



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Echahid Echikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Spécialité : Génie des matériaux

Intitulé

Etude des propriétés des tubes soudés en spirale utilisé pour la fabrication des pipelines

Présenté par :

M^r BOUGABRINE Abdallah

Devant le jury :

Président :

DIHA Abdallah

MCA

Encadreur :

BOUNOUARA Abdelouahab

MAB

Examineur :

LAOUADI Bouzid

MCB

Promotion : 2023/2024

Remerciement

**Je remercie tout d'abord (Allah) Qui m'a donné la force pour réaliser ce
modeste travail**

Je remercie mon encadreur MR. Bounouara

Je remercie tous les enseignants du département de génie mécanique

Je remercie mon famille et mes amis

Résumé

Le transport des hydrocarbures se fait dans les pipelines pour des grandes distances entre les villes et maintenant entre les continents. Au paravent le transport a été dans les camions citernes et dans les bateaux. Ces derniers provoquent un grand risque au cours de son transport et aussi le risque des accidents mortels suivi en grande partie de la pollution de l'environnement. Le but de notre travail consiste à suivre l'évolution mécanique, chimique et métallographique après la fabrication de pipes de nuance X70 et qui destiné au transport d'hydrocarbure ou les eaux. La fabrication de pipes est un tube soudé en spirale par enroulement d'une tôle de génératrice hélicoïdale, le tube est assemblé par une soudure de l'intérieur et de l'extérieur de la paroi. Cette évolution va concerner le matériau de base MB et le matériau avec un joint soudé pour mieux évaluer ce comportement. La première partie de fabrication du tube consiste à la normalisation, trouver la composition chimique du matériau et les caractéristique mécanique et le contrôle de qualité. Pour cela, nous avons réalisé des tests chimiques et des essais de traction, de dureté et des essais expérimentaux de résiliences. Ces essais sont réalisés pour ce même matériau sur des éprouvettes du matériau de base et sur des éprouvettes avec un joint de soudure. Les essais de dureté permettent d'analyse la réponse mécanique de zones de dimensions extrêmes réduites, comme un joint soudé, un traitement de surface. Pour le cas de notre tube, nous avons analysé la dureté dans la zone de la soudure, le prélèvement à été partagé en trois partie extérieur et intérieur du tube plus influence au milieu de la paroi. Dans le matériau de base, nous obtenons des résultats confondus entre la paroi extérieure et intérieure. Dans la zone affectée thermiquement il existe une différence de la dureté de l'ordre de 10% entre les parois et dans la zone de soudure est de 5%. D'autre part, d'après les normes API 5L. On ne doit pas déposés 50% de dureté entre les parois et le matériau de base et le matériau avec un joint de soudure. Les expériences que nous avons effectuée sur la machine d'essais de Charpy à différentes températures de -20°C jusqu'à 20°C, afin de caractériser la capacité d'absorber l'énergie au choc pour briser une éprouvette entaillée en V. Tout en respectant la procédure de contrôle et la norme API

Mots clés : Acier X70, Traction, Dureté, Norme API 5L.

ملخص

يتم نقل الهيدروكربونات في خطوط الأنابيب لمسافات طويلة بين المدن والآن بين القارات. في السابق ، كان النقل في الناقلات والقوارب. هذا الأخير يسبب خطرا كبيرا أثناء نقله وكذلك خطر الحوادث المميتة تليها إلى حد كبير التلوث البيئي. الهدف من عملنا هو متابعة التطور الميكانيكي والكيميائي والمعدني بعد تصنيع الأنابيب من الدرجة **X70** والتي تهدف إلى نقل الهيدروكربونات أو المياه. غليون، التصنيع عبارة عن أنبوب ملحوم حلزوني عن طريق لف لوح مولد حلزوني ، ويتم ربط الأنبوب عن طريق لحام الجدار من الداخل والخارج. سيتعلق هذا التطور بالمادة الأساسية **MB** والمواد ذات المفصل الملحوم لتقييم هذا السلوك بشكل أفضل. يتكون الجزء الأول من تصنيع الأنبوب من التوحيد القياسي ، وإيجاد التركيب الكيميائي للمادة و الخصائص الميكانيكية ومراقبة الجودة. للقيام بذلك ، أجرينا اختبارات كيميائية واختبارات الشد والصلابة واختبارات المتانة التجريبية. يتم إجراء هذه الاختبارات لنفس المادة على عينات من المادة الأساسية وعلى عينات مع لحام. تسمح اختبارات الصلابة بتحليل الاستجابة الميكانيكية للمناطق ذات الأبعاد القصوى المنخفضة ، مثل المفصل الملحوم ، والمعالجة السطحية. في حالة الأنبوب الخاص بنا ، قمنا بتحليل الصلابة في منطقة اللحام ، وتم تقسيم العينة إلى ثلاثة أجزاء ، خارجية وداخلية للأنبوب ، بالإضافة إلى التأثير في الوسط داخل. في المنطقة المتأثرة بالحرارة ، هناك اختلاف في صلابة ترتيب 10٪ بين الجدران وفي منطقة اللحام 5٪. من ناحية أخرى ، وفقا لمعايير **API 5L**. لا ينبغي ترسيب صلابة 50٪ بين الجدران والمواد الأساسية والمواد ذات وصلة اللحام. التجارب التي أجريناها على آلة اختبار شاربي في درجات حرارة مختلفة من -20 درجة مئوية إلى 20 درجة مئوية ، من أجل توصيف القدرة على امتصاص الطاقة عند التأثير لكسر عينة مسننة على شكل حرف **V**. مع الامتثال لإجراءات التحكم ومعياري **API**

الكلمات الدالة: X70 الصلب ، الشد ، الصلابة ، معيار API 5L.

