

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة بأجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénieur

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : METALLURGIE

Thème

Soudage et caractérisation des tubes HLE de l'unité ALFAPIPE Annaba

Spécialité : Génie Métallurgique

PRESENTE PAR : GUERNOUB YASSINE

Dirigé par : Dr DEKHIL Leila

Université d'Annaba

Co- encadreur : Mr BELLAHRACHE.T

Entreprise ALFAPIPE Annaba

Jury de soutenance:

Président : Pr MEBAREK.A

Université d'Annaba

Examineur : Dr HACINI.M

Université d'Annaba

Session Juin 2019

DEDICACE

Je dédie ce travail :

• A mes parents ;

• A ma famille ;

- A mes amis ;

- A tous mes enseignants ...

GUERNOUB Yassine...

REMERCIEMENTS

Dans cette salutation ;

Je remercie tout d'abord dieu de toute chose.

Deuxièmement, je remercie tous les enseignants du département de métallurgie et génie des matériaux surtout Dr Dekhil.L qui m'a encadré et a suivi avec attention l'évolution de mon travail.

Ainsi, je remercie Mr Bellahrache.T et toute équipe de l'entreprise ALFAPIPE Annaba, aussi les responsables dans ENSMM Annaba.

Enfin, je tiens à remercier très sincèrement mon père, ma chère maman et mes frères surtout ma sœur Dr Lemya.G qui m'encourage et me donne beaucoup de conseils.

Merci à tous !

SOMMAIRE

Résumé.....	1
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Généralités

Introduction	3
I.1.Présentation du lieu de stage.....	3
I.1.1.Structure de l'unité.....	4
I.1.2.Organigramme de l'unité ALFAPIPE Annaba	4
I.1.3.Les produits de l'unité ALFA PIPE Annaba	5
I.2.Les opérations principales pour la fabrication des tubes soudés en spirale	6
I.2.1.Stockage des bobines	6
I.2.2.Basculeur des bobines.....	6
I.2.3.Machine de préparation bobine.....	6
I.2.4.Machine à souder	7
I.2.5.Le rabotage.....	7
I.2.6.Le Guidage	7
I.2.7.Dressage bande.....	7
I.2.8.Cisailage.....	7
I.2.9 Formage de la bande.....	8
I.2.10.Le soudage	8
I.2.11.Tronçonneuse des tubes.....	9
I.2.12.Nettoyage tube.....	10
I.3.Contrôles non destructifs	11
I.3.1.Contrôles des bobines	11
I.3.2.Contrôles visuels	11
I.3.3.Zone de réparation.....	12
I.3.4.Banc d'essais hydrostatique	12
I.3.5.Deux chanfreineuses des tubes.....	12
I.3.6.Ultra-sonique des extrémités de tube	13
I.3.7.Deux machines de contrôle radiographique et radioscopique	13
I.3.8.Zone de contrôle final	14

I.4. Contrôles destructifs.....	14
I.4.1. Essais réalisés	14
I.4.2. Analyses chimiques	14
I.4.3. Essai de traction	14
I.4.4. Essai de pliage	15
I.4.5. Essai de résilience.....	15
I.4.6. Essai de macro dureté.....	15
I.5. Revêtement extérieur et intérieur.....	15
I.5.1. Revêtement extérieur.....	15
I.5.1.1. Préparation de la surface	15
I.5.1.2. Revêtement de tubes	16
I.5.1.3. Brossage des tubes	17
I.5.2. Revêtement intérieur	18
I.5.2.1. Installation de l'atelier.....	18
I.5.2.1.A. Sécheur.....	18
I.5.2.1.B. La ligne de grenailage intérieur	19
I.5.2.1.C. Machine d'époxy	19
I.5.2.1.D. Marquage.....	19
I.6. CONCLUSION	19

Chapitre II : Acier HLE

II.1. Généralité sur les aciers	20
II.1.2. Histoire de l'acier	20
II.1.3. Fabrication de l'acier	21
II.2. Acier HLE.....	21
II.2.1. Introduction à l'acier HLE.....	21
II.2.2. Le laminage à chaud des aciers HLE.....	22
I.2.3. Bobinage	23
II.3. Caractéristiques des Aciers HLE.....	24
II.3.1. Propriétés mécaniques	24
II.3.2. Propriétés métallurgiques.....	24
II.3.2.1. Influence de la composition chimique	24
II.3.2.2. Influence des éléments de substitution	25
II.3.2.3. Influence des éléments formants des précipités	26
I.3.3 Influence de la perlite	28
II.4. Mécanismes de durcissements des aciers HLE.....	29
II.4.1. Solution solide.....	29

II.4.2.Précipitation.....	29
II.4.3.Dispersion.....	30
II.4.4.Affinement du grain	30
II.4.4.1.Affinement du grain γ	30
II.4.4.2.Affinement du grain α	31
II.4.5.Traitements thermiques.....	31
II.5.Avantage des aciers HLE.....	32

Chapitre III : Soudage des aciers HLE

III.1.Introduction	33
III.2.Les différents types de soudage	33
III.3.Soudage à arc submergé sous flux SAW.....	33
III.3.1.Principe du procédé.....	33
III.3.2.Domaine d'application	36
III.3.3.Avantages du procédé.....	36
III.3.4.Inconvénients du procédé.....	37
III.3.5.Influence des paramètres de soudage.....	37
III.3.6.Sources de puissance et équipement.....	38
III.4.Aptitude au soudage et critère de soudabilité	38
III.4.1.Comment déterminer la soudabilité.....	38
III.4.2. Influence de la composition chimique sur la Soudabilité.....	39
III.5.Les défauts de soudure	43
III.5.1.Défauts de soudage à arc submergé sous flux	43
III.5.1.1.Porosités.....	43
III.5.1.2.Fissures	44

Chapitre IV : Etude de soudage et caractérisation des tubes

IV.1.Opération de soudage	45
IV.1.1.Paramètres de soudage	45
IV.1.2.Calcul l'angle de production	45
IV.1.3.Fil de soudage	46

IV.1.3.B. Caractéristiques mécaniques du fil.....	47
IV.1.4.Flux de soudage.....	47
IV.2.Contrôles destructifs et caractérisation des tubes.....	50
IV.2.1.Prélèvement des échantillons	50
IV.2.2.Préparation des éprouvettes.....	50
IV.2.2.1.Aplatissement	50
IV.2.2.2.Découpage.....	51
IV.2.2.3.Usinage.....	51
IV.2.3.Analyses chimiques, essais mécaniques et observation métallographique.....	52
IV.2.3.1. Analyses chimiques	52
IV.2.3.1.A. Analyse chimique par spectromètre à étincelle	52
IV.2.3.1.A.a. Définition.....	52
IV.2.3.1.A. b. Le carbone équivalent de l'acier.....	54
IV.2.3.1.A. c. Eprouvette d'analyse chimique API 1104.....	55
IV.2.3.1.A.d. Résultat d'analyse chimique	55
IV.2.3.1.B. Analyse chimique par microscope électronique à balayage MEB équipé des sondes EDS de ENSMM Annaba	56
IV.2.3.1.B. a. Définition.....	56
IV.2.3.1.B. b. Avantages.....	56
IV.2.3.2. Essai mécaniques.....	58
IV.2.3.2.1.Essai de traction	58
IV.2.3.2.1.A. Définition.....	58
IV.2.3.2.1.B. Eprouvettes de traction.....	59
IV.2.3.2.1.C. Exigences des valeurs de traction selon API.....	61
IV.2.3.2.1.E. Résultats d'essai de traction	61
IV.2.3.2.1.F. Etude comparative entre A%, Rm et E _{0,5} certificat et A%, Rm et E _{0,5} mesuré sur tube des 25 tubes de même série.....	62
1.Comparaison entre A% certificat et A% mesuré sur tube	62
2.Comparaison entre Rm certificat et Rm mesuré sur tube.....	64
3.Comparaison entre E _{0,5} certificat et E _{0,5} mesuré sur tube	66
IV.2.3.2.2. Essai de pliage	68
IV.2.3.2.2.A. Définition.....	68
IV.2.3.2.2.B. Eprouvettes de pliage	69
IV.2.3.2.2.C. Résultats d'essai de pliage	69
IV.2.3.2. 3.Essai de résilience.....	69
IV.2.3.2.3.A. Définition de principe d'essai.....	69
IV.2.3.2.3.B. Relation de résilience	71
IV.2.3.2.3.C. Schématisation de l'essai de résilience	71
IV.2.3.2.3.D. Eprouvettes de résilience API 1104	72
IV.2.3.2.3.E. Exigences des valeurs de résilience selon API 5L en ALFAPIPE	73

IV.2.3.2.3.G. Résultats d'essai de résilience à T= -10 C°	73
IV.2.3.2.4. Essai de dureté.....	74
IV.2.3.2.4.A. Définition.....	74
IV.2.3.2.4.B. Essai de la dureté Vickers HV	74
IV.2.3.2.4.C. Essai de macro dureté Vickers HV10 en ALFAPIPE	75
IV.2.3.2.4.D. Exigences des valeurs de la dureté Vickers HV selon API 5L en ALFAPIPE.....	77
IV.2.3.2.4.F. Résultats de macro dureté HV10	77
IV.2.3.3. Observation métallographique	79

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Organigramme de l'unité ALFAPIPE	5
Figure I.2 : Stockage des bobines.....	6
Figure I.3 : Machine de préparation des bobines.....	7
Figure I.4 : Machine Rabotage, guidage, dressage, Cisailage	8
Figure I.5 : Le soudage.....	9
Figure I.6 : Tronçonneuse des tubes.....	10
Figure I.7 : Nettoyage du tube.....	11
Figure I.8 : Contrôle visuel.....	11
Figure I.9 : Test hydrostatique.....	12
Figure I.10 : Contrôle par ultrasons.....	13
Figure I.11 : Contrôle par rayons X	14
Figure I.12 : Les trois couches du revêtement extérieur.....	17
Figure I.13 : Revêtement intérieur du tube en résine époxy	18

Chapitre II

Figure II.1 : Durcissement en fonction de la taille et de la quantité des précipités.	31
Figure II.2: Intérêt de la combinaison de deux éléments de microalliage pour le durcissement	31

Chapitre III

Figure III.1 : Machine de soudage à l'arc submergé sous flux à ALFAPIPE.....	34
Figure III.2 : soudage à arc submergé sous flux (SAW)	35
Figure III.3 : soudage extérieur du tube par le procédé SAW dans ALFAPIE	35
Figure III.4 : Dureté sous cordon et fissuration d'un acier microallié (méthode des implants)[6].....	40
Figure III.5 : Influence d'une addition de niobium ou de vanadium sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT)[6].....	41
Figure III.6 : Influence du revenu sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT)[6]	42
Figure III.7 : Les différentes zones de soudure	42

Figure III.8 : porosités	44
Figure III.9 : fissure à froid	44

Chapitre IV

Figure IV.1 : Le fil de soudage	47
Figure IV.2 : le flux de soudage.....	48
Figure IV.3 : résultats d'analyse EDS sur la zone fondue	49
Figure IV.4 : prélèvement d'échantillon	50
Figure IV.5 : Presse hydraulique	50
Figure IV.6: Scie mécanique à ruban semi automatique.....	51
Figure IV.7 : Fraiseuse PMO FU1.5	51
Figure IV.8 : spectromètre à étincelle de type SECTROLAB.....	52
Figures IV.9 : échantillon après observation	52
Figure IV.10 : résultats d'analyse EDS sur métal de base.....	57
Figure IV.11 : Machine de traction de type Z1200 ZWICK/ROELL	58
Figure IV.12: éprouvette de traction après rupture.....	58
Figure IV.13 : courbe conventionnelle de traction	59
Figure IV.15 : dimensions d'éprouvette suivant la norme EN10002	60
Figure IV.16: courbe de TN et TS du tube B2222	61
Figure IV.17: comparaison entre A% certificat et A% mesuré sur tube	63
Figure IV.18 : comparaison entre Rm certificat et Rm mesuré sur tube.....	65
Figure IV.19 : comparaison entre E _{0,5} certificat et E _{0,5} mesuré sur tube.....	67
Figure IV.20 : machine de pliage de type Z1200 ZWICK/ROELL	68
Figure IV.21 : éprouvettes de pliage ED et EV après l'essai	68
Figure IV.22 : éprouvette de résilience type V.....	70
Figure IV.23: machine de résilience de type PSW750 ZWICK/ROELL	70
Figure IV.24 : éprouvette après l'essai	70
Figure IV.25 : schématisation de l'essai de résilience [14].....	71
Figure IV.26 : méthode d'obtention des trois types d'éprouvettes de résilience	72
Figure IV.27: éprouvette de résilience type V.....	72
Figure 28: courbe d'énergie absorbée en fonction d'éprouvette.....	73
Figure IV.29 : schéma d'essai de dureté Vickers.....	74
Figure IV.30 : Préparation des échantillons par polissage à l'aide d'un papier abrasif.....	75
Figures IV.31: Mesure de dureté dans les trois zones par duromètre HV10 ZWICK.....	76

Figure IV.32 : nuage des points de dureté HV10.....	78
Figure IV.33 : microscope optique type Nikon.....	80
Figure IV.34 : microscope électronique à balayage (MEB) type QUANTA 250	80

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Tableau des caractéristiques des tubes fabriquées	5
---	---

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API 5L	24
Tableau II.2 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers	28

Chapitre IV

Tableau IV.1 : paramètres de soudage d'une machine (A)	45
Tableau IV.2 : variation de la vitesse de soudage.....	46
Tableau IV.3 : composition chimique du fil de soudage	46
Tableau IV.4 : valeurs d'essai de tction du fil de soudage.....	47
Tableau IV.5 : composition chimique de flux de soudage	48
Tableau IV.6 : composition chimique du métal de base	53
Tableau IV.7: pourcentage min et max des éléments.....	53
Tableau IV.8 : dimensions d'éprouvette d'analyse chimique.....	55
Tableau IV.9 : Résultats d'analyse chimique de métal de base du tube.....	55
Tableau IV.10 : dimensions d'éprouvette de traction soudure	60
Tableau IV.11 : exigences des valeurs de traction.....	61
Tableau IV.12 : valeurs d'essai de traction du tube.....	62
Tableau IV.13 : valeurs d'allongement A%.....	63
Tableau IV.14 : valeurs de la résistance à traction Rm	65
Tableau IV.15 : valeurs de $E_{0.5}$	66
Tableau IV.16 : exigences d'essai de pliage selon API 5L	69
Tableau IV.17 : Epreuve de pliage API 1104	69

Tableau IV.18: caractéristiques d'éprouvette de résilience.....	72
Tableau IV.19 : Exigences des valeurs de résilience	73
Tableau IV.20: résultats de résilience du tube.....	73
Tableau IV.21 : Exigences des valeurs de la dureté Vickers HV	77
Tableau IV.22: distribution des valeurs de dureté dans les différents points.....	77
Tableau IV.23 : microstructure des trois zones par microscope optique Nikon et MEB	81

RESUME

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au soudage et à la caractérisation des tubes HLE de nuance X70 de l'entreprise ALFAPIPE Annaba, destinés au transport des hydrocarbures et d'eaux.

Dans le premier chapitre nous avons suivi le processus de fabrication des tubes soudés en spirale et les différentes étapes réalisées pour obtenir le produit final ; de la bobine jusqu'au le stockage du tube dans le parc pour le transporter au client.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les aciers de haute limite élastique HLE, leurs propriétés, leurs mécanismes de durcissement, leurs avantages, ainsi que l'influence de différents éléments chimiques sur les propriétés des aciers HLE.

Dans le troisième chapitre nous avons abordé le soudage à arc submergé sous flux utilisé pour souder les tubes dans l'entreprise ALFAPIPE Annaba ; nous avons donc expliqué le principe du procédé utilisé, ses avantages, ses inconvénients et l'influences de ses différents paramètres. Aussi, nous nous sommes intéressés aux défauts de la soudure qui peuvent survenir lors de soudage SAW.

Enfin, le dernier chapitre ; nous l'avons scindé en deux parties. Dans la première partie nous avons complété le chapitre précédent en expliquant les paramètres de soudage, la méthode de calcul de l'angle de production, la composition chimique et propriétés du fil et flux de soudage. Dans la deuxième partie, nous avons étudié les différents contrôles destructifs, essais et observations utilisés pour caractériser les tubes et nous avons aussi effectué une comparaison entre les valeurs d'essai de traction mesurées sur tube et les autres valeurs de certificat.

INTRODUCTION GENERALE

L'augmentation de la demande d'énergies telles que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. En effet, ces derniers, sont devenus, ces 50 dernières années le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur des longues distances (plusieurs centaines voire plusieurs milliers de kilomètres).

Les tubes soudés de haute limite d'élasticité HLE laminés à chaud trouvent leurs applications dans de nombreux domaines : gros tubes pour transport du gaz liquéfié et d'hydrocarbures, transport de l'eau pour l'agriculture et l'eau potable à partir des barrages....etc. Le développement industriel des pipes en acier HLE exige une maîtrise parfaite du processus de fabrication, par conséquent, le produit doit satisfaire les conditions techniques ; telles que les propriétés mécaniques, absences des défauts...

Ces tubes faiblement alliés au Nb-V-Ti ont subi de soudage en spirale. Le soudage est une technique qui permet de réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage rigide de manière à assurer une bonne homogénéité de la matière. De point de vue performance, cet assemblage soudé doit offrir des garanties optimales de sécurité et d'endurance en service en respectant la norme et les exigences du client.

En Algérie, L'entreprise ALFAPIPE Annaba est une des entreprises certifiées spécialisée dans la fabrication des types HLE soudés en spirale à partir des bobines, utilisés pour le transport des hydrocarbures, de gaz et d'eau.

Pour comprendre les propriétés des tubes de haute limite d'élasticité, nous allons expliquer dans ce travail le processus de soudage de ce type d'acier de la nuance X70, ainsi que, d'étudier les différents contrôles destructifs utilisés pour la caractérisation des tubes de cette entreprise.

Ainsi, dans le premier chapitre, nous allons présenter le processus de fabrication des tubes dans l'unité ALFAPIPE Annaba. Dans le deuxième et troisième chapitre, nous allons définir les aciers HLE et leur soudage. Enfin, dans le dernier chapitre, nous allons étudier les différentes conditions et paramètres de soudage à arc submergé sous flux SAW et les différents essais et observations utilisés pour assurer la qualité de ces tubes.

Chapitre I

Généralités

I. Introduction

L'industrie est l'outil développement de chaque pays. Son but est la production des biens et de service. Le secteur de l'industrie lourde est choisi pour faire le premier investissement du fait que ce secteur était considère comme la base de tout développement industrielle capable d'assurer notre indépendance économique.

Dans ce chapitre on va expliquer l'industrie des pipes dans l'entreprise ALFAPIPE. Pour ensuite explique les étapes de l'usinage des tubes soudés en spirale est enroulée à l'aide d'une tôle en forme de spirale, qui nous permet d'obtenir un tube assemblé par un cordon de soudure de l'intérieur et de l'extérieur de la paroi. Cette technique demande de la préparation de la tôle et un réglage de la machine avec une grande précision afin d'obtenir un tube droit. Les pipes sont très employées pour le transport des fluides de longue distance << pipeline >> et l'assainissement en eau dans les villes. Pour cette raison ces pipes doivent être construites avec une qualité supérieure en tenant comptes de tous les exigences techniques du cahier de charge.

I.1.Présentation du lieu de stage

ALFAPIPE Annaba est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisations d'hydrocarbures (gaz et pétrole) et d'hydrauliques avec leurs revêtements (extérieur et intérieur). Elle dispose d'un système management qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales API et ISO9001 depuis 2000. Située à 15 Km d'Annaba.

ALFA PIPE Annaba a pour rôle de produire des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. La gamme de tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406.4 mm), et 52 pouces (1320.8 mm).

Actuellement, la plupart des commandes concerne des tubes 48 pouces (1219.2 mm) et de longueur entre 9 à 12 m. Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La production des canalisations soudées est soumise à plusieurs exigences.

Conformément aux spécifications, les tubes sont fabriqués par soudage automatique à l'arc immergé à partir de feuillards. Le métal devra être de bonne qualité notamment en ce qui concerne sa résistance au vieillissement. La qualité du matériau importé sous forme de bobine est vérifiée dans un laboratoire qualifié. C'est aujourd'hui :

- Une prestation de qualité : un tube revêtu livré sur site pour éviter les aléas de manutention et de stockage intermédiaire;
- Un partenariat actif avec SONATRACH et les compagnies étrangères associées (Thyssen crupp, Arcelor, Lincoln...etc.).
- Une ferme volonté de conforter sa place de leader de production de tubes par la recherche de nouvelles formes d'association et par le renforcement de son processus de modernisation

Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La soudure des bords est faite en automatique à l'arc émergé sous flux, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur.

