standards, **Cnd** : non-destructive control, **SPF**: manufacturing process specification

ملخص

يتطلب نقل الغاز في ظل الظروف الاقتصادية استخدام ضغوط نقل عالية ، وبالتالي استخدام فولاذ ذو قوة إنتاجية عالية. بالإضافة إلى ذلك ، تتطلب سلامة التركيبات صلابة جيدة لتجنب خراب الهيكل عن طريق الانتشار السريع للشقوق و مختلف العيوب .

يعد حدوث الشقوق و مختلف العيوب مشكلة معقدة في تصنيع الانابيب لذلك يجب ان يمر الانبوب على مجموعة من الاختبارات قبل و بعد التصنيع لمراقبة جودة الفولاذ و اللحام .

في هذه الدراسة يتم دراسة الفولاذ و جودة اللحام بمجموعة من الاختبارات المدمرة و الغير مدمرة للكشف عن عيوب التصنيع قبل الاستخدام الفعلي لهذه الانابيب من طرف شركات نقل الغاز.

اختبار : **DWTT**, معايير معهد البترول الأمريكي : **API**, لاختبار غير المدمر : **Cnd**, معايير معهد البترول الأمريكي : **API** اللحام بالقوس المعدني المحمي : **Smaw**, لحام القوس المغمور : **Saw**, مواصفات عملية التصنيع : **SPF** انخفاض الوزن المسيل الفولاذ ذو قوة الخضوع العالية : **HLE**,