Abstract

Hydrocarbons are transported in pipelines for long distances between cities and now between continents. Previously, transport was in tankers and boats. The latter cause a great risk during its transport and also the risk of fatal accidents followed largely by environmental pollution. The aim of our work is to follow the mechanical, chemical and metallographic evolution after the manufacture of pipes of grade X70 and which are intended for the transport of hydrocarbons or water. Pipe manufacturing is a spiral welded pipe by winding a helical generator sheet, the tube is joined by welding the inside and outside of the wall. This evolution will concern the base material MB and the material with a welded joint to better assess this behavior. The first part of tube manufacturing consists of standardization, finding the chemical composition of the material and the mechanical characteristics and quality control. To do this, we carried out chemical tests and tensile and hardness tests and experimental toughness tests. These tests are carried out for the same material on specimens of the base material and on specimens with a solder. Hardness tests allow the analysis of the mechanical response of areas of reduced extreme dimensions, such as a welded joint, a surface treatment. In the case of our tube, we analyzed the hardness in the weld area, the sample was divided into three parts, outer and inner of the tube, plus influence in the middle of the wall. In the base material, we get results that are confused between the wall exterior and interior. In the heat-affected zone there is a difference in hardness of the order of 10% between the walls and in the welding zone is 5%. On the other hand, according to API 5L standards. 50% hardness should not be deposited between the walls and the base material and the material with a weld joint. The experiments we carried out on the Charpy testing machine at different temperatures from -20°C to 20°C , in order to characterize the ability to absorb the energy on impact to break a V-notched specimen. While complying with the control procedure and the API standard

Keywords: X70 steel, tensile, hardness, API 5L standard.

Sommaire

Remerciement	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Introduction Générale	

Chapitre I : Étude bibliographiques

I. Introduction	3
I.1 Aperçu sur les aciers a haute limite d'élasticité :	3
I.2 Les différentes classes des aciers HLE :	4
I.2.1. Aciers résistants à la corrosion	4
I.2.2. Aciers micro-alliés ferrito-perlitique	5
I.2.3. Aciers laminés à structure perlitique :	6
I.2.4. Aciers à ferrite aciculaire (bainite à bas carbone) :	6
I.2.5. Aciers à double phase (dual-phase) :	7
I.2.6. Aciers à forme d'inclusion contrôlés :	7
I.3 Structures et propriétés des aciers HLE :	7
I.3.1. Dureté	7
I.3.2 Ductilité :	8
I.3.3 Ténacité :	8
I.4 INFLUENCE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE :	9
I.4.1 Influence des éléments de substitution :	9
I.4.2 Influence des éléments formants des précipités :	9
I.4.3 Influence de la perlite :	10
I.5 Mécanismes de durcissement des aciers HLE :	11
I.5.1 Durcissement par affinement des grains :	11
I.5.2 Durcissement par dispersion :	12
I.5.3 Durcissement par écrouissage :	13

I.5.4 Durcissement par traitements thermiques :.....	15
I.6 Procèdes de soudage :	16
I.6.1 Principe de soudage à l'arc par électrode enrobé :	17
I.6.2 Principaux types d'enrobages :	18
I.6.3 Principe de soudage électrique à l'arc sous flux solide (SAW):	18
I.6.4 Types de flux en poudre utilisés :	19
I.6.5 les facteurs de soudabilités :	20
I.7 Procèdes de fabrication des pipelines :	21
I.7.1 Les tubes soudés sous forme spirale :	21
I.7.2 Les tubes soudés longitudinalement :	23

— Chapitre II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale —

II.1. Introduction	27
II.2. Historique de l'unité Alfa pipe.....	27
II.3. Cycle de fabrication du tube	33
II.4. Description d'une opération de soudage à l'arc.....	38
II.4.1. Généralité	38
II.4.2. Processus de soudage sur la machine	39
II.4.3. Paramètres de soudage exigé pour souder un tube 48''	39
II.4.4. Modes opératoires de soudage	41
II.4.5. Soudage à l'arc sous flux en poudre (SAW).....	42
II.5. Procédures de contrôle des tubes	44
II.6. Contrôles Non destructifs et destructifs.....	45
II.6.1. Contrôle non destructifs (CND).....	45
II .6.2. Contrôle destructifs (CD)	52
Conclusion.....	54