I.1.1. Structure de l'unité

Les installations sont réparties en trois bâtiments industriels :

- Le bâtiment de revêtement extérieur au polyéthylène construit en 1993-1995, d'une superficie de 2940m².
- Le bâtiment de revêtement intérieur à l'époxy, construit en 1973-1975, d'une superficie de 4480m².
- La tuberie spirale est composée de 04 halls couvrant une superficie d'environ 18 000m², d'un bâtiment administratif et d'une sous-station électrique de 15 kV/380V (3 transformateurs de 1600kVA et 2 transformateurs d'éclairage)

I.1.2. Organigramme de l'unité ALFAPIPE Annaba

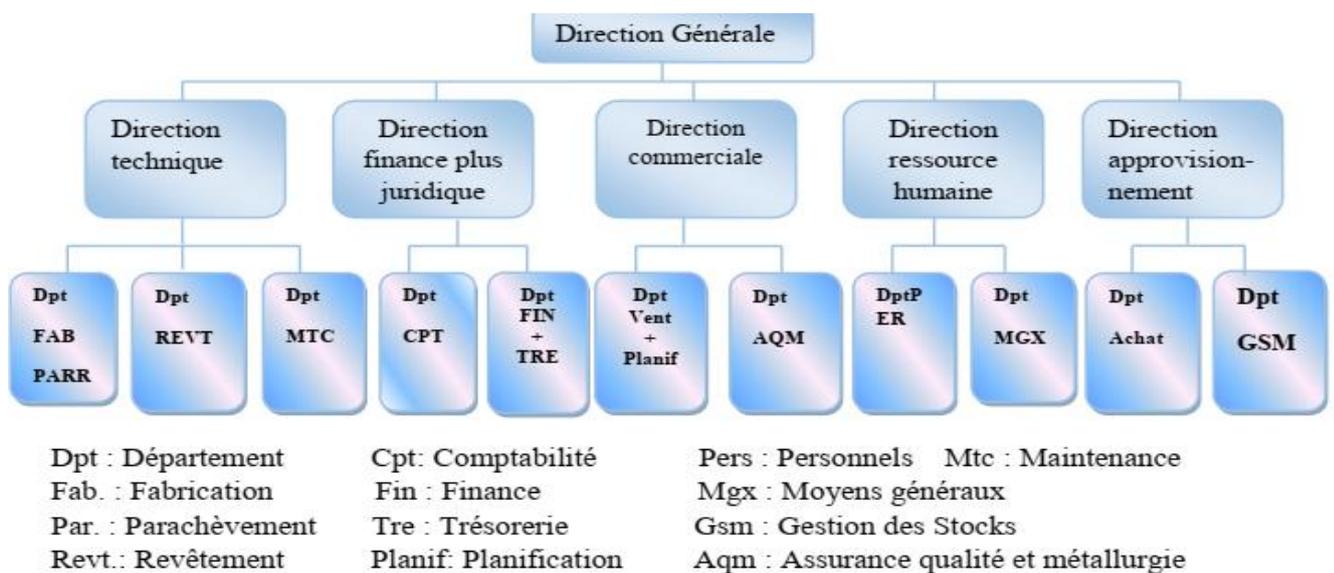


Figure I.1 : Organigramme de l'unité ALFAPIPE

I.1.3. Les produits de l'unité ALFA PIPE Annaba

ALFA PIPE Annaba a pour rôle de produire et contrôler des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. Ces tubes sont conçus pour le transport de gaz, pétrole et d'eau.

La gamme des tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406,4 mm) et 52 pouces (1320,8 mm). Actuellement, la plupart des commandes sont à 48 pouces (1219,2 mm), et de longueur entre 9 à 12 m.

Le tableau suivant illustre les caractéristiques des tubes fabriqués :

Diamètre des tubes en pouces	16	24	30	36	42	48
Épaisseur en mm	5.0	7.5	9.0	11.0	12.0	15.0
Largeur des bandes (mm)	800	1200	1500	1800	1800	1800
Capacité de production (m de tube/ heure)	57	47	42	34	24	14

Tableau I.1 : Tableau des caractéristiques des tubes fabriqués

Les machines de l'unité peuvent traiter des aciers laminés à chaud à très hautes limites d'élasticité HLE dans les nuances X60 à X70.

Les bobines utilisées pour la fabrication des tubes spirales sont livrées brutes, ces approvisionnement proviennent principalement de l'Allemagne, du Japon, du Russie ou de

LAC SIDER.

Les bobines utilisées peuvent avoir une épaisseur variant de 5 à 15 mm, une largeur de 600 à 1870 mm, un poids compris entre 29 et 36 tonnes, la production actuelle est de l'ordre de 130 000 tonnes/ans.

I.2. Les opérations principales pour la fabrication des tubes soudés en spirale

I.2.1. Stockage des bobines

Le hall de stockage des bobines est desservi par 2 voies ferrées et une voie sous – terrain reliée directement au LAC ainsi qu'un pont roulant de 44 tonnes, il permet de stocker 15 000 tonnes de bobines, soit la consommation d'un mois et demi de production.



Figure I.2 : Stockage des bobines

I.2.2. Basculeur des bobines

Les bobines de tôle arrivant à axe verticale sont mises à axe horizontal sur cette installation pour pouvoir être préparées.

I.2.3. Machine de préparation bobine

Cette machine est alimentée en bobines à axe horizontal par le pont roulant, la bobine ainsi placée est déroulée sur une certaine longueur pour subir plusieurs opérations :

La première partie de la bobine est coupée d'équerre suivant l'axe de la bande et elle est soumise à :

- Un contrôle dimensionnel (épaisseur, criques, ...)
- Un contrôle visuel (empreintes, criques, ...)
- Un contrôle ultrasonique pour détecter les éventuels défauts internes (des doublures).



Figure I.3 : Machine de préparation des bobines

I.2.4.Machine à souder

La TUBERIE spirale dispose de 4 machines à souder identiques, qui permettent la réalisation de plusieurs opérations pour la fabrication du tube.

I.2.5.Le rabotage

C'est une opération qui consiste à couper, avec l'oxycoupeur, la fine bande sur la machine et de raccorder le bout de la précédente bobine à la nouvelle par un soudage automatique sous flux.

I.2.6.Le Guidage

Quatre (4) galets de guidage à commande hydraulique permettent un réglage rapide de la bande en cas de dérives dues aux variations de largeur de la bande.

I.2.7.Dressage bande

Un train de rouleaux dresseurs assurent une parfaite planéité et contribuent au guidage de la bande.

I.2.8.Cisailage

Des cisailles de rive permettant la mise en largeur définitive de la bande. Les chutes ainsi obtenues par cisailage sont coupées par simple rotation de deux (02) tourteaux hacheurs équipés de plusieurs couteaux en acier



Figure I.4 : Machine Rabotage, guidage, dressage, Cisailage

I.2.9 Formage de la bande

La bande est entraînée par deux (2) rouleaux cylindriques, elle subit un préformage par des galets cambreurs, des bras de guidage avec plaque d'usure en téflon maintiennent la bande.

Celle-ci est introduite dans la cage de formage constituée de plusieurs trains de galets, ajustés suivant le diamètre à réaliser. La bande ainsi formée, est soudée intérieurement, puis une demi-spire après, extérieurement.

Le procédé utilisé est le soudage automatique, à arc immergé sous flux ; une centrale permet la récupération du flux en excès pour le recycler. Le tube formé est coupé à la longueur voulue par un chariot d'oxycoupage prévu à cet effet.

I.2.10.Le soudage

Une fois enroulées en hélice, les bandes sont soudées par un procédé dit à l'arc immergé sous flux en deux passes successives, l'une à l'intérieur du tube, à l'accostage des rives, l'autre d'une demi-spire plus loin.

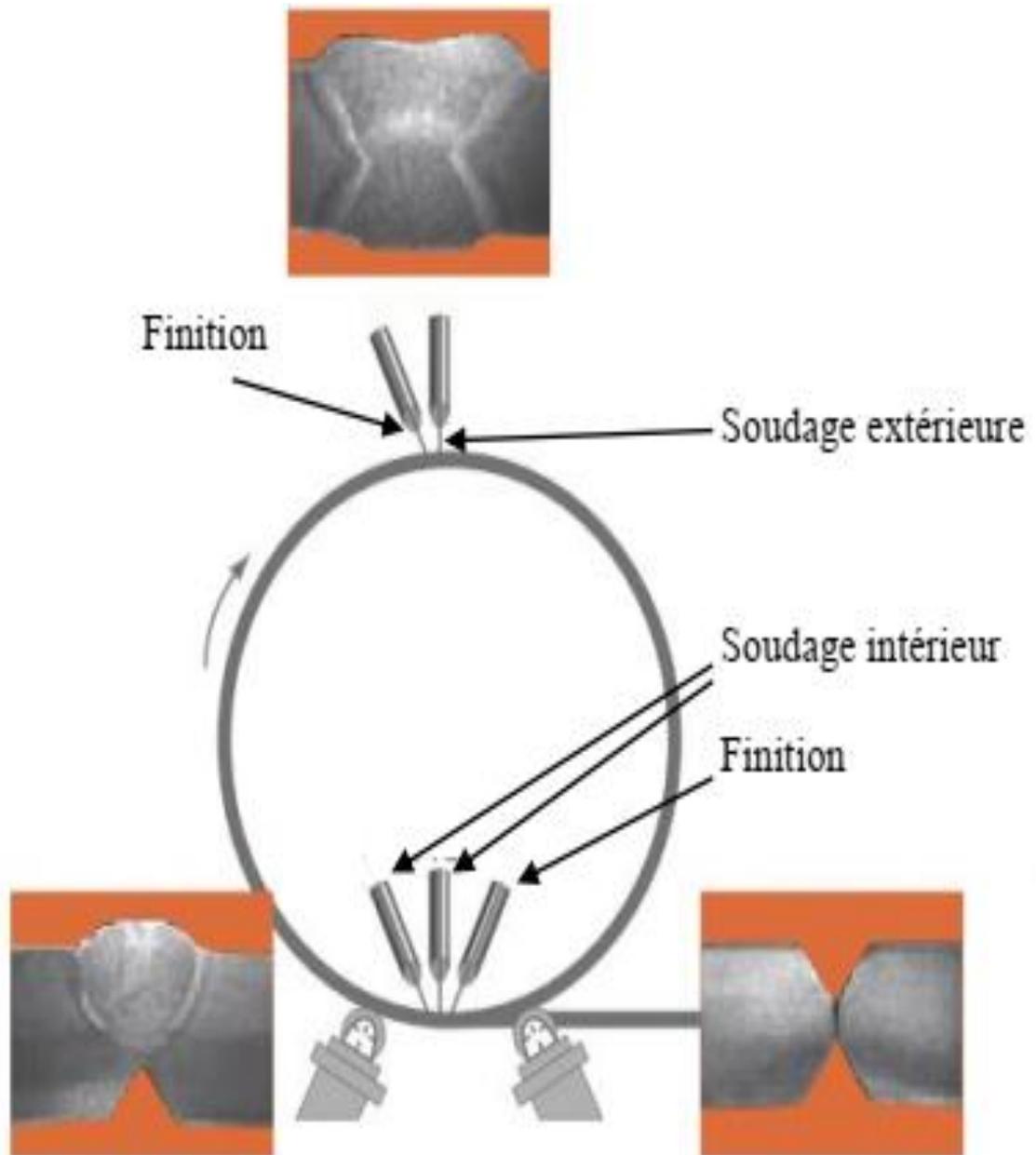


Figure I.5 : Le soudage

I.2.11. Tronçonneuse des tubes

Cette machine est utilisée pour l'oxycoupage des tubes suivant les instructions du contrôle visuel et figurant sur la carte suiveuse de tube.



Figure I.6 : Tronçonneuse des tubes

I.2.12. Nettoyage tube

Le tube est nettoyé sur une machine qui le débarrasse de tous les déchets (flux, laitier, ... etc.).



Figure I.7 : Nettoyage du tube

I.3. Contrôles non destructifs

I.3.1. Contrôles des bobines

Un contrôle à la réception des bobines est effectué sur la base des spécifications techniques (forme, dimensions, défauts de surface tels que les empreintes et les griffures), Un second contrôle des documents d'accompagnement (certificats d'analyse chimique et mécaniques) établis par le fournisseur.

Les bobines conformes sont saisies sur une liste de réception, et sont identifiées par un marquage indélébile comportant : Numéro de la bobine, Numéro de la coulée et la nuance de l'acier, Poids de la bobine, Dimensions, Nom du fournisseur, Identification du projet.

I.3.2. Contrôles visuels

L'examen visuel est le plus simple et le premier des contrôles devant être mise en oeuvre. Il permet de déceler les défauts de formes aux autres défauts débouchant en surface des joints soudés.



Figure I.8 : Contrôle visuel

Les défauts cités ci-après relèvent du contrôle visuel :

Les manques d'épaisseurs ou effondrements, les caniveaux internes ou externes, les morsures, les défauts plans débouchants en surface, les soufflures et inclusions débouchants en surface, les rochages.

I.3.3.Zone de réparation

Equipée de deux (2) poste à soudage manuel pour réaliser toutes les réparations de défauts préjudiciables de la soudure, signalés en amont par le contrôle visuel.

I.3.4.Banc d'essais hydrostatique

Cette installation sert à éprouver les tubes à pression équivalente à 90% du taux de travail de l'acier utilisé, cette opération a pour but de vérifier d'une part l'étanchéité du tube, et d'autre part le comportement du tube lors de la montée en pression.



Figure I.9 : Test hydrostatique

I.3.5.Deux chanfreineuses des tubes

Pour permettre l'opération de soudage manuel, le tube est chanfreiné sur cette installation suivant les normes de travail. L'angle obtenu est en général de 30° à 35° avec un talon de 1,5mm.

I.3.6.Ultra-sonique des extrémités de tube

Dans le même esprit, le métal de chaque extrémité de tube est testé à l'aide d'appareils à ultra-son manuel de façon à localiser puis écarter par oxycoupage tout défaut de laminage tel que dédoublement ou feuilletage.



Figure I.10 : Contrôle par ultrasons

I.3.7. Deux machines de contrôle radiographique et radioscopique

Chaque défaut de soudage repéré à l'ultrason automatique, fait l'objet d'une première radiographie au rayon X. Un second appareillage radiographique, identique au précédent, est spécialisé dans la prise de la radiographie des soudures d'extrémités. La radioscopie utilise un écran fluorescent visualisant les défauts, et la radiographie utilise des films de radiographie.

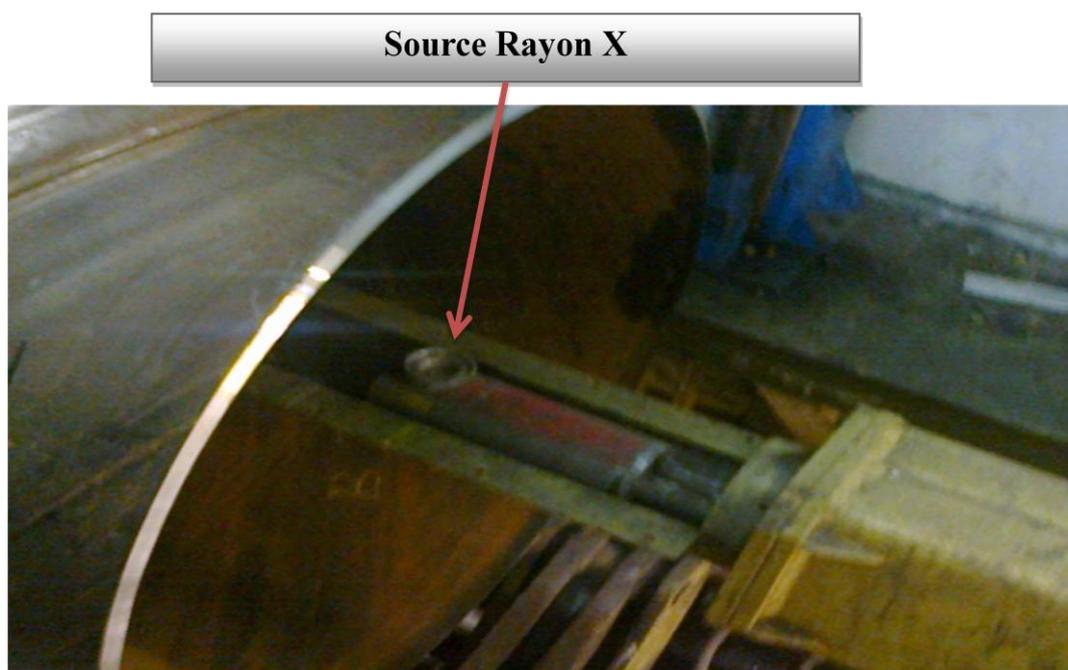


Figure I.11 : Contrôle par rayons X

I.3.8.Zone de contrôle final

Au niveau de ce stand, les opérations suivantes sont réalisées :

- Contrôle visuel et dimensionnel.

- Vérification de la carte suiveuse du tube, 02 cas peuvent se présenter :

* Le tube ne comporte pas de défauts et les opérations mentionnées sur la carte suiveuse sont réalisées ; dans ce cas le tube reçoit un numéro d'expédition et suit son chemin au parc de stockage.

- Le tube comporte un défaut ou bien l'opération mentionnée sur la carte n'a pas été réalisée ; dans ce cas, le tube retourne en atelier pour subir les prestations manquantes.

I.4.Contrôles destructifs

I.4.1.Essais réalisés

Tous les essais sont effectués en conformité avec les normes API 5 L et avec les spécifications du client.

I.4.2.Analyses chimiques

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyses sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation du produit en composition chimique et en carbone équivalent (spectromètre à étincelle).

I.4.3.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.

- T .N : traction normale.
- * T.S : traction sur soudure.

I.4.4.Essai de pliage

Deux essais de pliage en droit et en vers sont réalisés afin de rechercher toutes les imperfections de tension dans la soudure ou prouver sa bonne qualité. Après ces essais, le cordon de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts débouchant à la surface.

I.4.5.Essai de résilience

Il a pour but d'évaluer la résistance à la rupture fragile pour cela il met en œuvre des conditions qui favorisent le comportement fragile. (Trois zones la MB, S, ZAT)

I.4.6.Essai de macro dureté

La pratique de macro dureté nécessite la préparation les éprouvettes par des polissages par meulage à l'eau à l'aide de papiers abrasifs à indice de granulation croissante jusqu'à 600, on prépare uniquement la face qui fait l'objet de l'essai.

I.5.Revêtement extérieur et intérieur

I.5.1.Revêtement extérieur

Le processus de revêtement extérieur est comme suit :

- Préparation de la surface
- Revêtement de tubes
- Brossage des tubes

I.5.1.1.Préparation de la surface

Cette phase est basée dans la zone fonctionnelle 01 « Partie entrée». Les tubes à enrober" proviennent directement de la tuberie spirale. En règle générale, ils sont livrés par camion et déposés sur la grille d'entrée au moyen d'engins de manutention. Après le control visuel de ces tubes sur la grille d'entrée, ils sont déplacés hélicoïdalement sur le convoyeur à rouleaux pour traverser l'installation de séchage.

Lorsque le tube est sorti de l'installation de séchage, il est roulé à nouveau manuellement avec les outils spéciaux jusqu'aux injecteurs du convoyeur à rouleaux de la grenailleuse. Dans la grenailleuse, le tube est grenailé du dessous. Le grenailage se fait au moyen de deux turbines de grenailage. A condition d'avoir le bon mélange de grenaille ronde et angulaire et le bon chargement

des turbines, on obtient une rugosité suffisante ainsi que le degré de pureté spécifié dans la norme DIN 55928.

Avant que le tube ne soit déposé sur le convoyeur à rouleaux de revêtement, il doit être nettoyé à l'intérieur et à l'extérieur. Pour ce nettoyage, le tube repose dans un dispositif decentrage. Avec une lance, on souffle de l'air comprimé dans le tube. Simultanément, la poussière est aspirée et filtrée à l'extrémité du tube. Enfin, ces tubes sont ramenés au convoyeur en amont du poste de séchage de tubes pour être enrobés.

Une fois que les tubes sont séparés, ils entrent dans le tronçon de refroidissement par eau celui-ci se fait sans pression. Ce refroidissement améliore la formation d'une couche de PE à surface lisse et empêche une adhérence de la couche de PE encore fraîche. L'eau qui se trouvait encore dans le tube et qui était retenue par la sur hauteur de cordon peut s'écouler grâce à la pente et à la rotation du tube.

I.5.1.2.Revêtement de tubes

Le revêtement est effectué selon le procédé à trois (03) couches:

- Couche de résine époxy ayant une épaisseur d'environ «60-80 μm ».

L'application se fait par pulvérisation électrostatique ;

- Couche d'agent adhésif ayant une épaisseur d'environ« 250-300 μm », Cette couche est appliquée sur le tube sous forme de feuille selon le procédé d'enrobage;

- Couche de polyéthylène ayant une épaisseur d'environ« 2,2 -3,5 mm »,

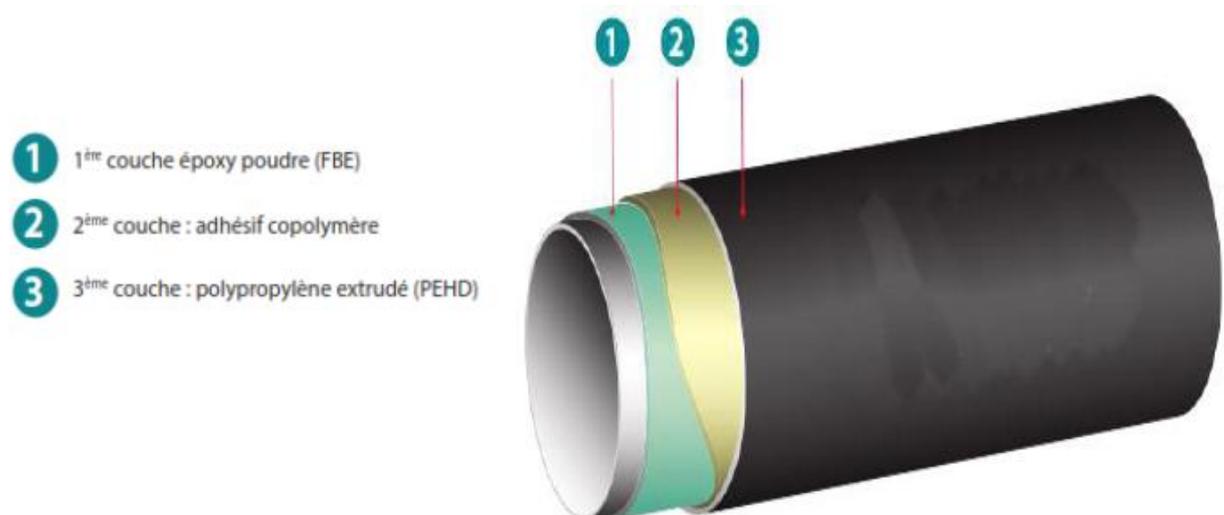


Figure I.12 : Les trois couches du revêtement extérieur

Cette couche est enrobée sur le tube sous forme de feuille avec l'agent adhésif. Cette phase est basée dans la zone fonctionnelle 02 « Partie revêtement », les tubes sont positionnées de telle sorte sur la grille de stockage en amont de l'entrée de la ligne de revêtement que tous les débuts de tubes forment une ligne fixe. Les tubes sont chauffés à la température nécessaire au type de revêtement à appliquer grâce à une bobine d'induction.