————— Chapitre III : Les cause de la rupture des ————— tubes revêtus et non revêtus

III. Introduction.....	56
------------------------	----

III.1.Facteurs métallurgiques.....	56
III.1.1.Propriétés des tubes	56
III.1.2.Composition chimique.....	57
III.1.3.Propriétés mécanique	57
III.1.4.Traitements thermiques.....	57
III.1.5. Des aciers HLE	58
III.1.6.Influence de la composition chimique	58
III.1.7.Influence de la perlite.....	58
III.2. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations.....	59
III.2.1.Les fissures	61
III.2.2.Les éraflures	62
III.2.3.Les Enfoncements.....	63
III.2.3.1.Les défauts combinés (enfoncements + éraflures)	63
III.3.Corrosion des aciers	64
III.3.1.Types de corrosion	65
III.3.2.Corrosion électrochimique	65
III.3.3.Corrosion par piqûres	65
III.3.4.Corrosion par aération différentielle	66
III.3.5.Corrosion galvanique	66
III.3.6. Corrosion sélective	66
III.3.7. Corrosion biologique.....	66
III.4. Protection anticorrosion par l'application de revêtements.....	68
III.4.1. Notions de protection cathodique.....	68
III.4.2. Protection par des revêtements organiques	68
III.4.3. Vieillessement et dégradation.....	69

III.4.4. Influence de l'eau sur l'adhésion des revêtements	70
III.4.5. Origine des décollements.....	70
III.4.6. Influence des défauts de revêtement.....	70
III.5. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations revêtus.....	71
III.5.1. Nomenclature des défauts.....	71

Chapitre IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

IV. Résultats Expérimentaux Et Discussion.....	74
IV.1. Analyse chimiques.....	74
IV.2. Etudes métallographiques.....	75
IV.2.1. Macrographies.....	75
IV.2.1.1. Observations sur les macrographies	76
IV.2.2. Micrographies.....	77
IV.2.3. Evolution de la structure.....	79
IV.2.4. Mesure de la taille du grain et calcul de la fraction des phases.....	80
IV.3. Analyse des caractéristiques mécaniques.....	81
IV.3.1. Essais de traction.....	82
IV.3.2. Essais de pliage.....	82
IV.3.3. Essais de résilience.....	82
IV.4. Résultats des essais de dureté.....	83

Liste des Figures

Chapitre I.

Figure I.1: Durcissement de la solution solide de la ferrite par les éléments d'alliages
Figure I.2 : Acier micro allié ferrito-perlitique.....

Figure I.3: Acier perlitique de construction laminée

Figure I.4: Acier de ferrite aciculaire

Figure I.5: L'effet de l'affinement des grains sur les propriétés des aciers

Figure I.6 : Franchissement des particules par les dislocations par le mécanisme de contournement (a) ou par le mécanisme de cisaillement (b)

Figure I.7 : Courbe de traction rationnelle

Figure I.8 : Soudage à l'électrode enrobée : principe

Figure I.9 : Soudage sous flux en poudre : principe

Figure I.10 : Principe de fabrication des tubes soudés

Figure I.11 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale

Figure I.12 : Le craquage

Figure I.13 : Formage sous forme "U"

Figure I.14 : Formage sous forme "O"

Figure I.15 : Expansion

Chapitre II.

Figure II.1 : Structure générale du complexe

Figure II.2 : L'organigramme de la direction générale d'Alfa pipe

Figure II.3 : Processus de fabrication des tubes

Figure II.4 : Processus du revêtement extérieur du tube en PE tri couches

Figure II.5 : Structure de joint soudé

Figure II.6 : Soudage à l'arc sous flux en poudre (SAW)

Figure II.7 : CND Radiographie

Figure II.8 : CND Magnétoscopie

Figure II.9 : CND Ultrason

Chapitre III.

Figure III.1. Pipelines

Figure III.2.Éclatement d'un pipeline

Figure III.2.1. Rupture d'un pipeline

Figure III.2.3. Éclatement d'un pipeline

Figure III.2.4. l'effet sur environnement

Figure III.3. Soudure de raboutage dans une canalisation

Figure III.3.1. Fissure dans des joints soudés

Figure III.4. Une éraflure

Figure III.5. Photo d'un pipeline enfoncé

Figure III.6. Photo d'une éraflure dans un enfoncement

Figure.III.7.1 : Pile galvanique de corrosion : + Cathode,- Anode

Figure III.7.2. Corrosion dans le pipe. (a) : interne (b) : externe

Figure III.7.2. Corrosion par piqure

Figure III.7.3. Déformation

Figure III.7.4. Corrosion généralisé

Figure III.7.5. L'assemblage tri-couche

Figure III.8. Schéma d'un revêtement présentant des porosités

Figure III.8.1. Schéma d'un revêtement présentant un défaut ouvert sans décollement

Figure III.8.2. : Schéma d'un revêtement présentant un défaut avec écran

Figure III.8.3. Schéma d'un revêtement présentant un défaut ouvert avec décollement

Figure III.8.4. Schéma d'une canalisation dont le revêtement a flué sous son propre poids.

Figure III.8.5. Schéma de d'un revêtement présentant deux défauts communicants

Chapitre IV.

Figure IV.1: macrographie de la soudure automatique

Figure IV.2: macrographie de la soudure avec une 1ère réparation (R1)

Figure IV.3: macrographie de la soudure avec une 2ème réparation (R2)

Figure IV.4 : macrographie de la soudure avec une 3ème réparation (R3)

Figure IV.5: microstructure du métal de base acier API X70 G=X500

Figure IV.6: microstructure de la ZAT (soudure Automatique) G=X500

Figure IV.7: microstructure de la ZF (soudure Automatique) G= X500
Figure IV.8: microstructure de la ZAT (Première réparation) G=X500
Figure IV.9: microstructure de la ZF (Première réparation) G=X500
Figure IV.10: microstructure de la ZAT(deuxième réparation) G=X500
Figure IV.11: microstructure de la ZF (deuxième réparation) G=X500
Figure IV.12: microstructure de la ZAT (troisième réparation) G=X500
Figure IV.13 microstructure de la ZF (troisième réparation) G=X500
Figure IV.14 : rupture d'éprouvette de traction
Figure IV.15: éprouvette de Pliage
Figure IV.16: éprouvette de résilience
Figure IV.17 : Profile de la dureté les différentes séries
Figure IV.18 : Histogramme de la moyenne de la dureté des éprouvettes
Figure IV.19: Histogramme de l'écart type de la dureté des éprouvettes
Figure IV.20: Histogramme de coefficient de variation

Liste Des Tableaux

Chapitre II.

Tableau I.1 : Caractéristiques mécanique des matériaux
Tableau I.2 : Paramètre de soudage d'une machine
Tableau I.3 : Essai de traction du fil
Tableau I.4 : Charpy : essai de résilience du fil
Tableau I.5 : Analyse chimique du fil
Tableau I.6 : Analyse chimique du flux
Tableau I.7 : Paramètre de contrôle visuel

Chapitre III.

Tableau III.1.1. : Composition chimique de l'acier X70.....
Tableau III.1.2 : Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API5L.....

Chapitre IV.

Tableau IV.1 : Les compositions chimiques
Tableau IV.2 : Mesure de la taille du grain et calcule de la fraction des phases.

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Les tubes soudés en acier à haute limite d'élasticité laminés à chaud trouvent leurs applications dans de nombreux domaines : gros tubes pour transport du gaz liquéfié et d'hydrocarbures, est le moyen de transport de l'eau pour l'agriculture 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 suivantes :

- Propriétés mécaniques (résistance, ductilité) ;
- Tolérances dimensionnelles (épaisseur, largeur et longueur) ;
- Absence de défauts métallurgique et de défauts de procédé de soudage.

Ces tubes en aciers faiblement allié au Nb-V-Ti ont subi opération 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 demander par le constructeur.

La qualité de l'assemblage par soudure prend ses racines à divers stades de la construction ou d'utilisation. Pour le cas des tubes, la soudure doit être faite de manière efficace. Afin d'éviter la corrosion dans la zone de la soudure.

Pour mieux comprendre le comportement de ces aciers, nous avons procéder à une étude théorique et expérimentale sur l'évolution et la résistance des pipes en aciers HLE de grade X70 API et leur tenue après le procédé de soudage. Dans le premier chapitre, nous donnerons une idée sur le cycle de fabrication des tubes en forme spirale. Dans un deuxième chapitre, nous mettrons en revue une synthèse bibliographique, sur les matériaux de base et le procédé de soudage.

En enfin le dernier, nous entamerons la partie expérimentale et étude ou nous illustrons les différentes investigations réalisées avec leurs interprétations suivie de la conclusion générale.

Chapitre I.

Etude bibliographique

Chapitre I: Etude bibliographiques

I. Introduction :

L'acier est un alliage à base de fer additionnel d'un pourcentage de carbone (de 0.008% en masse minimum). Sa teneur en carbone peut aller jusqu'à 1.2%. Le carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés mécaniques des aciers : au-dessous de 0.008 %, l'alliage est malléable et c'est pratiquement de fer pur au-delà de 2.11 %, les inclusions de carbone sont sous forme de graphite fragilisent la microstructure et on parle de fontes. L'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique de l'alliage. Pour des aciers ordinaires, ne contenant pas d'éléments d'alliage on peut distinguer : Les aciers doux, mi-doux, durs, mi-durs et extra durs (classification traditionnelle).[1]

On peut obtenir des aciers ayant des propriétés très variées grâce à l'ajout des éléments d'addition et la mise en œuvre de traitements thermiques appropriés. Parmi ses types d'acier on trouve les aciers à haute limite d'élasticité HLE qui sont utilisés dans le domaine du transport pétrolier et gazoduc. Ces aciers ont de meilleures propriétés mécaniques et une meilleure résistance à la corrosion par rapport aux aciers ordinaires [2].