Lorsque, le tube passe à travers de la cabine de pulvérisation d'époxy, l'agent adhésif appliqué sur la couche de base en époxy ce dernier sert de colle entre la couche de résine d'époxy et la couche de PE. Pour le revêtement au Polyéthylène, il se fait à l'aide de deux extrudeuses à une vis. Ces deux extrudeuses sont reliées à la filière d'extrusion par des tuyauteries chauffées électriquement.

Une fois que les tubes sont séparés, ils entrent dans le tronçon de refroidissement par eau celui-ci se fait sans pression. Ce refroidissement améliore la formation d'une couche de PE à surface lisse et empêche une adhérence de la couche de PE encore fraîche. L'eau qui se trouvait encore dans le tube et qui était retenue par la sur hauteur de cordon peut s'écouler grâce à la pente et à la rotation du tube

Enfin, les tubes refroidissent passe à la zone suivante pour être brossés.

I.5.1.3. Brossage des tubes

Cette phase est basée dans la zone fonctionnelle 03 « Partie sortie ». Lorsque le tube a été rabaisé avec le poste d'élimination d'eau, il est transporté avec les rouleaux longitudinaux en amont de la brosseuse d'extrémités.

Quand, la brosse d'extrémités de tube est prête à prendre un tube, il est pris par l'injecteur sur le convoyeur et déposé sur les rouleaux vireurs dans la brosseuse.

Pour le brossage, les tubes sont mis en rotation par les rouleaux vireurs. Les brosses d'extrémités de tubes consistent en deux chariots montés frontalement des deux côtés du tube, dont l'un est fixe et l'autre mobile.

Lorsque le brossage est terminé, la rotation du tube est arrêtée, le système de brossage est abaissé et le tube est roulé hors de la zone de la brosseuse par des éjecteurs. Finalement, les tubes bons c'est-à-dire les tubes ayant subi avec succès le contrôle de porosité, sont prêts pour être enrobés à l'intérieur

I.5.2. Revêtement intérieur

Il est fait en résine époxy pour les tubes destinés au:

- Transport et à la distribution du gaz sec.
- * Transport du gaz humide, d'eau potable brute et industrielle

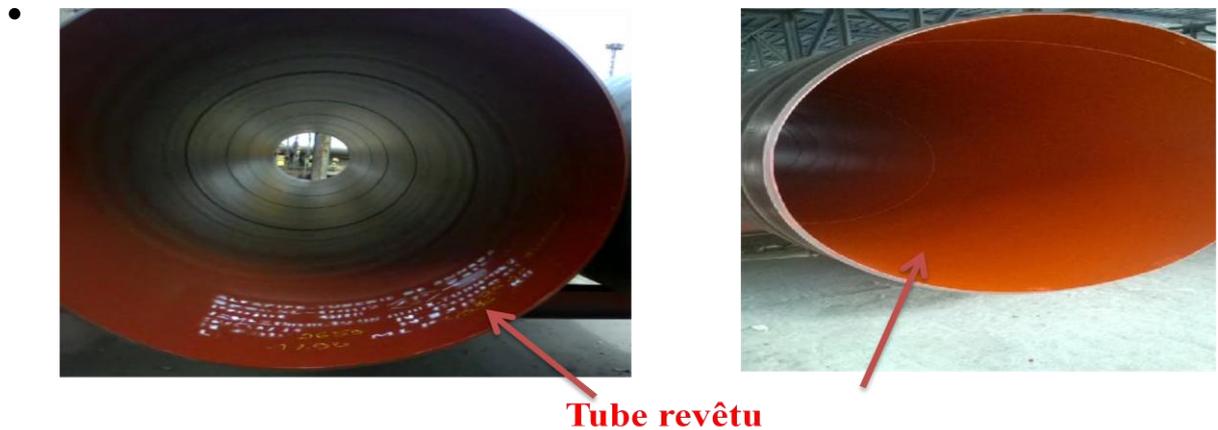


Figure I.13 : Revêtement intérieur du tube en résine époxy

I.5.2.1.Installation de l'atelier

I.5.2.1.A. Sécheur

Les tubes qui sont humides en raison du stockage, du transport, etc. Doivent être séché avant le grenailage

I.5.2.1.B. La ligne de grenailage intérieur

Elle est composée de :

- Grilles de rotation avec stop-éjecteur.
- Unités de rotation avec bras récepteur et bras éjecteur.
- Grenailleuse intérieur.
- Filtres dépoussiéreurs.

I.5.2.1.C. Machine d'époxy

La machine époxy sert au revêtement intérieur de tubes en aciers. Elle est constituée de :

- Pompe pour : peinture+durcisseur
- Deux bacs d'alimentation : bleu=époxy, rouge=durcisseur
- Pompe de rinçage
- Pistolet airless
- A la fin de l'opération de revêtement, les tubes sont sécher par soufflante

I.5.2.1.D. Marquage

Les marquages suivants doivent être apposés sur le revêtement :

- Nom ou code de l'applicateur
- Marquage requis par la spécification ou la norme applicable relative au tube
- Référence de la norme ISO et année de publication (ISO 21809-1:2011) ;
- Classe d'épaisseur du revêtement.
- Épaisseur spécifiée du revêtement.
- Température maximale de conception.

Le marquage doit être réalisé au moyen d'une méthode telle que marquage à la peinture ou par impression, de façon à assurer une identification lisible et indélébile.

I.6.CONCLUSION

La qualité des tubes soudés en spirale fabriqué par ALFAPIPE Annaba est basé sur le processus de fabrication et le bon réglage des machine par un contrôle périodique dès la réception de la matière première (bobine) jusqu'au produit fini (tube).

Le respect des procédures de contrôles, des normes, des références et des spécifications du client a permis à ALFAPIPE Annaba de réserver sa place en tant que fournisseur potentiel dans le domaine de fabrication de canalisation soudée pour hydrocarbure du moins au niveau national.

Mon stage à ALFAPIPE Annaba. Il m'a permis de découvrir un univers que je ne connaissais finalement que très peu mais pour lequel je porte un immense intérêt. J'ai trouvé l'entreprise très intéressante et enrichissante, puisqu'il s'agissait pour moi d'un domaine inconnu ou j'aimerais approfondir mes compétences.

Ce stage a vraiment confirmé mes ambitions futures qui sont exercés dans le domaine de la métallurgie, même s'il me reste encore beaucoup à apprendre.

Chapitre II

Acier de haute limite d'élasticité HLE

II.1.Généralité sur les aciers

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 [4].

II.1.2.Histoire de l'acier

L'Âge du fer se caractérise par l'adaptation du bas fourneau à la réduction du fer. Ce bas fourneau produit une loupe, un mélange hétérogène de fer, d'acier et de laitier, dont les meilleurs morceaux doivent être sélectionnés, puis cinglés pour en chasser le laitier.

En poussant le vent, on attise la combustion et la température de fusion du métal est atteinte. On extrait le métal par vidange du creuset : c'est la production au haut fourneau. On obtient alors de la fonte, le fer liquide se chargeant de carbone au contact du charbon de bois. En effet, deux phénomènes complémentaires se déroulent dans le creuset du haut fourneau : le fer se charge de carbone lorsqu'il arrive au contact du charbon de bois, ce qui abaisse son point de fusion. Puis ce métal fondu continue à s'enrichir en carbone, en dissolvant le charbon de bois. Les premières coulées de fonte ont été réalisées par les Chinois durant la période des Royaumes combattants (entre -453 et -221). Ceux-ci savent aussi brûler le carbone de la fonte, en le faisant réagir avec de l'air, pour obtenir de l'acier. Il s'agit du procédé indirect, car l'élaboration de l'acier se fait après l'obtention de la fonte. En Europe et en Asie, durant l'Antiquité, on produisait également de l'acier en décarburant le fer avec des gaz de combustion et du charbon de bois (acier de cémentation)

Réaumur, en réalisant de très nombreuses expériences et en publiant les résultats de ses observations en 1722, fonde la sidérurgie moderne : il est le premier à théoriser le fait que l'acier est un état intermédiaire entre la fonte et le fer pur, mais les connaissances du temps ne lui permettent pas d'être scientifiquement précis. Il faut attendre 1786 pour que la métallurgie devienne scientifique : cette année-là, trois savants français de l'école de Lavoisier, Berthollet, Monge et Vandermonde présentent devant l'Académie royale des sciences un Mémoire sur le fer dans lequel ils définissent les trois types de produits ferreux : le fer, la fonte et l'acier. L'acier est alors obtenu à partir du fer, lui-même produit par affinage de la fonte issue du haut fourneau. L'acier est plus tenace que le fer et moins fragile que la fonte, mais chaque transformation intermédiaire pour l'obtenir augmente son coût [4].

La révolution industrielle apparait grâce à la mise au point de nouvelles méthodes de fabrication et conversion de la fonte en acier. En 1856, le procédé Bessemer, est capable d'élaborer directement l'acier à partir de la fonte. Son amélioration par Thomas et Gilchrist permet sa généralisation. Ces découvertes, mènent à la fabrication en masse d'un acier de qualité (pour l'époque). Enfin, vers la seconde moitié du XIX^{siècle}, Dimitri découvre les transformations polymorphes de l'acier et établit le diagramme binaire fer/carbone, faisant passer la métallurgie de l'état d'artisanat à celui de science.

II.1.3.Fabrication de l'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 le convertisseur.
- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [4]

II.2.Acier HLE

II.2.1.Introduction à l'acier HLE

Les aciers HSLA (High StrengthLowAlloy) ou les aciers HLE ont été développés, afin d'augmenter les propriétés mécaniques (la limite élastique, en particulier) sans détériorer la soudabilité et la ténacité de l'acier.

Les moyens pour y parvenir sont les suivants :

- le durcissement par affinement du grain.
- le durcissement par précipitation.
- le durcissement par écrouissage.

On peut les appeler des aciers micro-alliés (ou à dispersoïdes) à cause de faible addition d'éléments d'alliages dans un acier à faible teneur en carbone et manganèse (<1,5%).les éléments les plus utilisés sont Nb, Ti, V qui donnent des carbures ou des carbonitrides qui se dissolvent uniquement à haute température (1050 °C pour les carbures de niobium par exemple).

Le rôle de ces carbures est double :

- Limiter la croissance des grains austénitiques.
- Provoque un durcissement structural par leurs fines dispersions dans la ferritique [2].

II.2.2. Le laminage à chaud des aciers HLE

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.)

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales [Bataille, 2003] et [Montmitonnet, 2002]: la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand, de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

A froid, un traitement thermique peut être fait pour restaurer la structure et éviter la rupture par endommagement. Au contraire pendant le laminage à chaud, la recristallisation dynamique s'effectue au cours de la déformation tant que la température du produit le permet le laminage à froid n'est nécessaire généralement que pour obtenir des tolérances serrées, et un bon état de surface. D'un point de vue pratique, la différence entre le procédé à chaud et le procédé à froid tient donc surtout à la

différence des géométries des produits qu'ils traitent. En l'occurrence, plus épais pour les laminages à chaud et plus minces pour les laminages à froid [3].

I.2.3. 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 refendage (cisailage 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.).

On emploie aussi le terme de coil pour les bobines de fil machine à chaud comme à froid mais surtout pour les produits en provenance ou à destination de l'étranger. En France, on préfère le terme de « couronnes » s'il s'agit de fil machine ou de bobines trancannées, si le produit a subi une première transformation et qu'il a été rebobiné à spires jointives [4].

II.3.Caractéristiques des Aciers HLE

II.3.1.Propriétés mécaniques

Caractéristiques API5L	Epaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A%
X70	5-25	Min 485	Min 570	≥18

Tableau II.1 : Caractéristiques mécanique de l’X70 selon l’API 5L

Avec :

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

Et :

API : Institut Américain du Pétrole.

5 L : Spécification pour le pipeline.

X : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.

Le chiffre après le « X » correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. [4]

II.3.2.Propriétés métallurgiques

II.3.2.1.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 dispersoïdes 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,....[4].

II.3.2.2. Influence des éléments de substitution

a. Le manganèse

En raison de ces propriétés, le manganèse se trouve, en plus au moins grande qualité, 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 inclusionnaire du métal. Il intervient sous multiples formes :

- Il abaisse la teneur en carbone à l'eutectoïde.
- 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 ferritique que dans le domaine bainitique.
- 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 MnS insoluble dès la solidification [3].

b. 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 mangano-siliceux, 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 dispersoïdes au Nb-V est de l'ordre de 0.3% [3]).

c. 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 [3]

II.3.2.3. Influence des éléments formants des précipités

a. 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) [3].

b. 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 [3].

c. 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 la 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 tout autre méthode. La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Ils sont livrés sous forme des 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 [3].

d. 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 [3].

Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↗			
Carbone	↗		↗		↘	↗		
Cobalt		↗					↗	
Chrome	↗	↗	↗		↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗			↗		↘
Molybdène	↗	↗					↗	
Nickel	↗	↗	↗		↗			↘
Silicium	↗	↗	↗			↗		
Titane	↗	↗	↗		↘	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	↗			↗	↗	
Vanadium	↗	↗		↗	↗	↗		

Tableau II.2 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers

I.3.3 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 [3].

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

- 1 Par solution solide.
- 2 Par précipitation.
- 3 Par dispersion.
- 4 Par affinement de grain.
- 5 Par écrouissage.
- 6 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.4.4.1. Affinement du grain γ

La taille du grain γ va être déterminée par l'ensemble des opérations de chauffage, les déformations, les temps entre déformations et la vitesse de refroidissement.

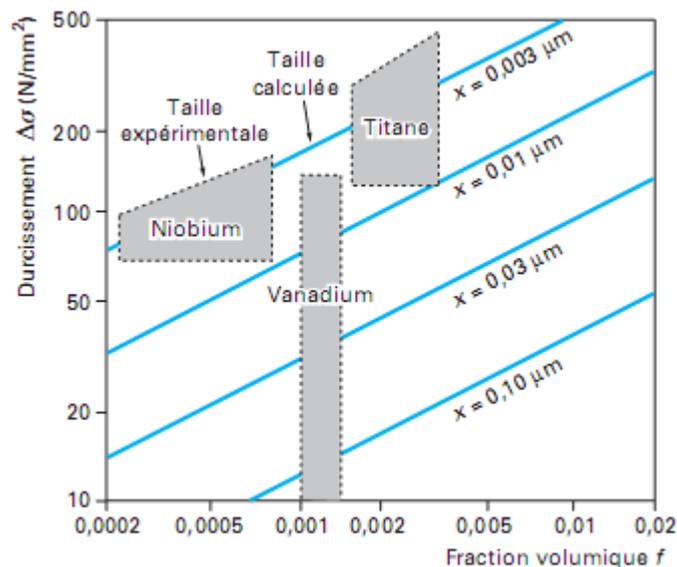


Figure II.1 : Durcissement en fonction de la taille et de la quantité des précipités.

Malgré un gros grain de départ après mise en solution à haute température, il se produit au cours d'un laminage ou d'un forgeage en plusieurs passes un affinement du grain, au moins en présence de niobium ou de titane. Entre les passes de laminage, il y a également un grossissement après la recristallisation à grains fins du métal déformé : ce grossissement très rapide à température élevée, pour une matrice sans précipité est fortement ralenti par des précipités.

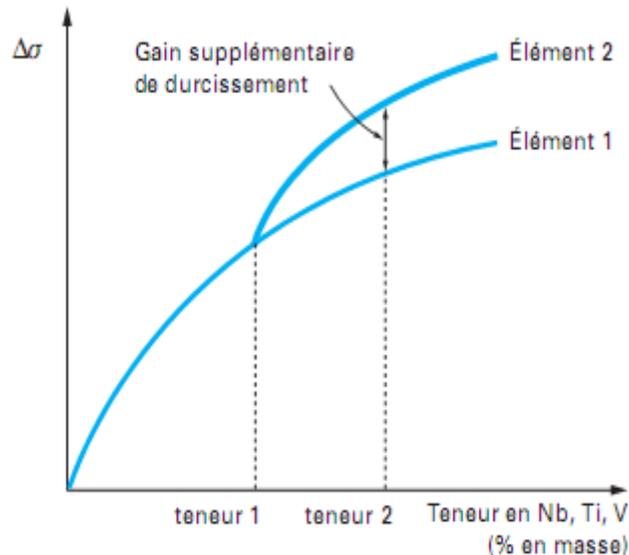


Figure II.2: Intérêt de la combinaison de deux éléments de microalliage pour le durcissement.

II.4.4.2. Affinement du grain α

L'influence des précipités sur la taille de grain α va passer d'abord par l'hérité du grain γ quand il y a changement de phase ; des grains γ fins donneront des grains α fins avec une relation dépendant de la vitesse de refroidissement [6].

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. 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 (R_e), 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 [3].

Chapitre III
Soudage des aciers
HLE

III.1.Introduction

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, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique. En dehors du cas idéal où les forces inter-atomiques et la diffusion assurent lentement le soudage des pièces métalliques mises entièrement en contact suivant des surfaces parfaitement compatibles et exemptes de toute pollution, il est nécessaire de faire intervenir une énergie d'activation pour réaliser rapidement la continuité recherchée.

L'opération peut être appliquée aux métaux ainsi qu'aux thermoplastiques (voir soudage plastique) et au bois (voir soudage du 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 [5].

III.2.Les différents types de soudage

- Soudage à la flamme
- Soudage aluminothermique
- Soudage électrique par résistance
- Soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées
- Soudage par friction
- Soudage par friction malaxage ou soudage thixotropique
- Soudage à l'arc submergé sous flux SAW
- Soudage hybride
- Soudage électro gaz
- Soudage par diffusion
- Soudage par ultrasons

III.3.Soudage à arc submergé sous flux SAW

III.3.1.Principe du procédé

Le procédé de soudage à Arc Submergé est un procédé de soudage automatique qui permet d'atteindre une très haute productivité : vitesse de soudage élevée, absence de préparation grâce à la pénétration importante, et souvent le chanfrein n'est pas nécessaire. La soudure est d'excellente

qualité (fortes pénétration et compacité, pas de projections). A ces caractéristiques, il faut aussi ajouter un excellent niveau de confort pour les opérateurs (pas de fumées, ni d'arc visible). Ce procédé est couramment utilisé dans de nombreux secteurs d'activité : construction navale, fabrication de pipes, chaudronnerie, fabrication de Poutres Reconstituées Soudées (PRS)



Figure III.1 : Machine de soudage à l'arc submergé sous flux à ALFAPIPE

Le flux en poudre est déversé en talus du fil-électrode. Un arc électrique, libre jaillit à l'intérieur du flux assurant la fusion simultanée des pièces à souder et d'un ou plusieurs fils-électrode (le métal d'apport).

Le transfert du métal fondu dans l'arc de soudage a lieu par gouttelettes enrobées de flux fondu. Protégé par sa gangue de laitier (auto-détachable) le métal déposé est lisse et brillant. L'excédent de flux qui n'a pas été fondu et récupéré par aspiration. Au niveau de la machine de soudage, ou les pièces à souder se déplacent, assurant la vitesse de soudage. L'amenée du fil-électrode se fait automatiquement.

Dans certains cas on utilise deux fils-électrode alimenté soit par le même générateur (arc jumelés), soit par des générateurs différents. Il s'en suit, pour une même énergie de soudage, un dépôt de métal plus important et une vitesse de soudage plus grande.

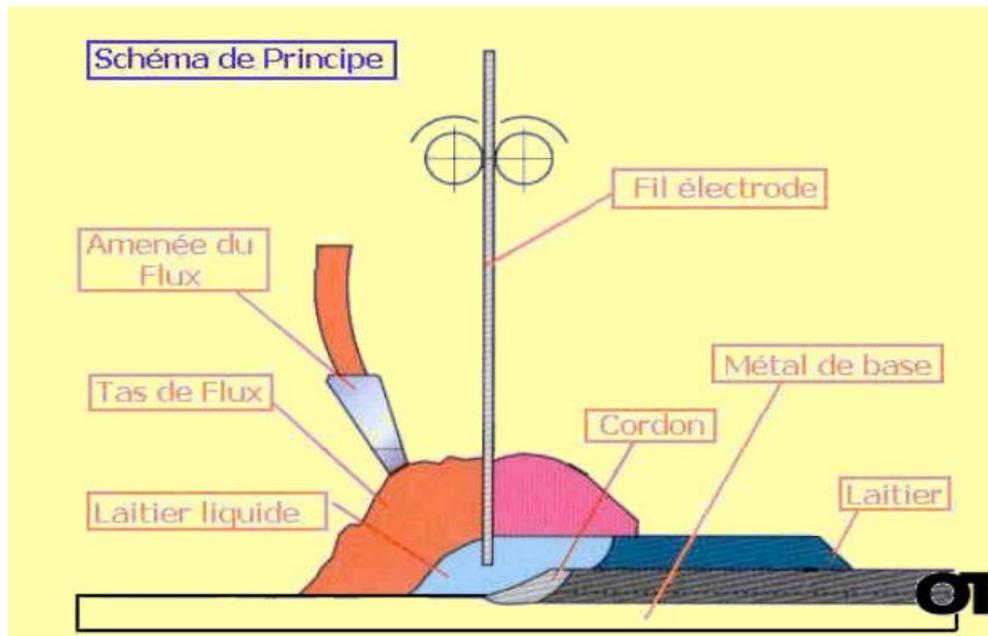


Figure III.2 : soudage à arc submergé sous flux (SAW)



Figure III.3 : soudage extérieur du tube par le procédé SAW dans ALFAPIE

Le procédé ne s'applique qu'au soudage des aciers. Les fils sont de nuance approchée en fonction de la nature de l'acier, associés parfois à un flux aggloméré permettant l'amélioration de la qualité du métal déposé. Les diamètres les plus courants vont de 1 à 6 mm, livrés en bobines de plusieurs centaines de mètres, quelquefois sous forme de feuillard quand un apport de métal important est nécessaire.

Le flux remplit les mêmes fonctions que l'enrobage de l'électrode en soudage à l'arc manuel. Conducteur du courant électrique, à chaud, il participe à la formation du bain de fusion, et assure, en raison de son important dépôt, un refroidissement lent de ce dernier, indispensable dans le soudage de certains aciers (structure fragile dans la zone soudée). Les flux sont en général de type basique ou acide, avec parfois des éléments d'addition qui permettent de modifier sensiblement la composition chimique du métal déposé et les caractéristiques mécaniques du joint soudé. On dispose d'une gamme très large pour le choix du couple fil-flux en fonction des besoins.