I.1. Aperçu sur les aciers à haute limite d'élasticité :

Les aciers à *haute limite élastique* dits HLE ou à *haute résistance* HR (HSLA = *steels high strength low alloy*) appartiennent au groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent des éléments d'alliage pour améliorer les caractéristiques mécaniques et parfois la résistance à la corrosion [3].

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 notamment dans le cas des grues ou des remorques de véhicules lourds (augmentation de la charge utile), c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction. Les aciers à haute limite élastique sont mis en œuvre dans des secteurs aussi divers que le transport (engins de chantiers, remorques, machines agricoles etc.) et la construction (grues, glissières de sécurité, candélabres etc.) [4].

Chapitre I: Etude bibliographiques

I.2 Les différentes classes des aciers HLE :

Les aciers HLE incluent un grand nombre de nuances standards et sont conçus pour fournir des combinaisons spécifiques de propriétés telles que la résistance, la soudabilité, la formabilité, la ténacité, et la résistance à la corrosion atmosphérique.

Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, bien que leurs propriétés désirées soient accomplies par l'usage de petites additions d'alliages tels que Ti, Nb, Cr....

Les aciers HSLA sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques élevées obtenues par de petites additions d'alliages et des techniques de traitement spéciales tel que le laminage contrôlé.

Les aciers HSLA peuvent être divisés en six catégories :

I.2.1. Aciers résistants à la corrosion :

Aciers contiennent de cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement de la solution solide, et un certain affinement de grain ferrique. L'effet de durcissement de plusieurs éléments d'alliage est montré dans figure.I.1.

Le vanadium et/ou le niobium peuvent améliorer la limite d'élasticité de ces aciers ; l'addition du niobium améliore également la dureté. Une normalisation ou un laminage et un refroidissement contrôlé peuvent affiner la taille de grain (et améliorer ainsi la dureté et la limite d'élasticité). Cependant, si la normalisation ou le refroidissement accéléré sont employés pour affiner la taille de grain, l'effet du carbone et des éléments micro alliés sur la trempabilité et la possibilité d'apparition de transformations indésirables telle que la bainite supérieure et la ferrite de Widmanstätten doivent être considérées.

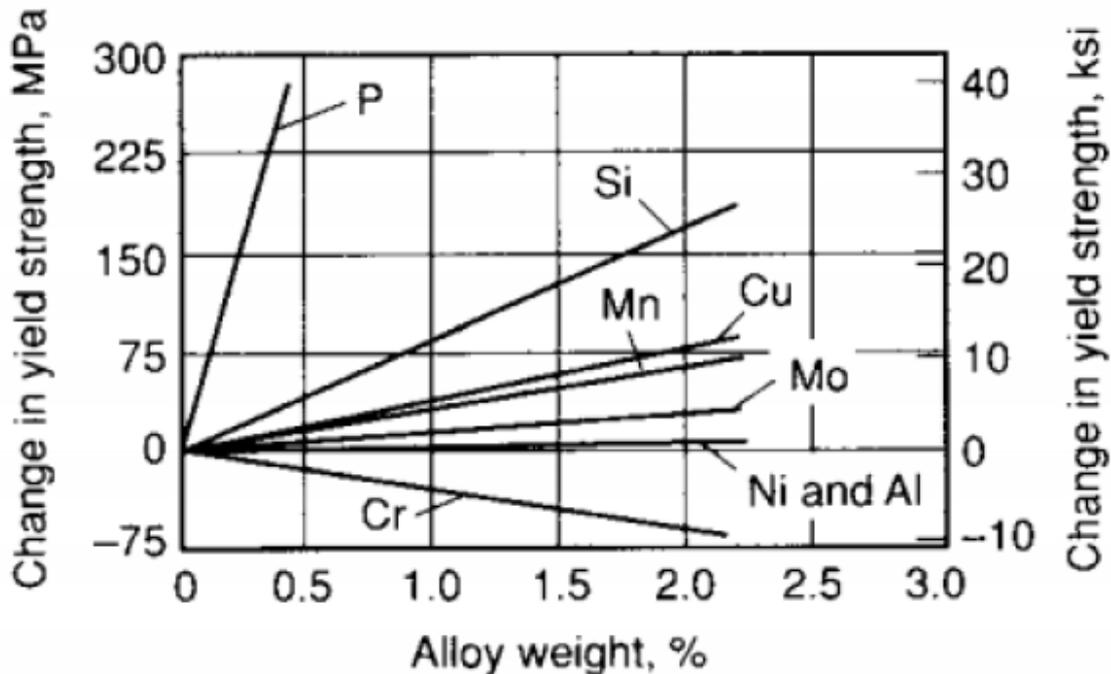


Figure 1-I : Durcissement de la solution solide de la ferrite par les éléments d'alliages

I.2.2. Aciers micro-alliés ferrito-perlitique :

Ils utilisent des additions d'éléments tels que le niobium et le vanadium pour augmenter la résistance de l'acier laminé à chaud sans augmenter la quantité du carbone et/ou du manganèse.