Le soudage automatique sous flux solide est utilisé pour le soudage des aciers. La soudure s'effectue à plat ou légèrement inclinée (le flux doit protéger l'arc). Le cordon de métal déposé doit avoir une certaine longueur pour être pleinement rentable. Exemple : soudage bout à bout de tôles d'acier, poutres en I reconstituées soudées, poutres en caisson, réservoir sous pression, etc [5].

III.3.2.Domaine d'application

- Le soudage sous flux en poudre s'applique principalement au soudage des aciers ferritiques et austénitiques.
- Sa forte pénétration, sa haute productivité, son prix de revient, etc, le destinent aux fortes épaisseurs (>5mm) élevées l'assemblage bout à bout en une seule passe de 15 mm d'acier sur bords jointifs chanfreines.
- Les principales applications se trouvent dans le domaine de la charpente métallique, la construction navale, de la grosse chaudronnerie.
- Il aussi utilisé pour réaliser des revêtements déposés par soudage. Dans ces applications, afin d'augmenter la vitesse de dépôt, on utilise généralement des installations multi fils ou des électrodes en bandes (feuillard) [5].

III.3.3.Avantages du procédé

Ce procédé est avantageux pour déposer des quantités importantes de métal.

Les dépôts sont bonnes qualités notamment avec l'utilisation de flux basique.

- ✚ Il est utilisé à forte intensité (250-400A en mono fils) jusqu'à 1500 en multi fils ou en feuillard.
- ✚ Il permet des vitesses d'avance élevées (jusqu'à 3m/mm) et le taux de dépôt est important (2.5-12kg/h en monofils).

- ✚ Il a un pouvoir de pénétration élevé ce qui conduit à une simplification de la préparation des bords.
- ✚ L'arc n'est pas visible et ce procédé ne génère ni projection ni fumée de soudage [5].

III.3.4. Inconvénients du procédé

Du fait de la présence de flux, ce procédé ne permet le travail qu'à plat ou en corniche.

III.3.5. Influence des paramètres de soudage

En soudage monofil, les résultats dépendent principalement de l'intensité, de la tension d'arc, de la vitesse de soudage, diamètre du fil et de la polarité.

a) influence de l'intensité

La pénétration augmente lorsque l'intensité augmente, mais celle-ci a peu d'influence sur le largeur et la surépaisseur du cordon.

b) influence de la tension d'arc

Si la tension à l'arc augmente, le largeur du cordon, la consommation de flux et le risque de caniveaux augmente.

c) influence de la vitesse de soudage

Plus la vitesse de soudage augmente, plus le cordon est étroit et plus la pénétration baisse.

d) influence du diamètre du fil

A autres paramètres constants, la pénétration augmente quand le diamètre du fil diminue.

e) influence de la polarité

En courant continu, on raccorde généralement le pôle (+) au film, mais si l'on met au pôle(-) :

- La pénétration diminuée.
- La stabilité de l'arc est moins bonne.
- La vitesse de fusion et le taux de dépôt augmente.

f) influence de la longueur libre de fil (stick out)

Généralement la longueur libre de fil est égale à 5 à 7 fois le diamètre de celui-ci. Si cette longueur augmente, la pénétration diminuée, l'arc est moins stable. Par contre le taux de dépôt augmente.

III.3.6.Sources de puissance et équipement

Des sources de puissance en courant alternatif et en courant continu sont utilisées pour le SAW. Si on utilise une technique à plusieurs fils, il est souvent avantageux d'utiliser du courant alternatif pour l'ensemble des fils de manière à restreindre ou à éliminer les problèmes de soufflages de l'arc. Cependant pour des raisons de pénétration, il peut être indiqué courant continu positif pour le fil d'électrode fusible. Certaines procédures de soudage peuvent admettre l'utilisation d'un fil d'apport sans devoir ajouter de flux de courant dans le bain de soudure.

L'amplitude du courant utilisé dépend considérablement du diamètre du fil de la forme de courant, il est classique d'utiliser pour le soudage de soudure en continu de tubes une intensité comprise entre 600 et 1500A.

Les sources de puissance autorégulatrices utilisant une technique à fils multiples avec du courant continu et de courant alternatif sont susceptibles d'être utilisées pour les soudures continues sur le tube.

Les ondes sinusoïdales pour les fils de courant alternatif peuvent être carrées pour plus d'efficacité [5].

III.4.Aptitude au soudage et critère de soudabilité

Les définitions suivantes sont sensiblement équivalentes :

« Un matériau métallique est dit soudable dans une certaine mesure par un processus donné et dans un but donné, lorsqu'une liaison métallique continue peut être obtenue par soudage en utilisant un processus adapté, de manière que les joints satisfassent aux exigences spécifiées du point de vue de leurs propriétés locales et de leur influence sur la construction dont ils font partie ».

« Facilité avec laquelle un matériau peut être soudé pour produire un joint acceptable ».

« Capacité d'un métal à être soudé dans des conditions de fabrication imposées à une structure particulière conçue dans manière adaptée et à produire l'effet souhaité de manière satisfaisante ».[6]

III .4.1.Comment déterminer la soudabilité

Il est impossible de mesurer ou de calculer la soudabilité, en partie en raison des nombreux facteurs qui influent sur la facilité avec laquelle une soudure est pratiquée et sur caractéristiques de la soudure qui en résultent.

Principaux facteurs qui jouent sur la soudabilité :

- *La conception des joints.
- *Les propriétés métallurgiques.
- *Les propriétés physiques.
- *Les propriétés chimiques.

II .4.2. Influence de la composition chimique sur la Soudabilité

La soudabilité est une propriété complexe qui dépend beaucoup de la composition chimique de la nuance et, en particulier, de la teneur en carbone qui détermine la dureté de la martensite, qui se forme dans certaines conditions de soudage, et sa sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène. Il est donc très intéressant de pouvoir changer les caractéristiques grâce au microalliage, car cela permet d'abaisser la teneur en carbone et dans certains cas aussi les éléments d'alliage qui figurent dans les formules de carbone équivalent caractérisant la trempabilité des aciers en conditions de soudage.

L'effet durcissant des éléments de microalliage est sans commune mesure avec leur faible effet sur la trempabilité des aciers (seul le vanadium figure dans certaines formules de carbone équivalent) : les aciers microalliés ont ainsi pris une grande place dans les aciers soudables. Cet abaissement de la teneur en carbone est très favorable pour la sensibilité à la fissuration à froid, mais aussi pour l'amélioration de la ténacité du métal de base ainsi que des zones affectées. La **Figure III.4** montre ainsi une comparaison entre une nuance classique et une nuance microalliée en utilisant un essai classique de fissuration par l'essai d'implant.

Néanmoins, l'effet durcissant et fragilisant des précipités peut se faire sentir dans les zones qui subissent des cycles thermiques à haute température telles que les zones affectées par la chaleur et le métal fondu. La **Figure III.5** montre ainsi les variations des mesures de ténacité en fonction des teneurs en niobium et vanadium, et des conditions de soudage qui déterminent les cycles thermiques [6].

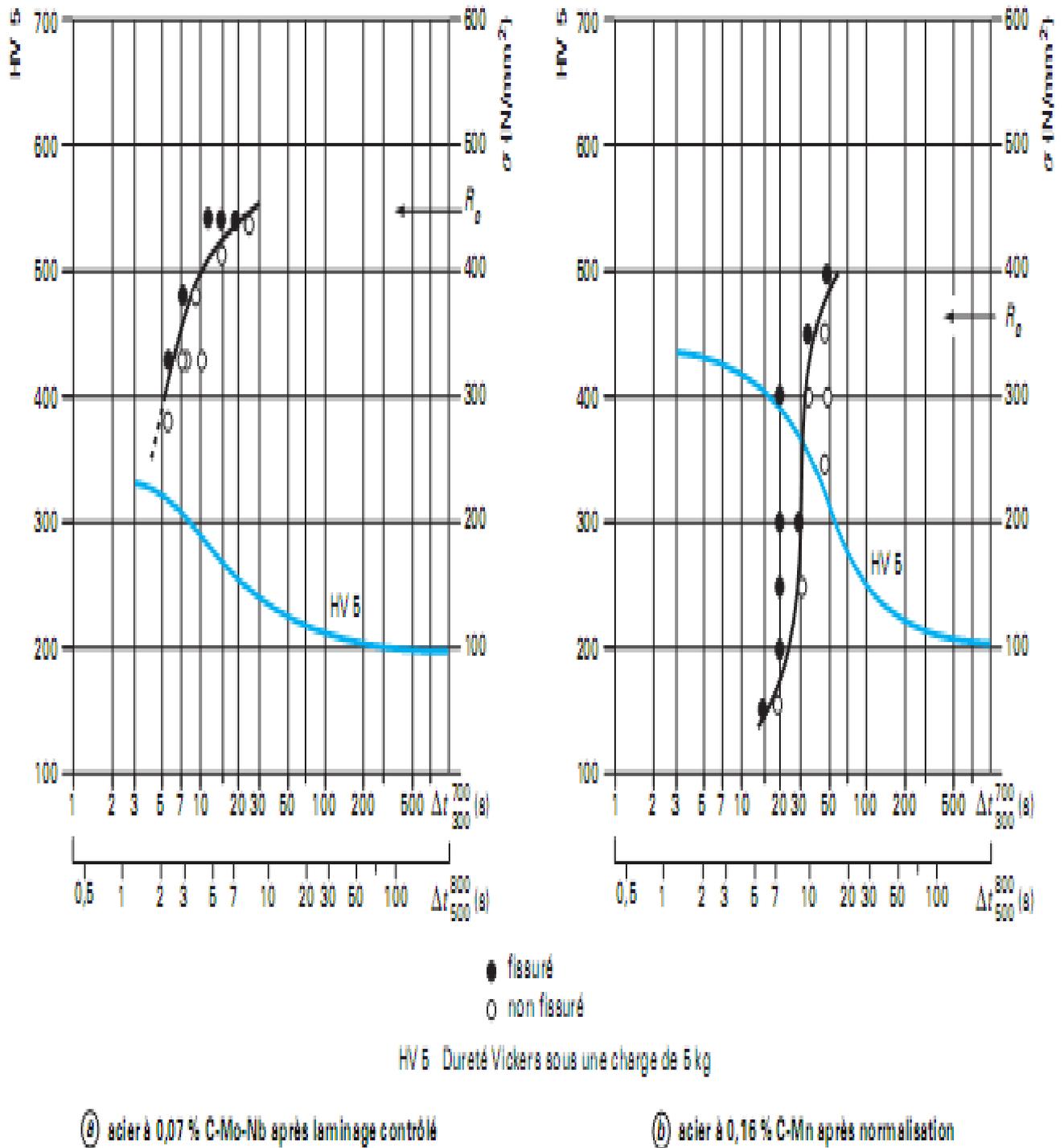


Figure III.4 : Dureté sous cordon et fissuration d'un acier microallié (méthode des implants)[6]

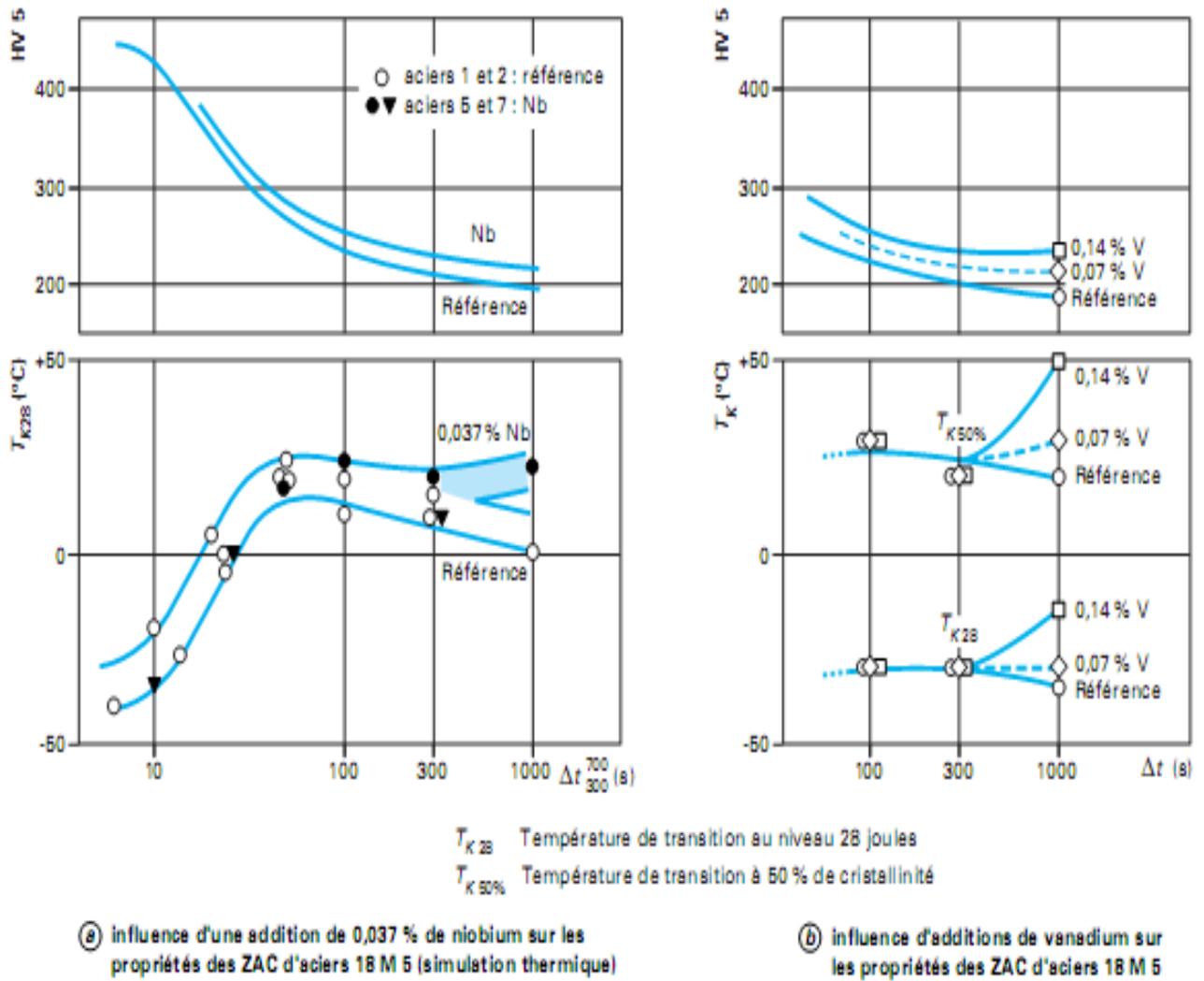


Figure III.5 : Influence d'une addition de niobium ou de vanadium sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT)[6]

Dans le métal fondu, la teneur en élément dépend de la dilution avec le métal d'apport, ce qui dépend de l'énergie de soudage ; il se produit ensuite une reprecipitation si la vitesse de refroidissement le permet. La variation de ténacité est encore plus complexe quand il s'agit de soudures multi passes avec superposition de cycles thermiques. Dans ce cas, les températures atteintes à une certaine distance provoquent la précipitation. Des modèles permettent la prévision des durcissements et de là les variations de ténacité [6].

Enfin, la précipitation peut également se produire au cours de traitements de revenu comme les traitements de relaxation des contraintes (**Figure III.6**).

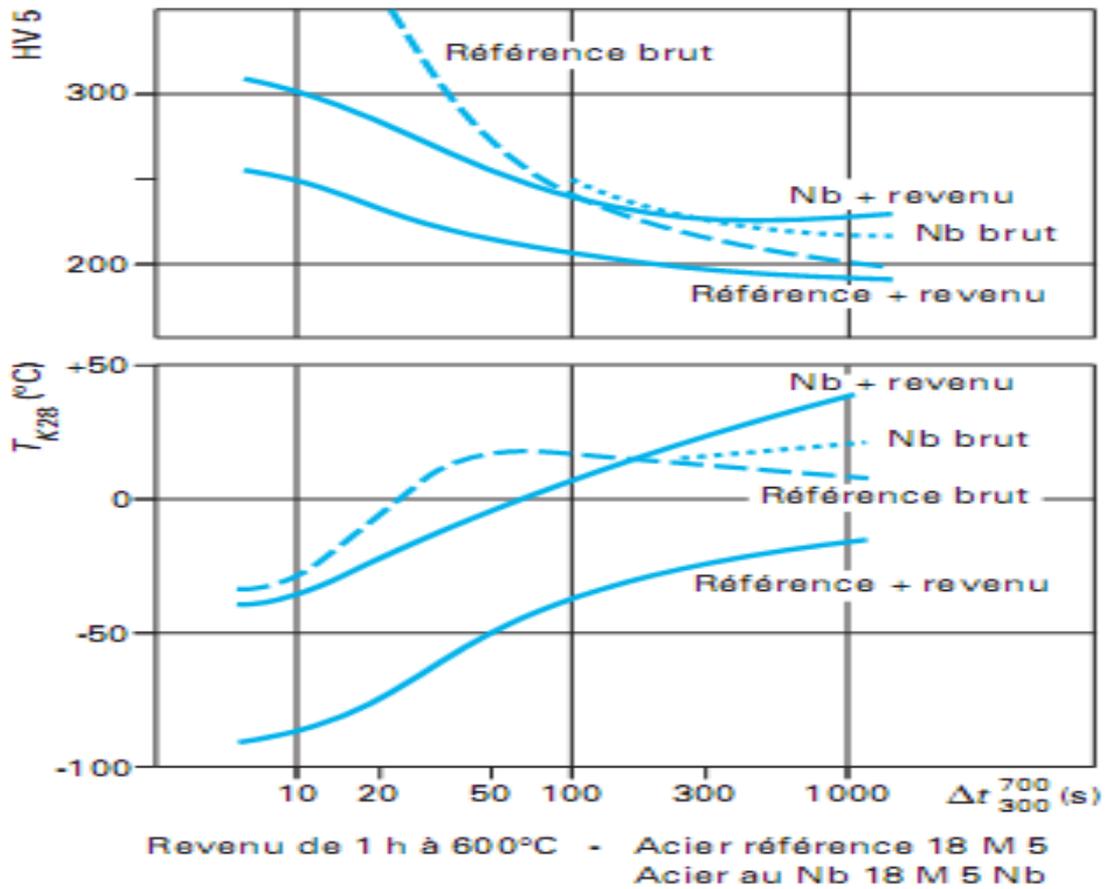


Figure III.6 : Influence du revenu sur les propriétés mécaniques des zones affectées par la chaleur (ZAT)[6]

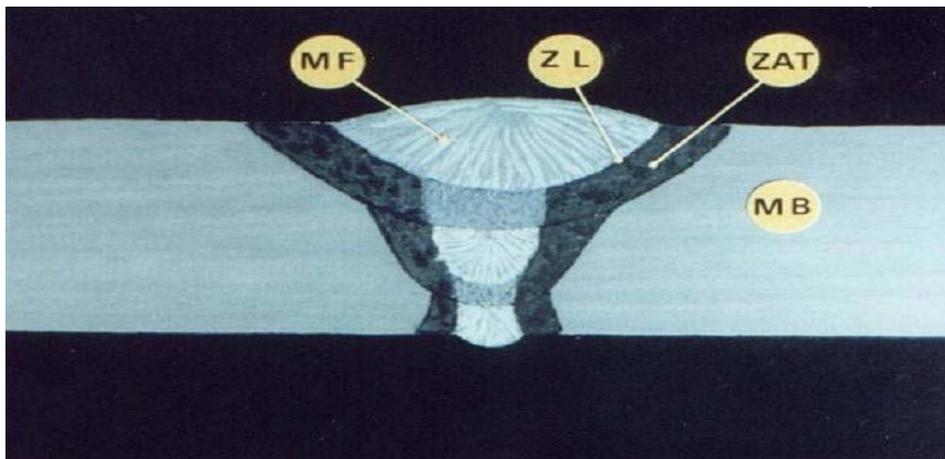


Figure III.7 : Les différentes zones de soudure

MF : métal fondu.

ZL : zone de liaison.

ZAT : zone affectée thermiquement.

MB : métal de base.

III.5. Les défauts de soudure

Faire un cordon de soudure ne consiste pas seulement à remplir de métal un joint préparé, il faut que soient réalisées certaines conditions qui constituent des facteurs importants de la qualité d'assemblage. Les défauts sont présents dans pratiquement toutes les structures métalliques, ils apparaissent lors de la fabrication essentiellement. A la solidification, les variations de volume, de température et de composition, induisent des séries de défauts, les soudures exacerbent les mêmes phénomènes. L'usinage et les traitements thermiques peuvent être à l'origine de fissurations dans l'état final des pièces. Pour contrôler l'état d'une structure, les méthodes de contrôle non destructif permettent de déterminer l'existence et la géométrie de défauts. Les techniques de radiographie ou de contrôle ultrasonore donnent ces informations à cœur, tandis que les techniques de courants de Foucault, la magnétoscopie ou le ressuage donnent des informations sur les défauts proches de la surface ou débouchant [7]

La classification des défauts de soudure conformément à la norme NF EN 26250 [10].

- a. Groupe 1 : Fissures.
- b. Groupe 2 : Cavités.
- c. Groupe 3 : Inclusion solide.
- d. Groupe 4 : Manque de fusion / Manque de pénétration.
- e. Groupe 5 : Défauts de forme.

III.5.1. Défauts de soudage à arc submergé sous flux

III.5.1.1. Porosités

Les soufflures et inclusions de gaz peuvent être causés par :

Trop peu de flux, flux trop fin, flux trop humide ou azoté

- Nettoyage insuffisant
- Soudure manuelle à l'envers polluée
- Pénétration insuffisante dans une soudure en deux couches
- Mauvaise préparation de joint pour la soudure manuelle à l'envers, par ex. un trop grand écartement
- Tension trop élevée, vitesse de soudage trop élevée
- Trop peu de désoxydants dans le fil de soudage (Mn, Si, Al), tôle insuffisamment désoxydée, tôle azotée (procédé Thomas) [7][9].

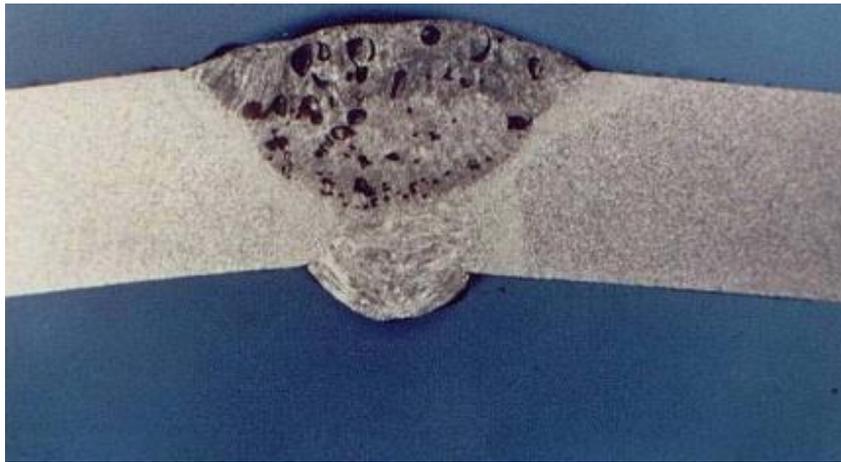


Figure III.7 : porosités

III.5.1.2.Fissures

Les fissures dans la soudure peuvent être dues à:

- Soudures de pointage trop petites
- Tension trop faible, courant trop élevé, pénétration trop élevée
- Mauvaise polarité de l'électrode, mauvaise inclinaison de l'électrode
- Mauvaise combinaison fil-flux (teneur en Mn inférieure à 1,7 fois la teneur en Si)
- Mauvaise séquence de soudage
- Mauvais dispositif de bridage
- Préchauffage trop faible
- Mauvais raccordement à la masse
- Dilution trop élevée avec le métal de base pollué
- Trop grand écartement [7][9].



Figure III.8 : fissure à froid

Chapitre IV

Etude de soudage et caractérisation des tubes

IV.1.Opération de soudage

IV.1.1.Paramètres de soudage

Les tubes seront fabriqués et soudés selon le procédé automatique sous flux.

Le soudage sera fait en deux passes dont l'une à l'intérieur et l'autre de tube.

Les paramètres de soudage à utilisées au niveau des machines à souder sont :

Soudage intérieur		Soudage extérieur	
Intensité (A)	Tension (V)	Intensité (A)	Tension (V)
800/825	33/34	825/850	33/34

Tableau IV.1 : paramètres de soudage d'une machine (A)

- ❖ Vitesse de soudage : 0.75m/mm.
- ❖ Nuance d'acier : X70.
- ❖ Diamètre du fil de soudage INT/EXT : 4mm-L70/LNS140A.
- ❖ Flux de soudage : P223.

IV.1.2.Calcul l'angle de production

$$\sin \alpha = Lc / \pi .D$$

Lc : largeur cisailée

D : diamètre

- Longueur de la bobine brute = 1500 mm
- Largeur cisailée = 1480 mm
- Diamètre = 711.2 mm

Calcul de l'angle d'obtention de tube :

$$\sin \alpha = 1480 / (3.14 \times 711.2) = 0.662$$

$$\alpha = \arcsin \alpha \approx 40^\circ$$

Vitesse d'avance (m/min)	Largeur cisailé (mm)	Diamètre du fil de soudage (mm)
V1=0,75	1480	4
V2=0,80	1480	4
V3=0,85	1480	4

Tableau IV.2 : variation de la vitesse de soudage

IV.1.3.Fil de soudage

Le choix du fil électrode est fait en fonction :

- Du matériau à souder (nuance ou qualité).
- De l'épaisseur.
- Du mode opératoire.

Il y a différents diamètres possibles (mm) : 1.2-1.6-2.0-3.2-4.0.

Celle-ci mesure la vitesse de fusion est elle est principalement fonction :

- Du diamètre de fil.
- De la nature du courant (continu ou alternatif)
- De la nature de fil.
- De l'intensité appliquée.
- De la polarité.

IV.1.3.A. Composition chimique du fil de soudage

Elément	C	Mn	Si	Mo	Fe
Valeur %	0,10	1,0	0,10	0,05	98

Tableau IV.3 : composition chimique du fil de soudage

IV.1.3.B. Caractéristiques mécaniques du fil

Essai de traction du fil

Grandeurs mécaniques	$Re_{0.2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A%
valeur	546	616	26

Tableau IV.4 : valeurs d'essai de traction du fil de soudage

On remarque que le fil de soudage a des meilleures propriétés mécaniques (limité d'élasticité, résistance à traction, allongement)

- Conditions de stockage : Le fil incombustible doit être stocké dans des containers pour éviter la reprise d'humidité .
- Taille de grains varie entre 0.05 et 2 mm.
- Non soluble dans l'eau.
- La densité est de 1.0g/cm³.



Figure IV.1 : Le fil de soudage

IV.1.4.Flux de soudage

Les flux agglomérés ont un aspect mat par rapport aux flux fondus. Pour fabriquer ce type de flux, les constituants sont mélangés à sec puis liés avec du potassium ou du silicate de sodium. Le flux est ensuite chauffé à une température inférieure au point de fusion et reste ainsi à l'état d'une poudre ensuite triée au tamis et emballée.

Le flux aggloméré de soudage utilise dans la soudure des tubes en ALFAPIPE est de type P223, sa composition est :

Elément	Magnésie	Fluorures	Silice	Alumine	Autres
Valeur %	20	20	20	20	20

Tableau IV.5 : composition chimique de flux de soudage

- Produit incombustible.
- Doit être tenu à l'abri de l'humidité pour éviter la rouille.
- Non soluble dans l'eau.
- Densité 7.8g/cm³.
- Ce produit peut être éliminé recyclé conformément à la réglementation de l'entreprise.



Figure IV.2 : le flux de soudage

Avantages

- a) Addition de désoxydants et de ferroalliages.
- b) Peuvent être codés par couleur.
- c) La profondeur du flux est moins importante.

Inconvénients

- a) Le flux est hygroscopique c.à.d. que le flux a tendance à absorber l'humidité.
- b) Le processus de séchage du flux est plus important.
- c) Les laitiers en fusion risquent davantage de provoquer des porosités.
- d) Le recyclage est plus difficile à réussir car il est plus difficile d'éliminer les impuretés et de tamiser.

L'analyse chimique EDS (Expliquée dans la partie caractérisation) sur la zone balayée de métal fondue montre la présence des éléments composants du fil et du flux de soudage ; par exemple l'élément aluminium Al qui vient d'alumine Al_2O_3 un des composants de flux de soudage :

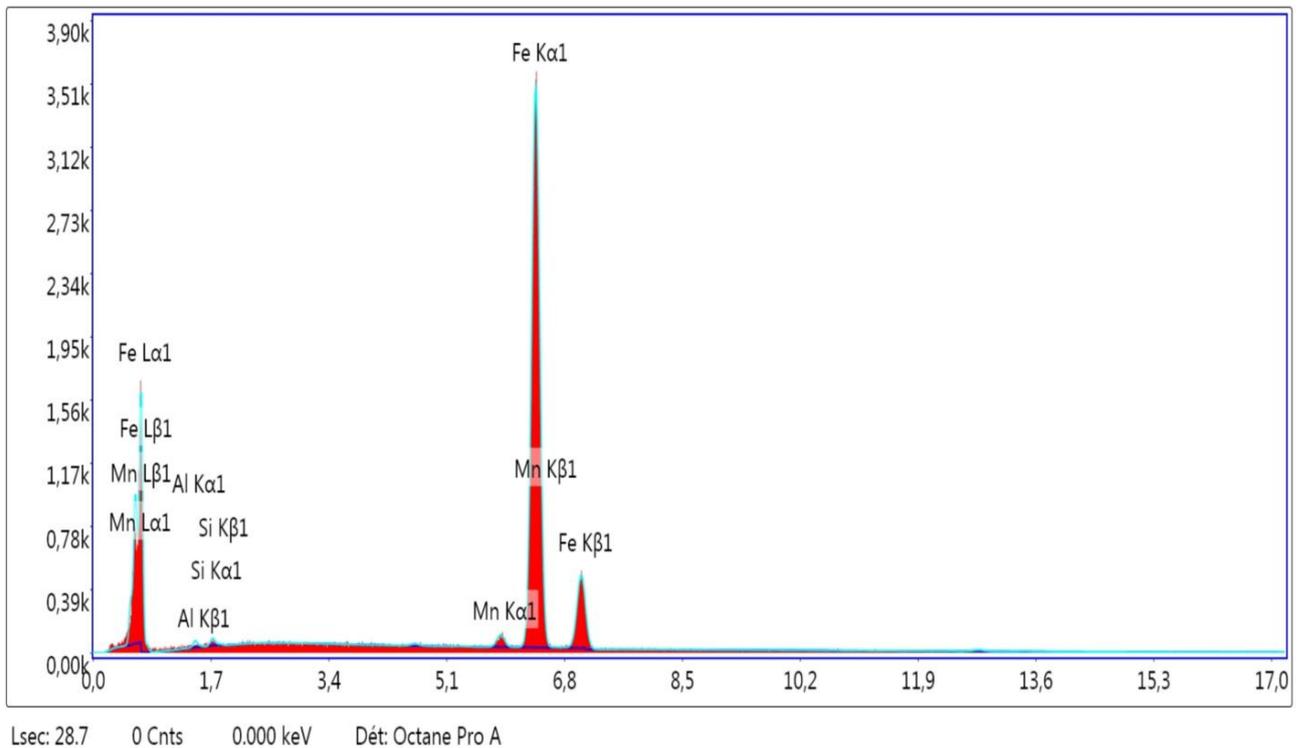


Figure IV.3 : résultats d'analyse EDS sur la zone fondue

IV.2. Contrôles destructifs et caractérisation des tubes

Les contrôles destructifs des tubes soudés en spirale viennent consolider la qualité du produit fabriqué par ALFAPIPE. Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement. Les différents essais destructifs réalisés sur un anneau de tube sont des essais mécaniques (traction, dureté, pliage, résilience), des analyses chimiques...

IV.2.1. Prélèvement des échantillons

Les échantillons pour les essais destructifs sont prélevés d'un anneau du tube obturé à l'une des extrémités, désigné pour le test (lot ou coulée). La paire de plaques (métal de base, métal de base soudé) sont prélevés transversalement à l'axe du tube.



Figure IV.4 : prélèvement d'échantillon

IV.2.2. Préparation des éprouvettes

IV.2.2.1. Aplatissement



Figure IV.5 : Presse hydraulique

IV.2.2.2. Découpage



Figure IV.6: Scie mécanique à ruban semi automatique

IV.2.2.3. Usinage



Figure IV.7 : Fraiseuse PMO FU1.5

IV.2.3. Analyses chimiques, essais mécaniques et observation métallographique

Le tube de notre étude est un tube nommé B2222 d'épaisseur 9.53 mm.

IV.2.3.1. Analyses chimiques

IV.2.3.1.A. Analyse chimique par spectromètre à étincelle

IV.2.3.1.A.a. Définition

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyses sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation du produit en composition chimique et en carbone équivalent (spectromètre à étincelle).



Figure IV.8 : spectromètre à étincelle de type SECTROLAB



Figures IV.9 : échantillon après observation

La composition chimique de l'acier utilisé X70 pour la fabrication du tube fourni selon cette spécification devra satisfaire aux exigences de la norme API 5L. Tel que montré dans le tableau :

Elément	Valeur max%
C	0.12
Si	0.45
Mn	1.70
P	0.025
S	0.015
Cr	0.3
Ni	0.3
Mo	0.1
Cu	0.25
Nb	0.06
Ti	0.06
V	0.10
N	0.012
CE (Pcm)	0.20

Tableau IV.6 : composition chimique du métal de base

% Min ≤	Elément	≤ %Max
0.015	Al	0.050
	B	0.0005
	Ca	0.006
	Sn	0.010

Tableau IV.7: pourcentage min et max des éléments

- $(Cu+Cr+Ni+Mo) \leq 0.5 \%$, $(Nb+V+Ti) \leq 0.15 \%$, $Al/N \geq 2/1$

-Pour toute réduction de 0.01% de C, une augmentation de 0.05% de Mn est permise, jusqu'à une teneur limite de 2%.

IV.2.3.1.A. b. Le carbone équivalent de l'acier

Le carbone équivalent (Ceq) d'un acier (matériau de base ou métal de la soudure) renseigne sur certain aspect de son comportement, notamment en ce qui concerne son aptitude à la trempe et le risque de criquage dû à la présence d'hydrogène. Le Ceq s'exprime en pourcentage.

L'acier à Ceq élevé risque davantage de durcir dans les zones thermiquement affectées des soudures réalisées et est plus sujet au criquage dû à la présence d'hydrogène que l'acier à faible Ceq.

L'aptitude à la rupture joue sur la soudabilité ; c'est pourquoi il est plus difficile de réussir le soudage d'acier à Ceq élevé.

Le Ceq est influencé par les éléments d'alliage de l'acier. Diverses formules permettent de calculer le Ceq, la formule utilisée étant déterminée par le type d'acier et les aspects particuliers et importants du comportement. Le Ceq de l'acier modérément allié, en ce qui concerne son aptitude à la trempe et son risque de criquage dû à l'hydrogène, se calcule souvent grâce à la formule *d'International Institut of Welding (IIW)*.

$$\text{Ceq} = \%C + \%Mn + (\%Cr + \%Mn + \%V) / 5 + (\%Cu + \%Ni) / 15$$

Le carbone et le manganèse ont l'impact le plus important sur la valeur du Ceq en ce qui concerne les aciers modérément alliés. C'est pourquoi pour des calculs d'ordre général, la formule peut parfois être raccourcie :

Le Ceq pour le tube et les soudures correspondantes est en principe inférieur à 0.4%.

$$\text{CE} = C + Mn/6$$

- Si $\%C \leq 0.10$ $C_{qcm} = C + (Si / 30) + (Mn + Cu + Cr) / 20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B$

$$C_{qcm} \text{ max} = \mathbf{0.20}$$

-Si $\%C \geq 0.10$ $Ceq = C + Mn/6 + (Mo + V + Cr) / 5 + (Cu + Ni) / 15$

$$Ceq \text{ max} = \mathbf{0.38}$$

IV.2.3.1.A. c. Epreuve d'analyse chimique API 1104

Epreuve	Dimensions (mm)		
	Lar	Lt	Ep
Valeur	40	40	9,53

Tableau IV.8 : dimensions d'épreuve d'analyse chimique

IV.2.3.1.A.d. Résultat d'analyse chimique

La nuance d'acier étudiée est X70 de type faiblement alliée aux éléments Nb, V et Ti. Le résultat de la composition chimique du tube est donné dans le tableau ci-dessous :

Elément	Valeur %
C	0,068
Si	0,36
Mn	1,621
P	0,006
S	0,000
Cr	0,029
Ni	0,017
Mo	0,004
Al	0,029
Co	0,0003
Cu	0,015
Nb	0,068
Ti	0,014
V	0,002
W	0,001
Fe	97,774

Tableau IV.9 : Résultats d'analyse chimique de métal de base du tube

- Nb+V+Ti % $\leq 0,15$
- On observe que : %C= 0,068% ≤ 0.10 donc :

$$C_{qcm} = C + (Si / 30) + (Mn + Cu + Cr) / 20 + Mo/15 + Ni/60 + V/10 + 5B$$

$$C_{pcm} \text{ max} = \mathbf{0.166 \%}$$

On observe que L'acier X70 contient une faible teneur de carbone (0.068 %) et en Nb, Ti et V.

Aussi on remarque clairement sur le tableau si dessus que le taux de carbone équivalent ne dépasse pas la tolérance admissible pour qu'un acier soit soudable, par contre les faibles pourcentages montré nous amène à dire que notre acier est parfaitement soudable et comme ça le risque de durcissement de la zone affecté thermiquement est infiniment faible, sur le chapitre qui suit on va montrer la distribution des valeurs de macro dureté sur les trois zones de soudure.

IV.2.3.1.B. Analyse chimique par microscope électronique à balayage MEB équipé des sondes EDS de ENSMM Annaba

IV.2.3.1.B. a. Définition

EDS est une technique de caractérisation chimique de la matière basée sur les interactions rayonnement-matière. Elles permettent de déterminer la composition chimique d'un échantillon en le bombardant avec un flux d'électrons, et en analysant les rayons X émis.

En pratique, la rapidité d'analyse EDS est exploitée pour identifier un échantillon inconnu, puis l'analyse WDS pour une précision de détection des éléments présents à l'état de trace.

IV.2.3.1.B. b. Avantages

- 1-Analyse qualitative et semi quantitative rapide,
- 2-Tous les éléments du bore jusqu'à l'uranium sont détectés en même temps,
- 3- Limite de détection : de 1 à 0.1% de concentration pour les éléments à poids atomique moyens ou légers,
- 4- Volume de matière analysée: 1Km³ (minimum)[11].

Cette technique d'analyse EDS de Microscope électronique à balayage, que on la utilisée au niveau de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie Annaba; permet de confirmer la présence de la plupart des éléments de **Tableau IV.9** sur la zone balayée du métal de base MB par les pics des éléments :

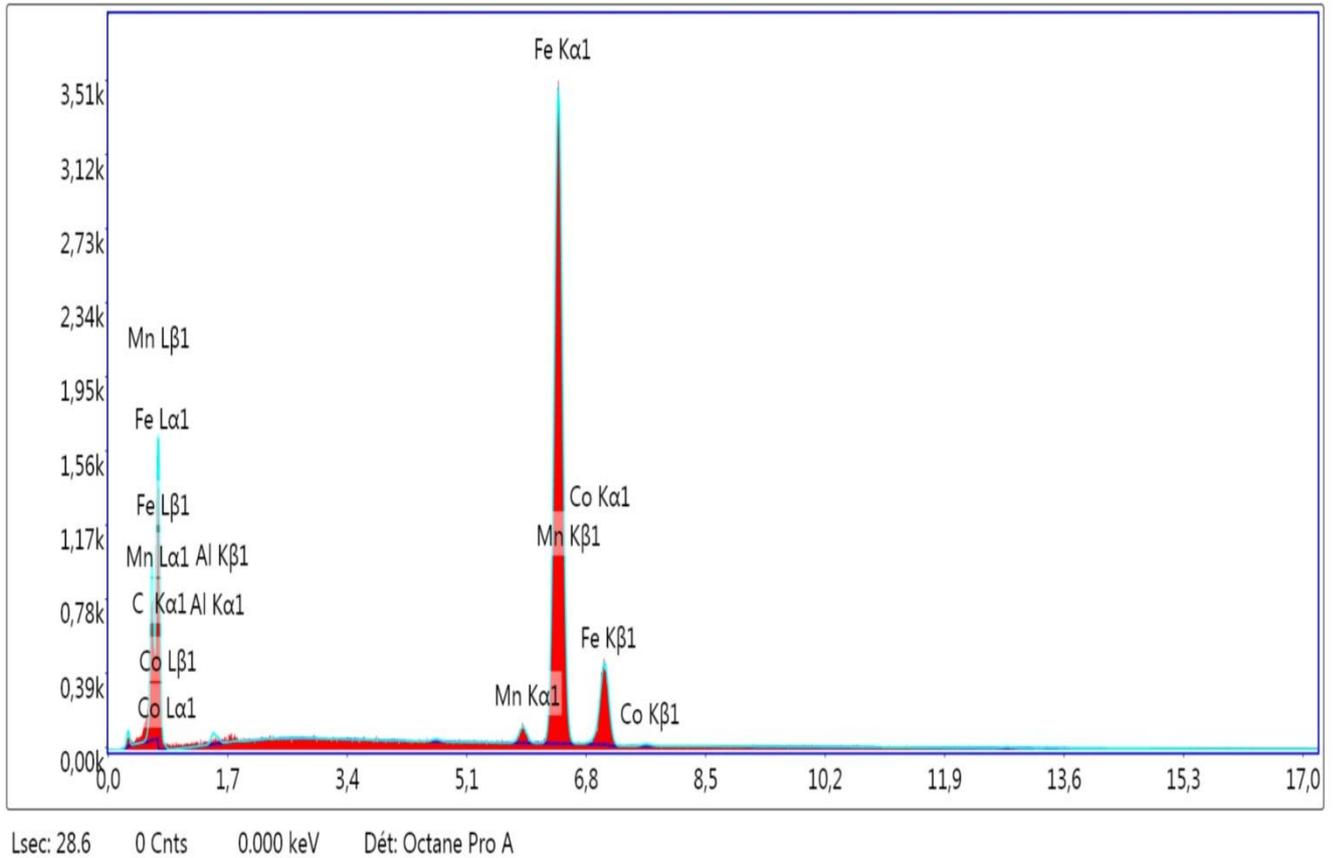


Figure IV.10 : résultats d'analyse EDS sur métal de base

IV.2.3.2. Essai mécaniques

IV.2.3.2.1. Essai de traction

IV.2.3.2.1.A. Définition

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 :

1. La limite d'élasticité (R_e) : MPa
2. La résistance à la traction (R_m) : MPa
3. Le pourcentage d'allongement après rupture ($A\%$)



Figure IV.11 : Machine de traction de type Z1200 ZWICK/ROELL



Figure IV.12: éprouvette de traction après rupture

La courbe suivante est la courbe conventionnelle de traction [12] :

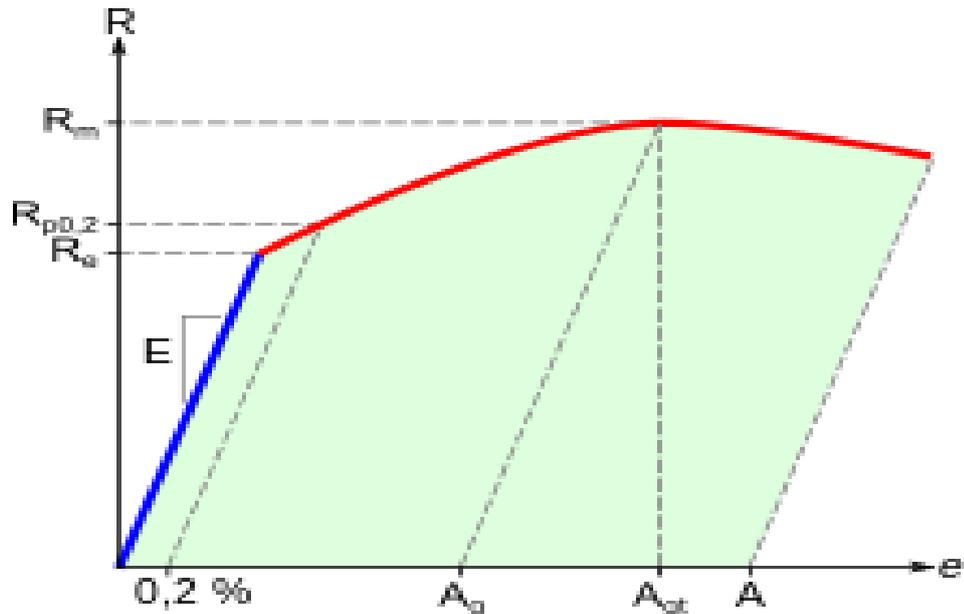


Figure IV.13 : courbe conventionnelle de traction

La machine de traction d'ALFAPIPE est équipée d'un capteur de force interchangeable, fixé sur la traverse mobile, d'un capteur de déplacement, de deux attaches (mors) mobiles idéalement auto-serrantes pour réaliser un essai de traction et d'un enregistreur graphique. La traverse mobile est entraînée par deux vis latérales, actionnées par un moto-rédu.