Des études faites sur le niobium et le vanadium ont révélé que de petites quantités de ces éléments suffisent pour durcir les aciers au carbone-manganèse.

Donc, la quantité de carbone pourrait être réduite pour améliorer la soudabilité et la ténacité représentée sur la figure I.2, les effets durcissant de niobium et de vanadium ayant compensé la décroissance de la résistance due à la réduction du carbone.

Les différents types d'aciers micro-alliés ferrito-perlitique incluent :

- Aciers micro-alliés au vanadium ;
- Aciers micro-alliés au niobium ;
- Aciers micro-alliés au niobium-molybdène ;
- Aciers micro-alliés au vanadium-niobium ;
- Aciers micro-alliés au Vanadium-azote ;
- Aciers micro-alliés au titane ;
- Aciers micro-alliés au Niobium-titane ;
- Aciers micro-alliés au Vanadium-titane.

Chapitre I: Etude bibliographiques

Ces aciers peuvent contenir d'autres éléments pour améliorer la résistance à la corrosion et le durcissement par solution solide ou augmenter la trempabilité (si on veut obtenir une microstructure autre que la microstructure ferrito-perlitique)

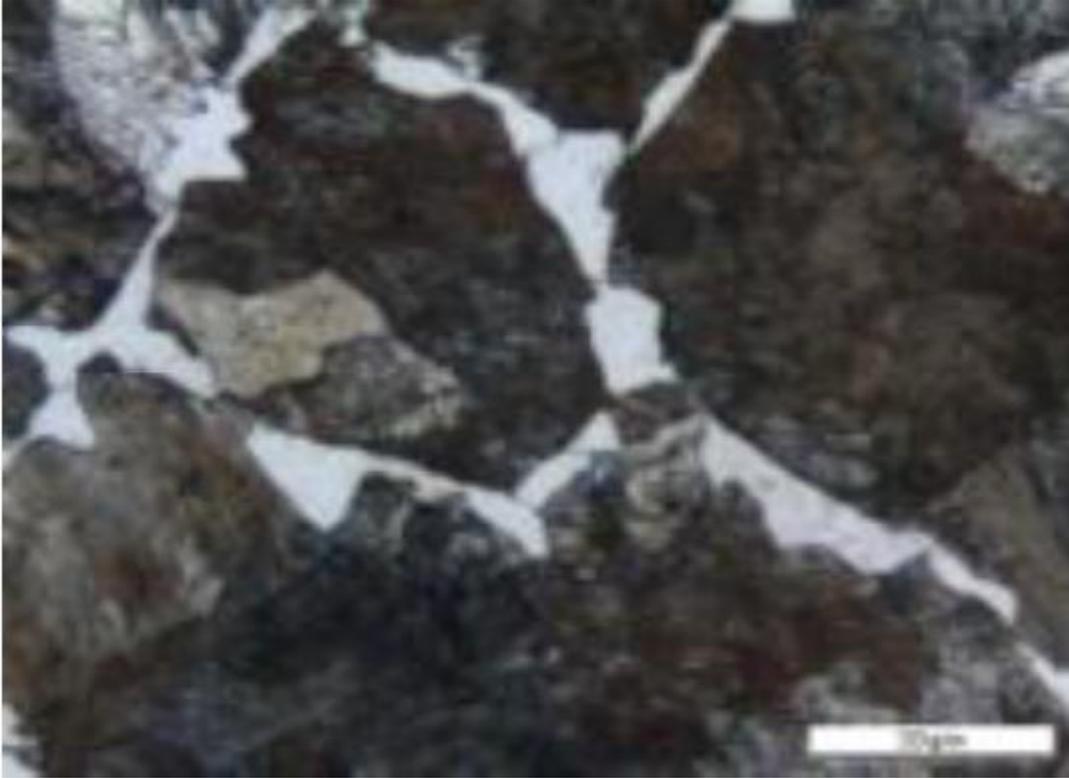


Figure 2-I: Acier micro allié ferrito-perlitique [7]

I.2.3. Aciers laminés à structure perlitique :

Ils sont un groupe spécial d'aciers dont l'augmentation des propriétés mécaniques (et dans quelques cas, la résistance à la corrosion atmosphérique) est obtenue par l'addition de quantités modérées d'un ou de plusieurs éléments autres que le carbone. Certains de ces aciers sont des aciers en Carbone-Manganèse et diffèrent des aciers ordinaires seulement en ayant un plus grand contenu de manganèse. D'autres aciers perlitiques contiennent de petites quantités d'éléments alliés pour améliorer la soudabilité, la formabilité, la ténacité et la dureté.

I.2.4. Aciers à ferrite aciculaire (bainite à bas carbone) :

Une autre approche au développement des aciers HSLA est d'obtenir une microstructure de ferrite aciculaire très fine et plus résistante, au lieu d'une microstructure de ferrite polygonale habituelle pendant la transformation des aciers à très bas carbone (moins que 0.08%C) avec une trempabilité suffisante (par additions de Molybdène et/ou de bore).