IV.2.3.2.1.B. Eprouvettes de traction

La norme API5L exige deux échantillons dans l'essai de traction :

- ✓ T.B : traction sur métal de base.
- ✓ T.S : traction sur cordon de soudure.

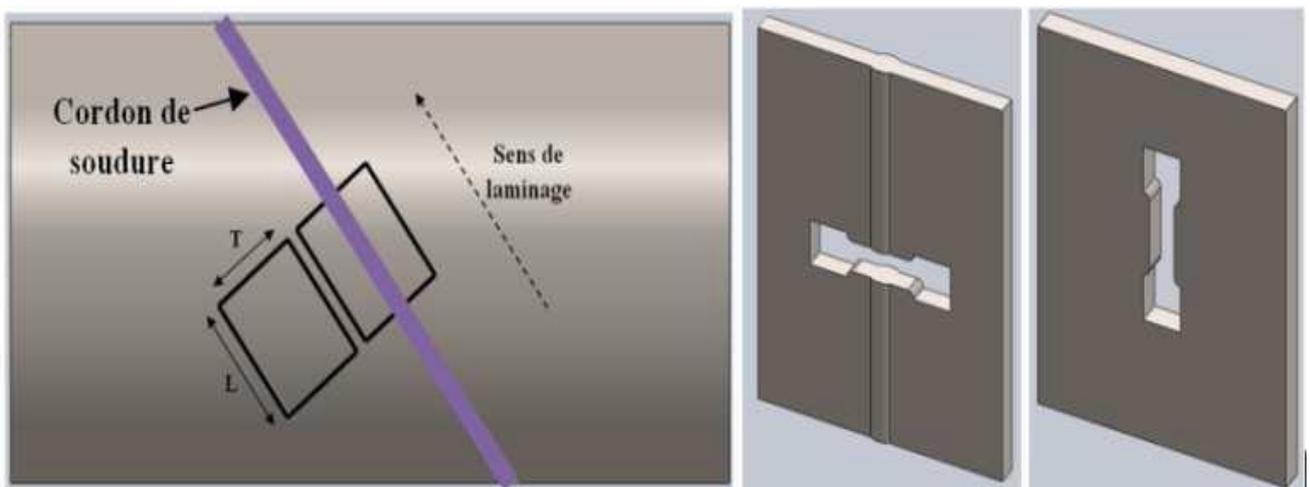


Figure IV.14: Emplacement des prélèvements des échantillons TN et TS dans le tube

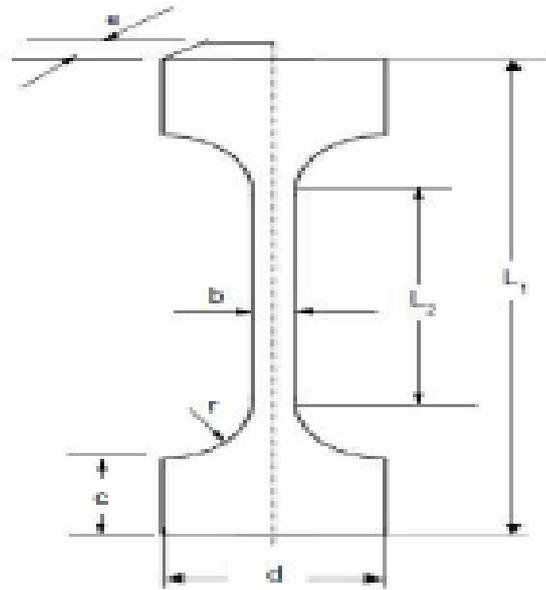


Figure IV.15 : dimensions d'éprouvette suivant la norme EN10002

Les éprouvettes d'essai de traction sur soudure sont prélevées de sorte que l'axe de traction est à 90° de la direction de la soudure, celle-ci se trouve située au centre de l'éprouvette d'essai. Ces éprouvettes ont une épaisseur égale à l'épaisseur totale du tube. La soudure n'est pas arasée.

Eprouvette	Dimensions (mm)				
	Lar	Lt	Ep	Lc	R
6a	25	230	9,53	-	-
6b	19	230	9,53	70	25

Tableau IV.10 : dimensions d'éprouvette de traction soudure

La machine d'essai de traction utilisé MOHR de capacité Max 600 kN.

Les résultats sont donnés par le logiciel texspert sous forme :

- ✓ Tableau : les caractéristiques mécaniques de métal de base et la soudure.
- ✓ Les courbes de traction pour le métal de base TN et la soudure TS.

IV.2.3.2.1.C. Exigences des valeurs de traction selon API

Les valeurs de la limite d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement doivent être comme suit :

Essai de traction	Condition	Exigences	
		Minimale	Maximale
Traction métal de base TN	10 à 35 C°		
-E_{0,5%}		485 MPa	
-R_m		570 Mpa	
- E_{0,5%}/R_m		-	0,8
-A %		18%	-
Traction soudure TS	10 à 35 C°		
-R		570 Mpa	760 Mpa

Tableau IV.11 : exigences des valeurs de traction

IV.2.3.2.1.E. Résultats d'essai de traction

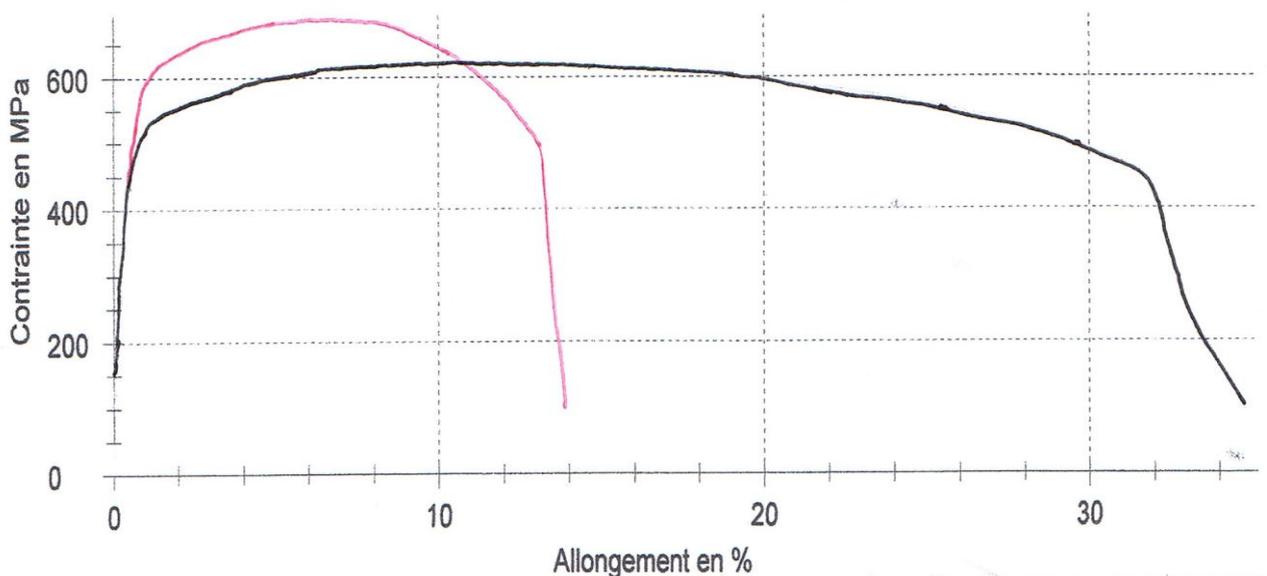


Figure IV.16: courbe de TN et TS du tube B2222

Légende	B2222	Désignation éprouvette	a mm	b mm	S ₀ Mm ²	R _{t0,5} MPa	R _m Mpa	R _{t0,5} /R _m	A %
	Max					635,0	760,0	0,90	100,0
	Min					485,0	570,0	0,00	22,0
	1,1	TN	9,68	38	367,8	520,0	621,0	0,84	34 ,8
	1,2	TS	9,59	38,1	365,4	-	687,7	-	-

Tableau IV.12 : valeurs d'essai de traction du tube

Les résultats de l'essai de traction sont conformes avec l'exigence de la norme API 5L,

On remarque une légère augmentation de la résistance maximale sur le cordon de soudure par rapport au métal de base et une diminution de l'allongement A%.

IV.2.3.2.1.F. Etude comparative entre A%, R_m et E_{0,5} certificat et A%, R_m et E_{0,5} mesuré sur tube des 25 tubes de même série

1.Comparaison entre A% certificat et A% mesuré sur tube

Nbre d'essai	A% certif	A% mesuré	A% (Min)	A% (Max)	A% (Moy)
1	31,5	35,0	22	0	11
2	29,6	37,9	22	0	11
3	32,5	35,8	22	0	11
4	32,7	34,6	22	0	11
5	32	38,7	22	0	11
6	33,6	33,4	22	0	11
7	32,9	35,5	22	0	11
8	31,6	33,4	22	0	11
9	34,1	34,1	22	0	11
10	34,5	38,9	22	0	11
11	31,9	36,9	22	0	11

12	34,6	34,2	22	0	11
13	36,6	37,8	22	0	11
14	34,4	34,8	22	0	11
15	33,5	37,8	22	0	11
16	29,7	31,9	22	0	11
17	32,3	36,0	22	0	11
18	36,8	33,5	22	0	11
19	33,8	38,3	22	0	11
20	31,2	37,6	22	0	11
21	29,9	34,8	22	0	11
22	32,5	35,1	22	0	11
23	31,5	34,8	22	0	11
24	31,2	34,2	22	0	11
25	29,9	34,8	22	0	11

Tableau IV.13 : valeurs d'allongement A%

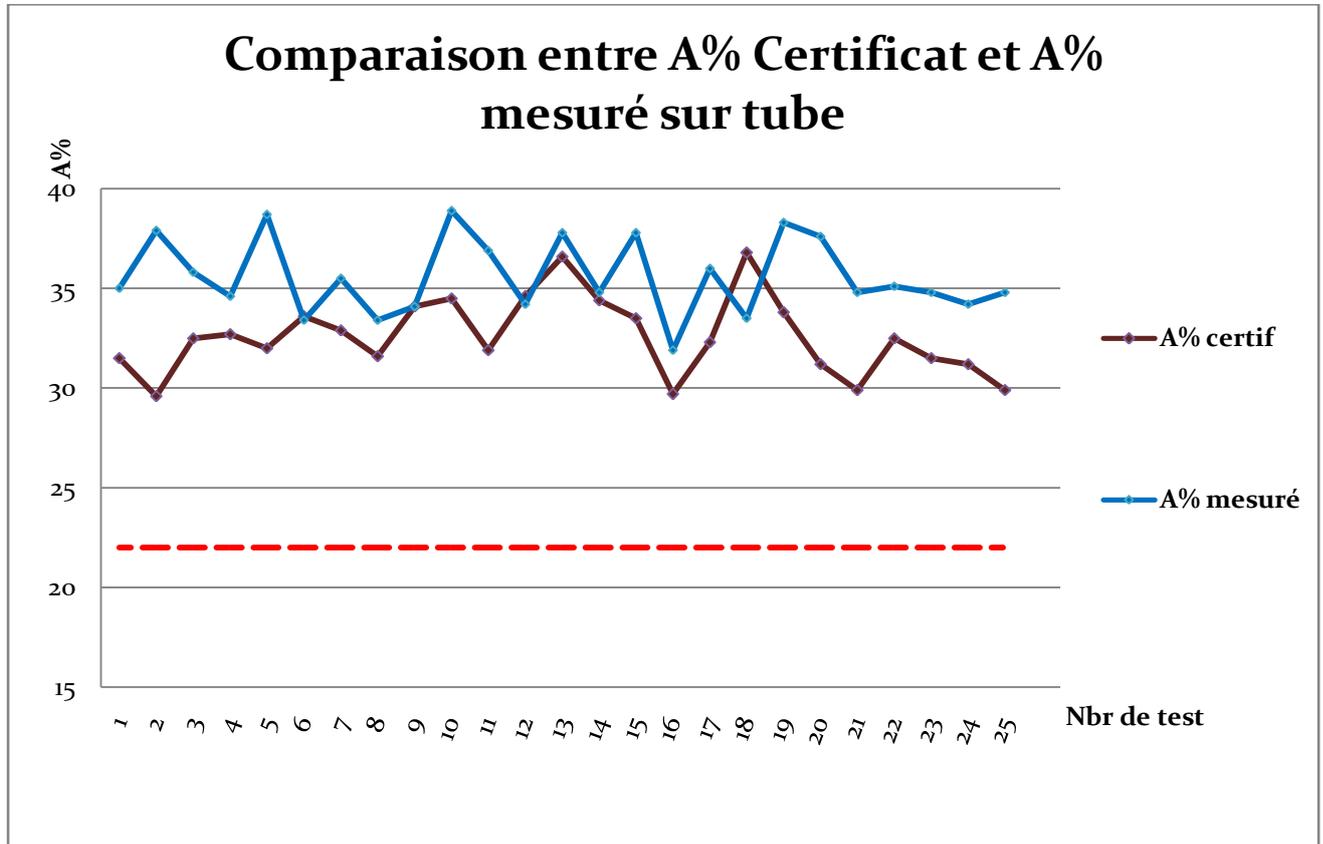


Figure IV.17: comparaison entre A% certificat et A% mesuré sur tube

On remarque que :

Les valeurs d'allongement A% mesurés sur les 25 tubes sont dans la norme API ($A\% \geq 22$),

Les valeurs de A% de la plupart des tubes sont supérieures à que des A% certifiés

Le dernier A% mesuré (N=25) est de tube de notre étude B2222 : on observe que son allongement est supérieur que de certifié ($34,8 > 29,9$)

2.Comparaison entre Rm certificat et Rm mesuré sur tube

Nbre d'essai	R certif	R mesuré	R (Min)	R (Max)	R(Moy)
1	655	619,0	570	760	665
2	654	630,6	570	760	665
3	667	619,5	570	760	665
4	652	619,1	570	760	665
5	653	612,9	570	760	665
6	644	618,0	570	760	665
7	652	633,8	570	760	665
8	656	615,0	570	760	665
9	648	635,6	570	760	665
10	653	606,1	570	760	665
11	649	610,5	570	760	665
12	667	609,0	570	760	665
13	659	618,5	570	760	665
14	657	629,2	570	760	665
15	637	609,4	570	760	665
16	639	648,8	570	760	665
17	645	611,5	570	760	665
18	654	612,7	570	760	665
19	650	626,8	570	760	665
20	660	627,2	570	760	665
21	693	615,8	570	760	665
22	656	621,8	570	760	665
23	673	621,6	570	760	665

24	660	627,9	570	760	665
25	693	621,0	570	760	665

Tableau IV.14 : valeurs de la résistance à traction Rm

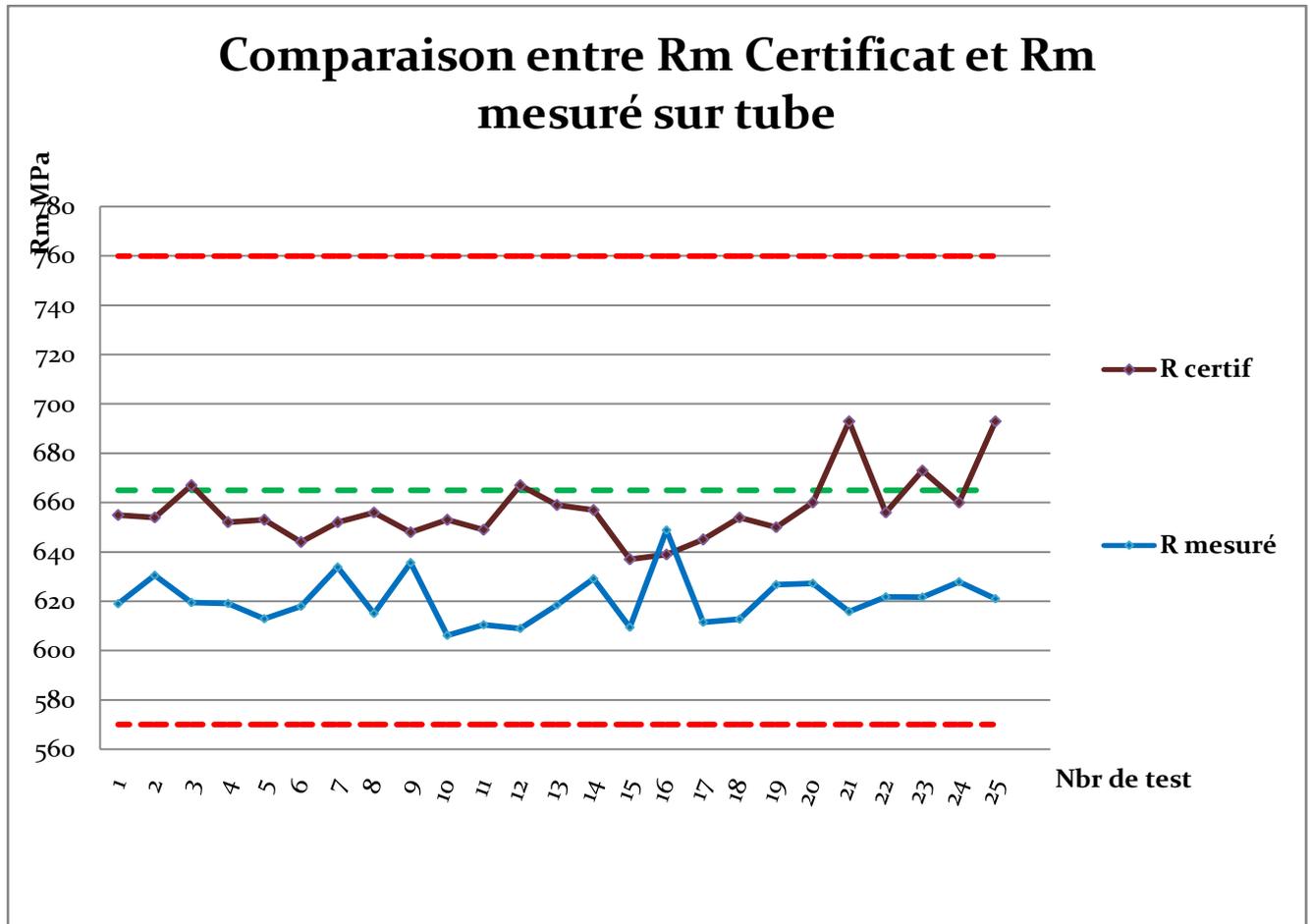


Figure IV.18 : comparaison entre Rm certificat et Rm mesuré sur tube

On remarque que :

Les valeurs de la traction à traction Rm mesurés sur les 25 tubes sont dans la norme API ($570 \leq Rm \leq 760$).

Les valeurs de Rm de tous tubes sont inférieures que des Rm certifiés sauf le valeur de test N=16 , ou son valeur $Rm=648,8 > Rm\text{ certifié}= 639$

Le dernier Rm mesuré (N=25) est de tube de notre étude B2222 : on observe que sa résistance à traction est inférieure que de certifié ($621,0 < 693$).