Chapitre I: Etude bibliographiques

A la différence de la structure polygonale, la structure aciculaire comme représentée dans la figure I.4 (qui est aussi appelé bainite à bas carbone) est caractérisée par une haute densité de dislocation et des grains fins très déformés.

Les aciers à ferrite aciculaire peuvent être obtenus par trempe ou, de préférence, par refroidissement à l'air avec l'addition d'éléments convenables pour la trempabilité. L'avantage principal de ce type d'acier est la combinaison exceptionnelle de hautes limites d'élasticité, haute ténacité et d'une bonne soudabilité. Les applications principales de ces aciers sont les pipelines dans les conditions de l'arctique [8,9].



Figure I.4: Acier de ferrite aciculaire [7]

I.2.5. Aciers à double phase (dual-phase) :

Ils ont une microstructure composée de 80 à 90% de ferrite polygonale et 10 à 20% d'îlots de martensite dispersées dans la matrice ferritique. Ces aciers ont une faible limite d'élasticité, donc ils forment un acier à faible résistance, mais ils peuvent aussi fournir une haute résistance pour un composant fini à cause de leur durcissement par un travail à froid [10].

I.2.6. Aciers à forme d'inclusion contrôlés :

Un développement important dans les aciers micro-alliés a été permis par le contrôle de la forme des inclusions. Les inclusions des sulfures qui sont plastiques durant le laminage à chaud et donc allongées, ont un effet nuisible sur la ductilité dans le sens travers-court (suivant l'épaisseur). L'objectif principal du contrôle de la forme des inclusions est de produire des inclusions sulfureuses avec une plasticité négligeable même pour les plus hautes températures de déformation.

Chapitre I: Etude bibliographiques

Ce contrôle est exécuté avec de petites additions d'éléments de terre rare (Pr, Ce), de Zr, de Ca ou du Ti qui changent la forme des inclusions allongées en petites globules dispersés presque sphériques. Ce changement dans la forme des inclusions augmente la résilience et améliore la formabilité.

Ces catégories ne sont pas des groupes nécessairement distincts. Par exemple, la forme d'inclusion de tous les types précités d'aciers peuvent être contrôlés. L'acier micro-allié ferrito-perlitique peut avoir aussi des alliages supplémentaires pour la résistance à la corrosion et le durcissement par solution solide [11,12].

I.3. Structures et propriétés des aciers HLE :

Les principales propriétés mécaniques qui caractérisent les aciers API sont :

I.3.1. LA DURETE :

La dureté est l'une des propriétés les plus importantes, elle dépend essentiellement de paramètres suivants :

- Pourcentage de carbone.
- Présence des éléments d'alliage.
- Des conditions d'austénitisation (mise en solution des carbures et grosseur des grains d'austénite).

La dureté nous renseigne aussi sur :

- Le comportement mécanique de l'acier.

Les éléments d'alliage contribuent au durcissement de l'acier de deux manières, soit par éléments en solution solide, les éléments étrangers en solution solide ayant des tailles différentes de celles des atomes de fer créent des distorsions élastiques du réseau de ce dernier et engendrent de ce fait des interactions avec les dislocations, ou bien par formation de précipités (généralement des carbures).

I.3.2. LA DUCTILITE:

La ductilité d'une phase durcie varie en fonction inverse de sa dureté, mais l'effet est différent suivant qu'il s'agisse de précipités ou d'affinements de structures. Pour apprécier l'effet global, il faut également tenir compte de la diminution de la teneur en carbone ou des éléments d'alliage que permet le micro alliage. Ainsi, certains modes de durcissement diminuent moins la ductilité que d'autres comme l'affinement de grain ou le mélange de phases tel que la présence de la martensite dans de la ferrite (aciers double phase), l'introduction de petits élément micro-alliés peut donner un gain par rapport à des nuances

Chapitre I: Etude bibliographiques

carbone-manganèse (à limite d'élasticité comparable) parce que la baisse de la quantité de perlite est plus favorable que la petite perte d'allongement due à l'affinement de grain combiné avec une matrice légèrement durcie. A haute température et sous l'effet de grossissement de grains, on peut avoir une forte baisse de ductilité

I.3.3. LA TENACITE :

On caractérise généralement la ténacité par la température de transition ductile fragile, ou on cherche à la diminuer pour privilégier un domaine ductile ou la ténacité est meilleure. Dans l'étude de la ténacité il faut distinguer l'effet de fragilisation par précipité et celui de changement des microstructures (on parle de taille de grains et leur nature) [13].

Pour sa part, l'augmentation de taux de perlite a un effet néfaste sur la température de transition donc sur la ténacité car les nodules de perlite constituent des sites d'amorçage possible de clivage. Les structures bainitiques et martensitiques, par l'effet de l'affinement ultérieur des grains gamma, peuvent jouer un rôle favorable pour l'amorçage de clivage et la propagation de fissures.

La précipitation permet généralement d'augmenter la température de transition.

Seuls les éléments comme le manganèse, le nickel et l'aluminium peuvent dans une certaine mesure diminuer la température de transition par des effets secondaires.