3.Comparaison entre $E_{0,5}$ certificat et $E_{0,5}$ mesuré sur tube

Nb re d'essai	$E_{0,5\%}$ certif	$E_{0,5\%}$	$E_{0,5\%}$ (Min)	$E_{0,5\%}$ (Max)	$E_{0,5\%}$ (Moy)
1	562	531,0	485	635	560
2	555	533,1	485	635	560
3	594	522,8	485	635	560
4	575	515,7	485	635	560
5	590	517,0	485	635	560
6	567	523,0	485	635	560
7	584	545,5	485	635	560
8	582	505,9	485	635	560
9	584	540,8	485	635	560
10	578	504,5	485	635	560
11	581	509,2	485	635	560
12	599	510,6	485	635	560
13	580	513,4	485	635	560
14	595	534,7	485	635	560
15	564	513,2	485	635	560
16	566	561,8	485	635	560
17	573	517,3	485	635	560
18	584	514,9	485	635	560
19	590	532,2	485	635	560
20	605	535,2	485	635	560
21	622	511,4	485	635	560
22	573	529,3	485	635	560
23	605	521,8	485	635	560
24	605	531,1	485	635	560
25	622	520,0	485	635	560

Tableau IV.15 : valeurs de $E_{0,5}$

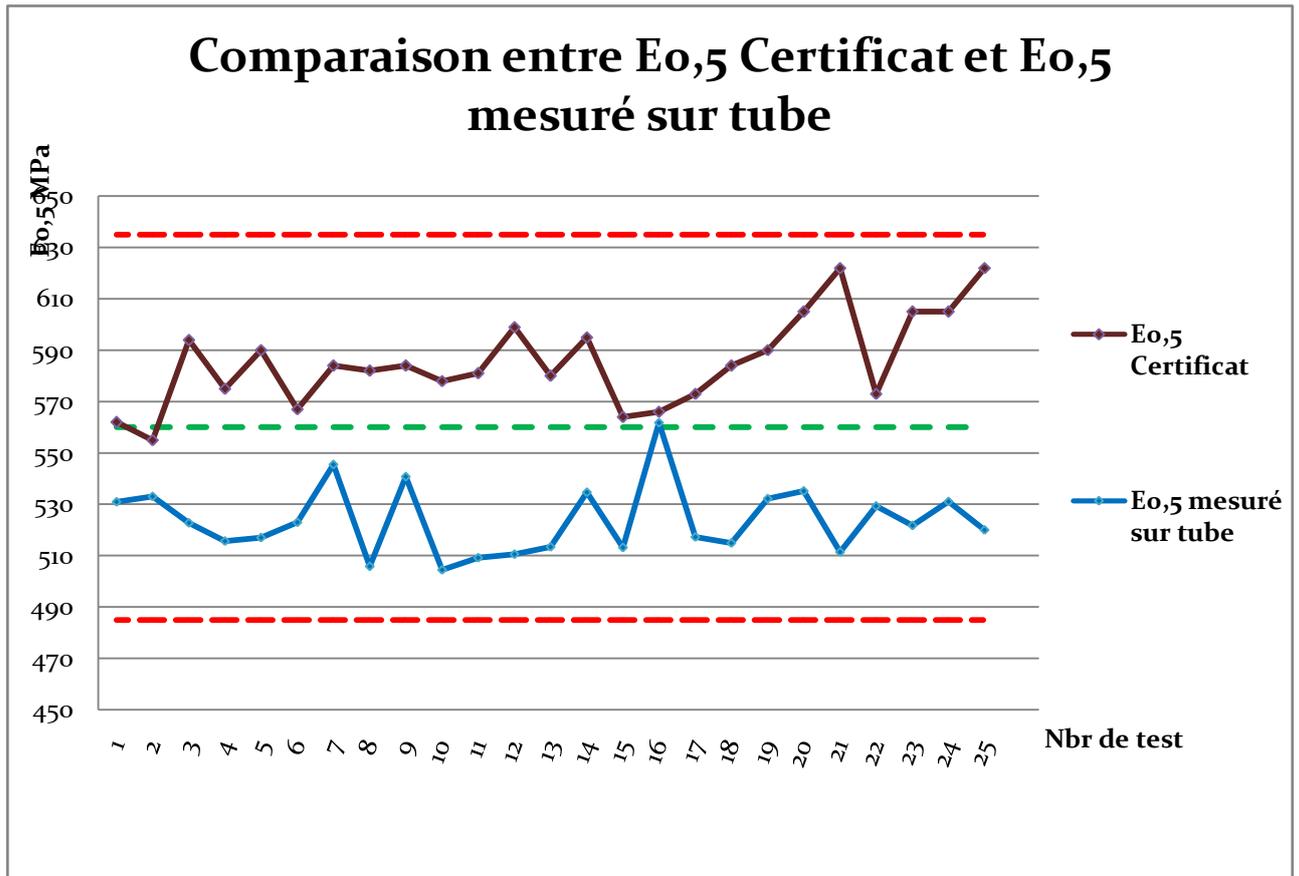


Figure IV.19 : comparaison entre $E_{0,5}$ certificat et $E_{0,5}$ mesuré sur tube

On remarque que :

Les valeurs de $E_{0,5}$ mesurés sur les 25 tubes sont dans la norme API ($435 \leq E_{0,5} \leq 685$).

Les valeurs de $E_{0,5}$ de tous tubes sont inférieurs que des $E_{0,5}$ certifiés.

Le dernier $E_{0,5}$ mesuré (N=25) est de tube de notre étude B2222 : on observe que sa limite d'élasticité est inférieure que de certifié ($520 < 622$).

IV.2.3.2.2. Essai de pliage

IV.2.3.2.2.A. Définition

L'essai de pliage consiste à solliciter en flexion une éprouvette de section carrée. Généralement, cet essai est réalisé avec contrôle visuel, pour une grande déformation jusqu'à atteindre un angle de pliage spécifique. Nous avons fait deux essais de pliage (ED endroit et EV envers) sur la machine Mohr fedehaf (Zwick-Roller) dans le but de rechercher toutes les imperfections de tension dans la soudure ou prouver sa bonne qualité [13].

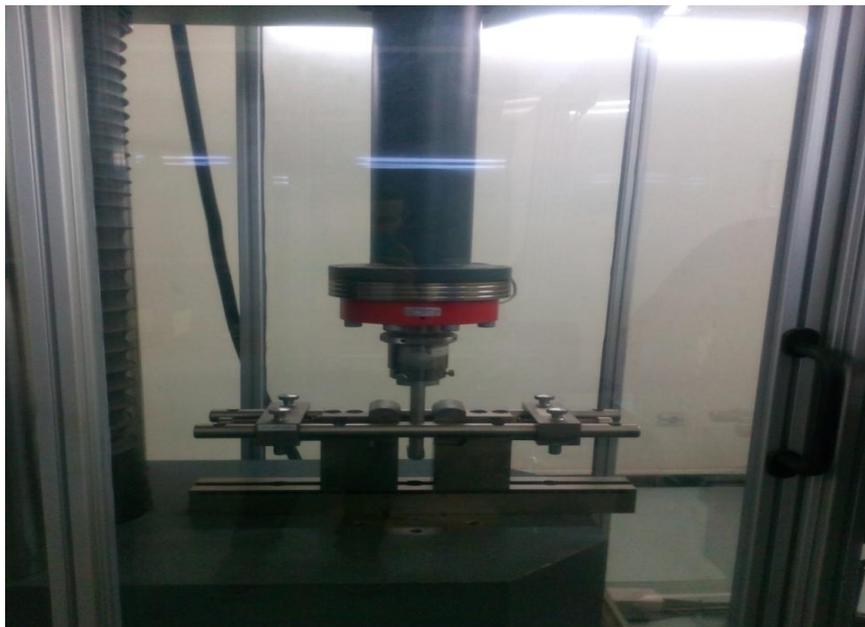


Figure IV.20 : machine de pliage de type Z1200 ZWICK/ROELL



Figure IV.21 : éprouvettes de pliage ED et EV après l'essai

Le longueur de crique de l'essai de pliage ED et EV doit être comme suit :

Pliage soudure guidé	Condition	Exigences
Endroit	10 à 35 C°	Longueur de crique
Envers		Dans métal d'apport $\leq 3\text{mm}$ Dans métal de base $\leq 6\text{mm}$

Tableau IV.16 : exigences d'essai de pliage selon API 5L

IV.2.3.2.2.B. Eprouvettes de pliage

Pour cela, on a préparé deux éprouvettes plates rectangulaires de la même coulée :

Eprouvette	Dimensions (mm)		
	Lar	Lt	Ep
Sur coté	12,7	230	9,53
ED/EV	25	230	9,53

Tableau IV.17 : Eprouvette de pliage API 1104

IV.2.3.2.2.C. Résultats d'essai de pliage

Le résultat est fonction de l'apparition de déchirures ou arrachements provoqués par d'éventuels défauts préexistants dans la soudure (ou dans le métal de base), le critère d'acceptation étant souvent associé à une longueur de défaut préétablie à ne pas dépasser.

D'après notre résultat d'essai, le tube B2222 est acceptable (observation RAS).

IV.2.3.2. 3.Essai de résilience

IV.2.3.2.3.A. Définition de principe d'essai

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre K (Joules/cm²) et utilise deux éprouvettes V et U. En ALFAPIPE, on utilise seulement l'éprouvette V.

L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau [13].



Figure IV.22 : éprouvette de résilience type V



Figure IV.23: machine de résilience de type PSW750 ZWICK/ROELL



Figure IV.24 : éprouvette après l'essai

IV.2.3.2.3.B. Relation de résilience

$$K_v = E_a / S_0$$

K_v :résilience (J/mm^2)

E_a : énergie absorbée (Joule)

S_0 : Section (mm^2)

IV.2.3.2.3.C. Schématisation de l'essai de résilience

-Au départ, le pendule est placé à une hauteur paramétrée qui devra délivrer une énergie normalisée de 294 Joules (si l'on tient compte de la gravité de $9,81 m/s^2$)

-Le pendule est libéré, ce qui grâce à son propre poids, provoquera un choc.

L'éprouvette encaissera une partie du choc, mais sera brisée.

-Le pendule continuera dans son élan jusqu'à une certaine hauteur, ce qui permettra de mesurer l'énergie absorbée par l'éprouvette.

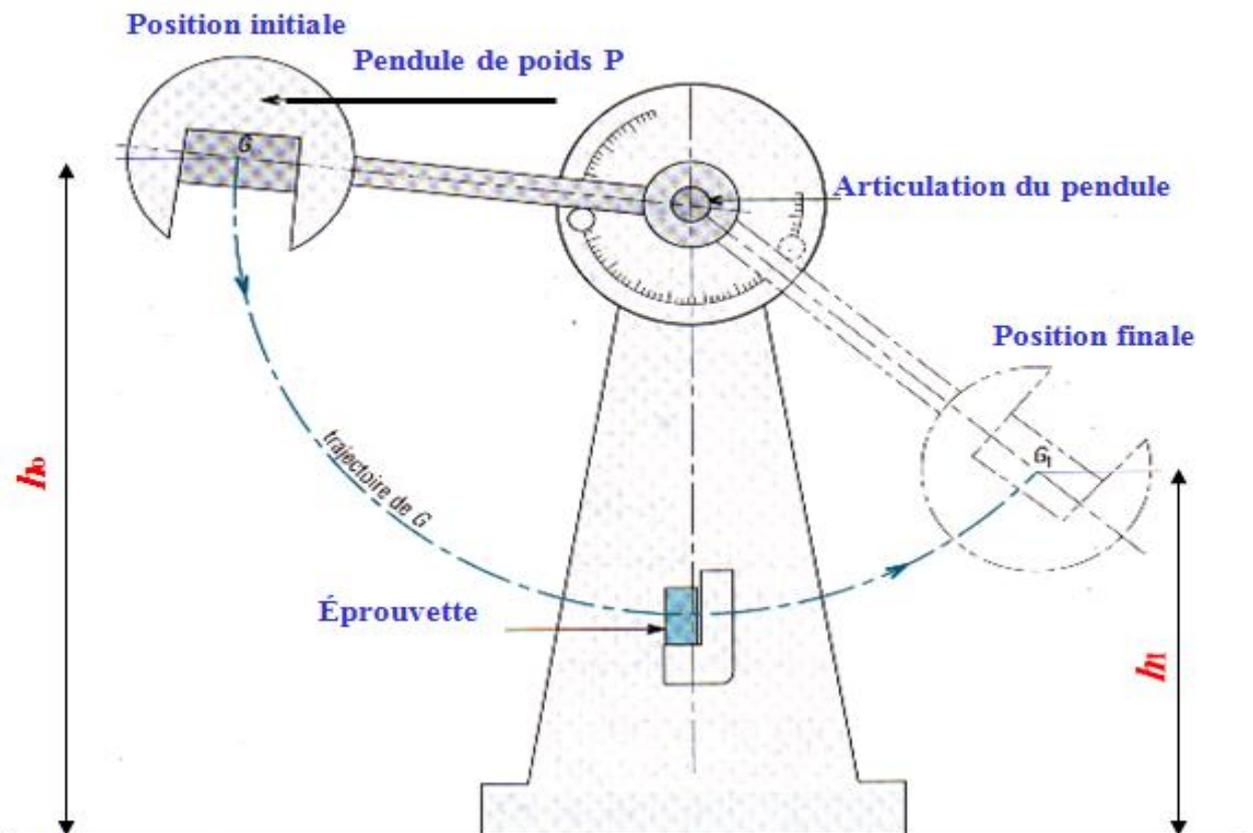


Figure IV.25 : schématisation de l'essai de résilience [14]

IV.2.3.2.3.D. Eprouvtes de résilience API 1104

L'essai de résilience ont été réalisé sur des éprouvettes normalisées CVN 10*10 dont la géométrie selon API 5L .

Les 9 éprouvettes ont été prélevées sous angle de 45° par rapport à l'axe de laminage et de trois zones le MB, S, ZAT .



Figure IV.26 : méthode d'obtention des trois types d'éprouvettes de résilience

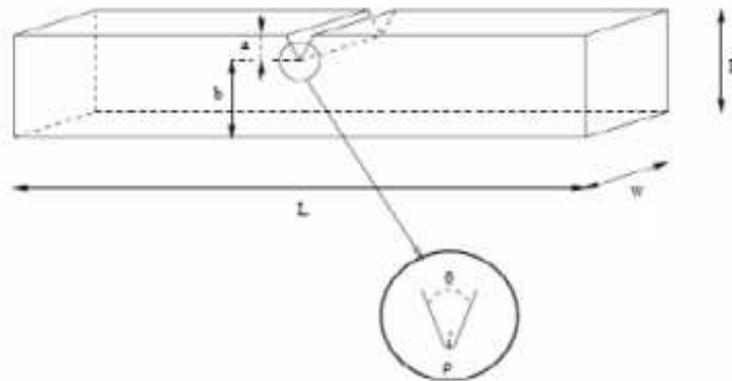


Figure IV.27: éprouvette de résilience type V

Longueur	Largueur	Epaisseur	W
55±1 mm	10±0,2 mm	10±0,2 mm	8 mm
Type d'éprouvette	Rayon d'entaille	Angle d'entaille	Profondeur
V	P		A
Charpy V	0,25 mm	45°	2 mm

Tableau IV.18: caractéristiques d'éprouvette de résilience

IV.2.3.2.3.E. Exigences des valeurs de résilience selon API 5L en ALFAPIPE

Zone	Transversaux	Température	Moyenne mini	Individuelle mini
Métal de base	3 CVN	0 C°	34 J/cm ²	25 J/cm ²
Cordon de soudure	3 CVN		34 J/cm ²	25 J/cm ²
ZAT	3 CVN		34 J/cm ²	25 J/cm ²

Tableau IV.19 : Exigences des valeurs de résilience

IV.2.3.2.3.G. Résultats d'essai de résilience à T= -10 C°

Nombre	Désignation séries	Désignation éprouvette	Energie J	W J	W(%) J	Kv KJ/m ²
1	B2222	M1	750	233	31	3889
2		M2	750	204	27	3407
3		M3	750	229	31	3825
4		S1	750	190	25	3171
5		S2	750	182	24	3035
6		S3	750	147	20	2442
7		Z1	750	150	20	2496
8		Z2	750	180	24	3007
9		Z3	750	164	22	2734

Tableau IV.20: résultats de résilience du tube

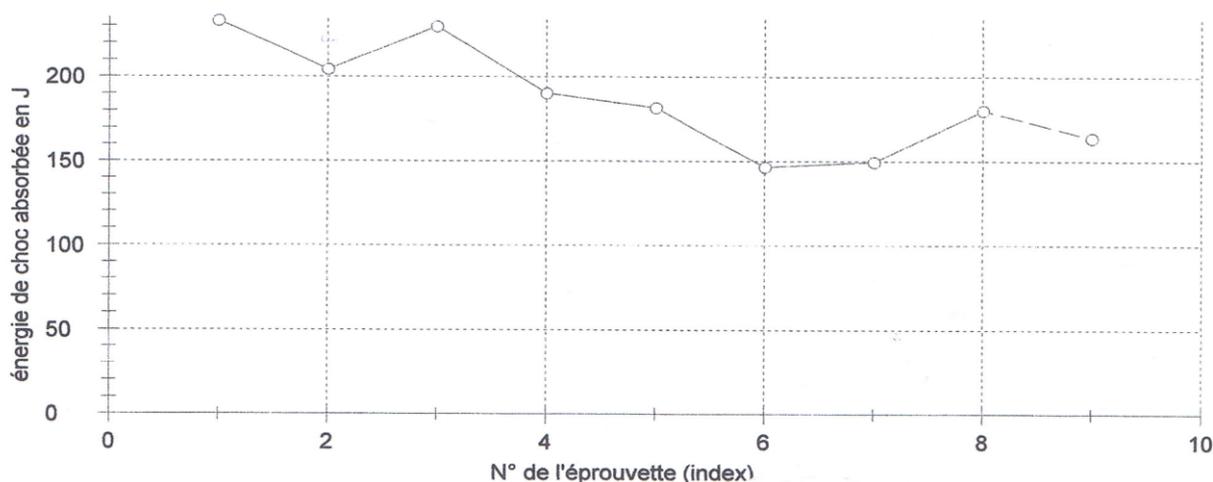


Figure 28: courbe d'énergie absorbée en fonction d'éprouvette

Du tableau, on remarque que tous les valeurs sont dans la norme API 5L ; donc les $K_v \geq 25$ J/cm²

Du graphe, on observe que l' énergie de choc absorbé est légèrement plus grande dans le métal de base (M1, M2, M3) et cordon de soudure (S1, S2, S3) que dans la zone affectée thermiquement ZAT (Z1, Z2, Z3) à cause de l'effet de chaleur lors de soudage.

IV.2.3.2.4. Essai de dureté

IV.2.3.2.4.A. Définition

La dureté d'un matériau est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps plus dur. Les essais de dureté sont particulièrement utilisés pour caractériser les matériaux métalliques, car ce sont des essais rapides à effectuer. Ils permettent ainsi de réaliser un contrôle qualité du matériau en ayant une première approche des caractéristiques mécaniques statistiques (résistance, rigidité,...) sans être obligé de réaliser un essai de traction, long et coûteux.

Il existe un grand nombre d'essais possibles, mais on relèvera surtout Brinell, Rockwell, Vickers, très complémentaires.

Dans ALFAPIPE Annaba, on utilise la dureté Vickers HV [15].

IV.2.3.2.4.B. Essai de la dureté Vickers HV

L'essai consiste à appliquer dans le matériau un pénétrateur diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet 136°, sous l'action d'une charge F maintenue pendant 15 secondes, et à mesurer la diagonale d d'une empreinte après enlèvement de la charge. La dureté Vickers est proportionnelle au rapport F/S. elle s'exprime par un nombre sans unité, HV, suivi de la valeur de la charge, par exemple : 250 HV 10

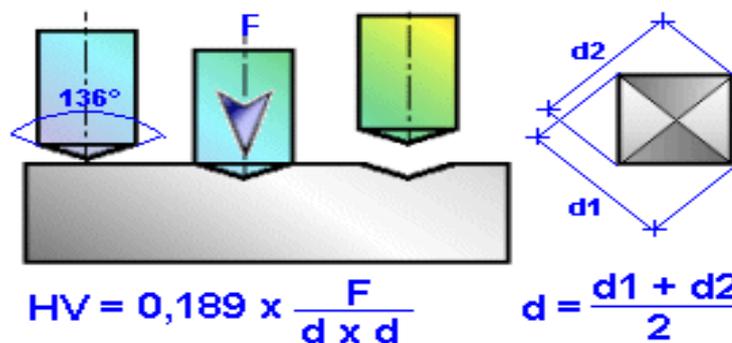


Figure IV.29 : schéma d'essai de dureté Vickers

F : force appliquée (N)

d : valeur moyenne des diagonales de l'empreinte (mm)

g : accélération terrestre (9,80665 m.s-1)

L'intérêt de choisir une pyramide à base carrée comme pénétrateur est que contrairement à l'essai Brinell ou Rockwell, la dureté Vickers est quasiment indépendante de la charge appliquée. Cela permet d'établir une gamme de valeurs très large, allant des plastiques jusqu'aux aciers cémentés.

Pour pouvoir mesurer d, il faut un système optique, il s'agit donc d'une manipulation relativement longue.

L'essai Vickers convient pour les matériaux homogènes de toute dureté, mais est particulièrement utilisé pour les matériaux les plus durs en couche très mince, car la profondeur de l'empreinte est encore plus petite que pour l'essai Rockwell : aciers cémentés, aciers nitrurés...

Il est important d'obtenir, lors de l'essai, d1, et d2 de même ordre de grandeur [16].

IV.2.3.2.4.C. Essai de macro dureté Vickers HV10 en ALFAPIPE

La pratique de macro dureté nécessite la préparation des éprouvettes par des polissages par meulage à l'eau à l'aide de papiers abrasifs. Après, on mesure la dureté dans les trois zones :

-Métal de base MB (1, 2, 3, 14, 15, 16).

-Zone affectée thermiquement ZAT (4, 5, 6, 11, 12, 13).

-Cordon de soudure MS (7, 8, 9, 10).

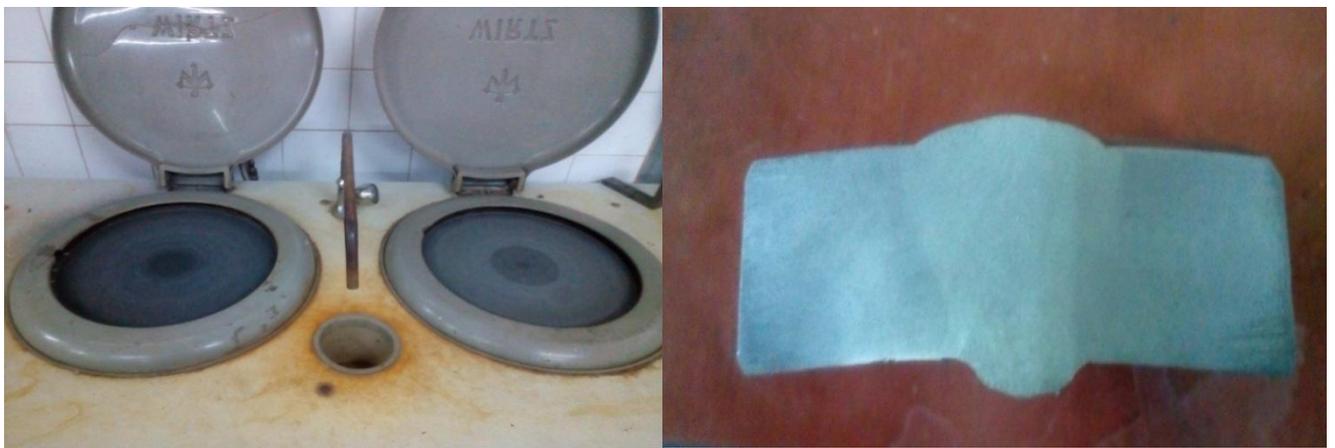
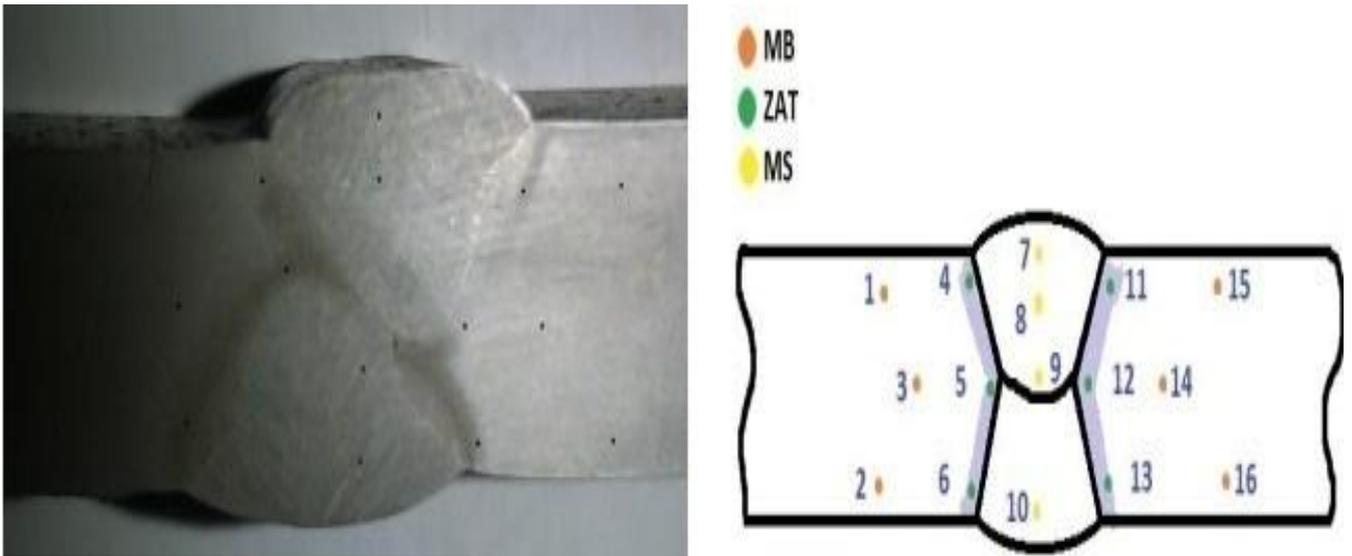


Figure IV.30 : Préparation des échantillons par polissage à l'aide d'un papier abrasif



Figures IV.31: Mesure de dureté dans les trois zones par duromètre HV10 ZWICK

Nous avons réalisées des essais de dureté sur la machine (ZWICK) HV10, étalonnée et certifiée, au laboratoire ALFAPIPE, sur des éprouvettes mentionnés au début. Les résultats sont obtenus à l'aide de la machine qu'est assistée par ordinateur, qui nous a permet de tracer la courbe de la dureté.

IV.2.3.2.4.D. Exigences des valeurs de la dureté Vickers HV selon API 5L en ALFAPIPE

Dureté	Points	Maximale
Métal de base MB	6 points	250 HV
ZAT	6 points	250 HV
Cordon de soudure ZF	4 points	250 HV

Tableau IV.21 : Exigences des valeurs de la dureté Vickers HV

IV.2.3.2.4.F. Résultats de macro dureté HV10

Teste standard: HV 10.

Nuance: X70.

Test load: 98, 07 N.

Nombre	d_h mm	d_v mm	D mm	HV10
1	0,3	0,3	0,3	228
2	0,3	0,2	0,3	227
3	0,3	0,3	0,3	222
4	0,3	0,3	0,3	220
5	0,3	0,3	0,3	217
6	0,3	0,3	0,3	226
7	0,3	0,2	0,3	222
8	0,3	0,2	0,3	223
9	0,3	0,2	0,3	227
10	0,3	0,2	0,3	229
11	0,3	0,3	0,3	223
12	0,3	0,3	0,3	219
13	0,3	0,3	0,3	232
14	0,3	0,2	0,3	227
15	0,3	0,3	0,3	220
16	0,3	0,2	0,3	225

Tableau IV.22: distribution des valeurs de dureté dans les différents points

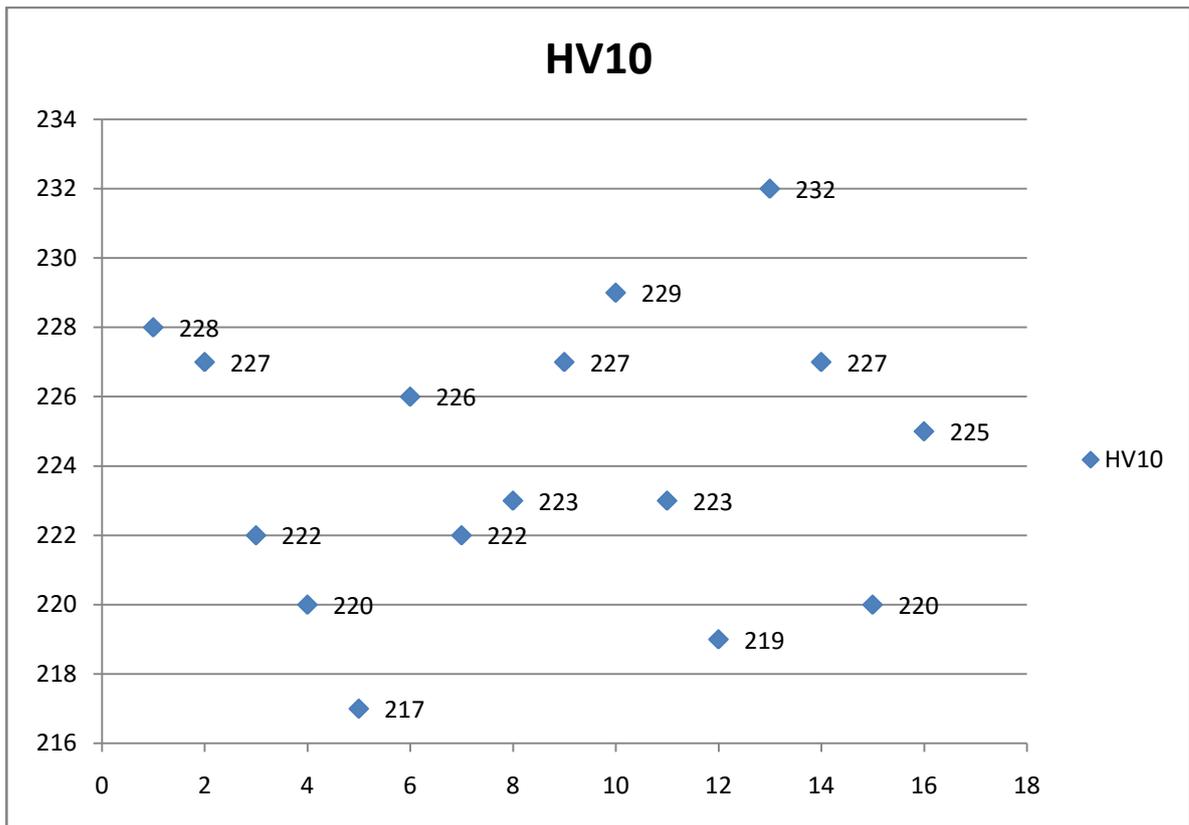


Figure IV.32 : nuage des points de dureté HV10

On observe que tous les valeurs de dureté dans différents zones du tube (MB, ZAT, ZF) sont dans la norme AP I5L (inférieure à 250 HV).

Nous avons enregistré les plus grandes valeurs dans la zone affectée thermiquement ZAT ; surtout au point 13 (HV10 = 232 HV) ; dû aux contraintes thermiques localisés résultant de grossissement des grains suivie par une refoirdissement, qui peuvent influencer sur les propriétés mécanique de cette zone (risque des fissures).

IV.2.3.3. Observation métallographique

La microstructure des aciers a été étudiée à l'aide des microscopies optique et électronique à balayage. Les surfaces observées sont polies jusqu'à 1 μm , nettoyées à l'acétone et séchées. La présence d'inclusions, non métalliques, peut être observée directement sur la surface polie.

Pour visualiser les différentes phases de la microstructure, une attaque chimique ou électrochimique est effectuée. Les aciers au carbone ont été attaqués par le nital (4% solution de HNO_3 dans l'éthanol) pendant quelques secondes. Après cette attaque, la ferrite apparaît au microscope optique comme une phase blanche, la perlite est plus foncée.

Au microscope électronique à balayage (MEB), les grains de ferrite sont foncés et la perlite est claire. Les données disponibles sur l'acier X70 dans les publications récentes montrent qu'il existe un large spectre d'aciers répondant aux critères de composition prévus pour cette désignation. Il convient donc d'identifier plus en détail les paramètres caractérisant l'acier dont nous avons obtenus les échantillons. Une section dans le plan perpendiculaire à l'axe du tube, nous permet d'observer la microstructure qui se compose essentiellement de grains de ferrite polygonale (blanc) et de perlite (en foncé) organisés en bandes. Ce type de microstructure est engendrée par la ségrégation des éléments Mn et P lors du laminage, elle très courante pour les aciers X70 [17].

Dans le tableau ci-dessous, les micrographies des trois zones (MB, ZAT, ZF) du cordon de soudure ; que nous avons obtenu à l'aide de microscope optique Nikon et microscope électronique à balayage (MEB) QUANTA 250 d'ENSMM Annaba :



Figure IV.33 : microscope optique type Nikon

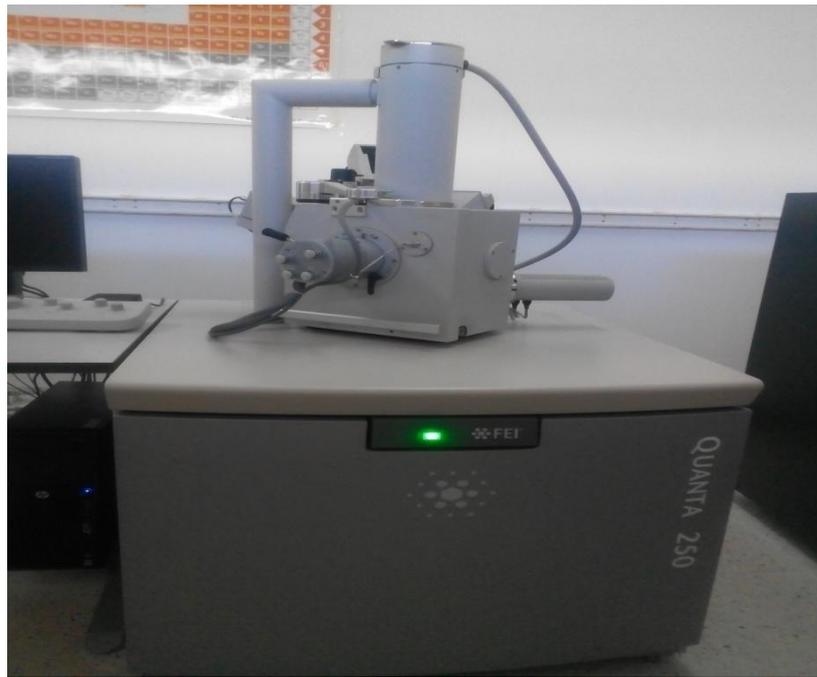


Figure IV.34 : microscope électronique à balayage (MEB) type QUANTA 250

	<p>Microscope optique Grossissement : x1000 Echelle : 10 um</p>	<p>Microscope électronique à balayage Grossissement : x6000 Echelle : 10 um</p>
<p>MB</p>		

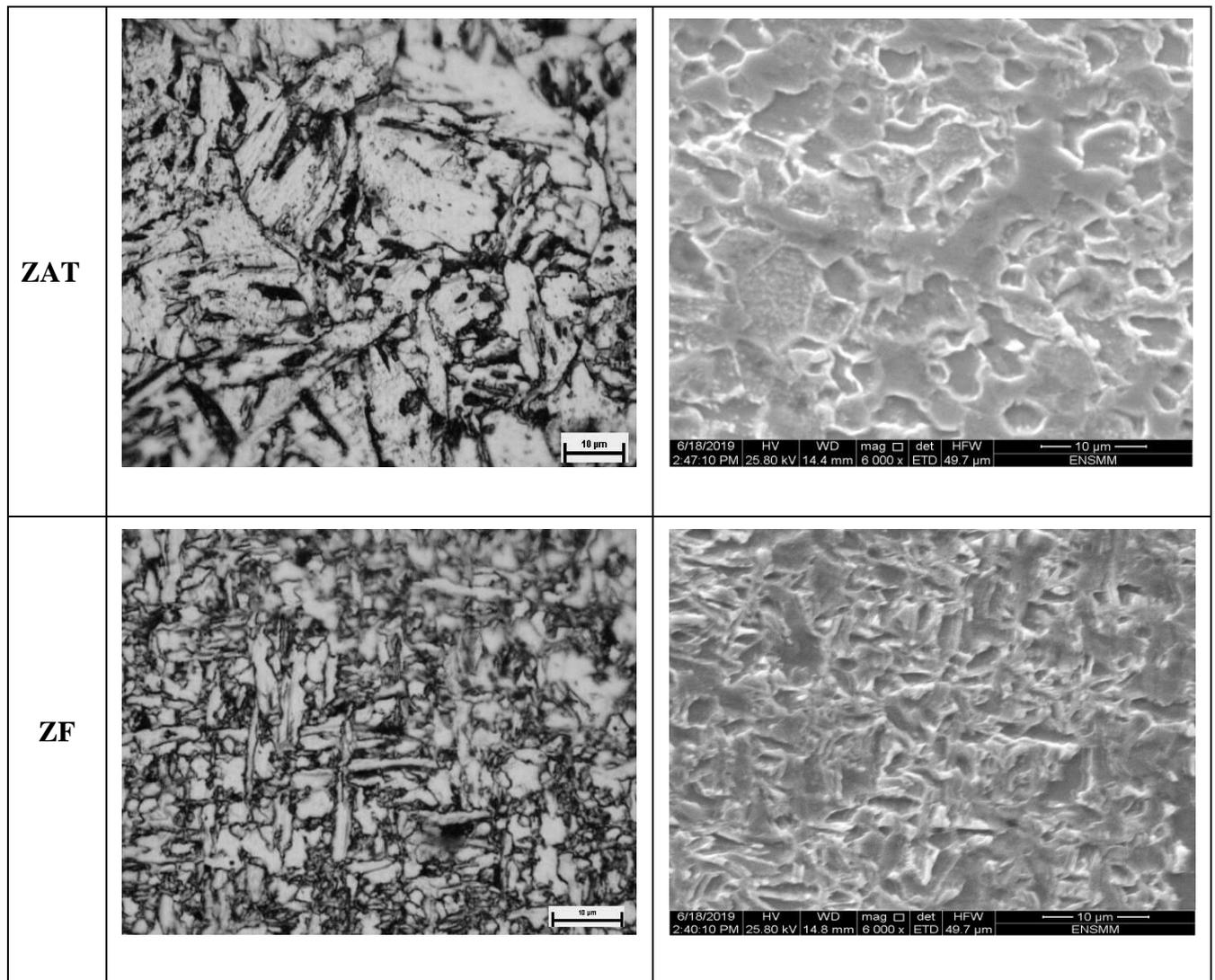


Tableau IV.23 : microstructure des trois zones par microscope optique Nikon et MEB

Le métal de base MB

La microstructure est constituée de bainite à faible teneur en carbone $< 0.12\%$, connue aussi sous le nom de "ferrite aciculaire". Cette microstructure est obtenue par un refroidissement accéléré après un laminage à chaud de l'austénite non recristallisée. Le résultat de ce traitement est une matrice de ferrite aciculaire avec des traces de carbures ou (carbonitrides) et des îlots de martensite. Cette combinaison offre d'excellentes propriétés de résistance et de dureté.

Les recherches faites sur cet acier prouvent que la fraction volumique de la ferrite aciculaire augmente avec l'augmentation de la quantité de déformation à chaud dans la région non recristallisée d'austénite parce que la ferrite aciculaire se forme au voisinage des

sites favorables de nucléation tels que les dislocations dans les grains d'austénite. Cette déformation est insuffisante pour donner une microstructure entière de ferrite aciculaire ; Par conséquent une addition des éléments affinants tel que le Nb s'ajoutant à la trempabilité doivent être prescrites car il s'est avérée, qu'une petite augmentation en niobium de 0.045 à 0.075 % donne une microstructure plus homogène avec la meilleure résilience

Enfin, cette microstructure est nécessaire pour l'acier API 5L de catégorie X70 qui est satisfaisante et garantir les propriétés mécaniques demandés

La zone affectée thermiquement ZAT

Dans la zone à gros grains la ZAT, il n'est pas possible d'obtenir la même microstructure optimale comme celle obtenu sur le métal de base parce que les températures sont beaucoup plus hautes dans cette région par l'effet des cycles thermiques de soudage. Lors du chauffage à haute température (> 900 °C), les précipités de Nb(C, N) qui affinent les grains d'austénite se dissolvent et cette dissolution favorise le grossissement des grains d'austénite.

La zone fondue ZF

La composition chimique du métal fondu est différent de celle du métal de base, donc une microstructure différente. Cette composition résulte du mélange du métal déposé par le produit de soudage avec le métal de base. La microstructure de chaque point du métal fondu (MF) dépend de la vitesse de refroidissement et la température maximale atteinte. Le métal fondu avec deux passes intérieur et extérieur est habituellement considéré comme une seule région où la microstructure se développe pendant que la soudure se refroidit de la phase liquide à la température ambiante; on l'appelle zone brute de solidification, cette zone présente une structure mixte de ferrite aciculaire, bainite granulaire et de faible pourcentage en martensite et austénite résiduelle.

L'élément qui favorise la formation de la ferrite aciculaire est le molybdène. On voit un manque de ferrite aciculaire à cause d'absence des inclusions et des éléments d'alliages dans le métal fondu indispensables pour sa formation, et il apparaît à sa place la bainite granulaire. Les inclusions jouent le rôle de germes pré existants pour la formation de la ferrite aciculaire; tandis que, l'addition contrôlée d'éléments de micro alliage et l'augmentation de la vitesse de refroidissement ne peuvent avoir d'effet sur la vitesse de germination de la ferrite aciculaire mais seulement sur sa vitesse de croissance .

Conclusion générale

Cette étude a permis de développer une partie du travail important sur le soudage et le contrôle qualité lors de la production de tubes d'acier dans l'entreprise ALFAPIPE. Le stage et la mémoire réalisés permettent de donner les conclusions suivantes :

Dans la partie de soudage, on peut dire que :

L'optimisation des paramètres de soudage des tubes en acier par induction à haute fréquence, a pour objectif, de faire un réglage et une combinaison entre la fréquence du soudage, l'angle entre les bords du tube et la vitesse du soudage, dans le but d'atteindre le chauffage nécessaire pour l'opération du soudage. On peut conclure que la variation des angles et des fréquences pour deux différentes vitesses.

Donc, on peut réussir par optimisation les paramètres de soudage :

- l'angle
- la température de fusion du métal (100 %) dans la zone de soudage,
- la fréquence et la vitesse de soudage.

Ces trois paramètres s'ils fonctionnent ensemble, nous estimons que la soudure peut être améliorée en évitant la surchauffe des bords du tube.

Dans la deuxième partie de caractérisation, on peut conclure que :

L'analyse chimique sur le métal de base d'acier X70 utilisé permet de confirmer que la composition chimique est sur les normes et assure les exigences d'API.

Dans l'essai de traction, la courbe de contrainte déformation et résultats permettent de conclure que cet acier a meilleure résistance, ductilité et grande déformation plastique. Aussi, les valeurs d'allongement A%, la résistance à traction R_m et la limite d'élasticité $E_{0.5}$ mesurés sur les 25 tubes sont dans la norme API 5L et satisfont les exigences du client.

L'essai de résilience permet de confirmer que l'acier X70 utilisé pour la fabrication des tubes soudés en spirale résistent bien aux chocs et aux basses températures, donc ils ont de bon comportement pour la canalisation enterrée.

Dans l'essai de macro dureté, on observe une convergence des valeurs de HV10 entre le métal de base et cordon de soudure grâce à l'approche de leurs compositions chimiques.

La microstructure d'acier X70 utilisé pour la fabrication des tubes HLE se compose essentiellement de grains de ferrite polygonale (blanc) et de perlite (foncé) organisés en bandes. Ce type de la microstructure est engendrée par la ségrégation des éléments Mn et P lors du laminage, conditionne la dureté très élevée pour les aciers X70.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Documentaire présentation ALFAPIPE Annaba.
- [2] PDF Acier de construction présentation, ds.Arcelormittal.com.
- [3] Documentaire HLE ALFAPIPE Annaba.
- [4] Bouchellilga Hocine, identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 d'ALFAPIPE,2016.
- [5] Nouadria Fatima, étude les effets de la réparation de la soudure sur les propriétés mécaniques des pipelines, 2016.
- [6] Techniques de l'ingénieur, soudage
- [7] Défauts lors du soudage TIG, MIG/MAG et à l'arc submergé. Ir. R. Vennekens, IWE, CEWE, FWeldI, Ing. Tom Vandewijngaert, IWE Institut Belge de la Soudure, Service Guidance Technologique (Service subventionné par l'IWT-Vlaanderen et la Région Wallonne) (Traduction: M.C. Ritzen – I.B.S.)
- [8] AWS Welding Handbook.
- [9] MG UP-Handbuch, Handbuch für das Unterpulver-Schweissen
- [10] EN ISO 1011, partie 2.
- [11] www.critt-mdts.com critt-mdts@critt-mdts.com
- [12] Essai de traction, wikipédia.org.
- [13] Essai de pliage, www.bil-ibs.be.
- [14] Essai de résilience- essais mécaniques, www.cours-et-exercices.com.
- [15] Essai de dureté, www.struers.com
- [16] Essai de dureté Vickers, www.lyc-de-gaulle-pulverisheim.as-strasbourg.fr.
- [17] Qualification d'un Acier API 5L X70 : Etude Expérimentale et Validation Numérique
1O. Bouledroua, 1M. Ouled Mbereick, 2Z. Azari, 1,2(*)M. Hadj Meliani
1 LPTPM, FSSI, Hassiba BenBouali University of Chlef, Esalem City, 02000, Chlef.
2 LaBPS-ENIM, île de saulcy 57045, Université Paul Verlaine de Metz, France.