Notons que l'effet de la précipitation reste toujours dépendant de la taille des grains, important pour les grains grossiers, peu marqué pour les grains fins et presque inopérants pour les précipités ultra fins [12].

I.4. Influence de la composition chimique :

I.4.1 Influence des éléments de substitution :

I.4.1.1 Le manganèse :

En raison de ces propriétés, le manganèse se trouve, en plus au moins grande quantité, dans presque tous les aciers, il joue un rôle déterminant lors de l'élaboration de l'acier. Il participe à la désoxydation, réagit avec le soufre (donc désulfurant), évitant ainsi la fissuration à chaud, pendant la fusion de l'acier, il absorbe les gaz, détruit les oxydes se trouvant 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 d'inclusion du métal. Il intervient sous multiples formes [14] :

- Il abaisse la teneur en carbone à l'eutectoïde.

Chapitre I: Etude bibliographiques

- 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 ferrite que dans le domaine bauxitique 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.

I.4.2 Influence des éléments formants des précipités :

I.4.2.1 L'aluminium :

C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitrure d'aluminium, qui inhibe le grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement (effet durcissant) [15].

I.4.2.2 Le vanadium :

En faible proportion, cet élément augmente la dureté des aciers sans diminuer leur allongement ni leur résilience, c'est un désoxydant énergétique qui améliore la qualité de l'acier. Une teneur en vanadium de 0.5 à 0.7% suffit pour transformer les propriétés d'un acier.

La résistance à la traction et à la fatigue est sensiblement augmentée et l'acier est moins sujet aux tapures de trempe. Cet élément élève la température de l'austénite, tout en diminuant la susceptibilité à la surchauffe. Il contribue au grain fin de l'acier. Sa tendance à former des carbures (carbonitrures) oblige à tremper à très haute température, pour éviter des plages douces après traitement.

Les carbonitrures 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 [16].

I.4.2.3 Le niobium :

Ce métal résiste à la plupart des aciers, il est ajouté sous forme d'alliages ferreux appelés Ferro-niobium, plus faciles à introduire à la fusion. Il a été révélé qu'en ajoutant dans des aciers à bas taux de carbone une faible proportion (0.10%) de niobium, on élève avantageusement la limite d'élasticité, cette amélioration est due au fait que le métal présente un grain plus fin que l'acier de carbone de même nuance, et que ce résultat a été obtenu, dans des produits laminés beaucoup plus économiquement avec le niobium que tout autre méthode

Chapitre I: Etude bibliographiques

.La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Ils sont livrés sous forme de tôles, barres et peuvent être améliorés davantage par traitement thermique et ils présentent une bonne soudabilité.

Il est utilisé pour :

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

Cette précipitation a un effet durcissant mais également fragilisant. La présence des carbonitrides (carbures) du niobium non dissout freinent le grossissement du grain austénitique avant écrouissage [17].

I.4.2.4 Le titane :

Il forme des carbonitrides (carbures), il permet de fixer l'azote. Il se combine avec le soufre en donnant naissance des sulfures non déformés. L'emploi de cet élément demande des précautions car il a tendance à former gros précipités de nitrides 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 [17].

I.4.3 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 proportionnelle 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 [17].

I.5. Mécanismes de durcissement des aciers HLE :

Ils ont pour but d'augmenter les caractéristiques de résistance des aciers, et pour cela, il faut diminuer ses possibilités de déformation plastique qui dépendent de la mobilité des dislocations. Il faut donc installer sur le parcours de ces dernières des obstacles qui pourront être :

Chapitre I: Etude bibliographiques

- D'autres dislocations générées par écrouissage,
- Des joints de grain,
- Des précipités. [18].

I.5.1 Durcissement par affinement des grains :

L'affinement des grains est un effet des éléments de micro-alliés sur l'acier, sous cet effet il y'a simultanément une production et une augmentation de la force et de la ténacité, sans pour autant affecter la soudabilité et la ductilité Figure I.5.

Cette variation de la limite d'élasticité en fonction du diamètre moyen des grains obéit le plus souvent à la relation proposée par Hall et Petch :

$$\sigma_0 = \sigma_t + k_0 * d^{\frac{-1}{2}} \dots\dots\dots I.1$$

σ_0 est la limite élastique de l'acier.

σ_t est la limite élastique d'un seul Crystal de l'acier.

k la constante de Hall Patch.

d taille moyenne des grains [19,20]

L'affinement des grains peut être effectué avec 3 types de précipitations :

- a) Les petites particules qui ne se dissolvent pas et donc fixent les joints de grains de l'austénite pendant le réchauffage avant le laminage à chaud (ex : TiN).
- b) les particules qui se dissolvent durant le chauffage, mais se précipitent en austénite durant le laminage à chaud pour éviter la recristallisation et / ou la croissance des grains (ex : Nb(C, N)).
- c) Les particules qui se précipitent après le laminage, durant la transformation de l'austénite en ferrite (ex : V(C, N)) [21].

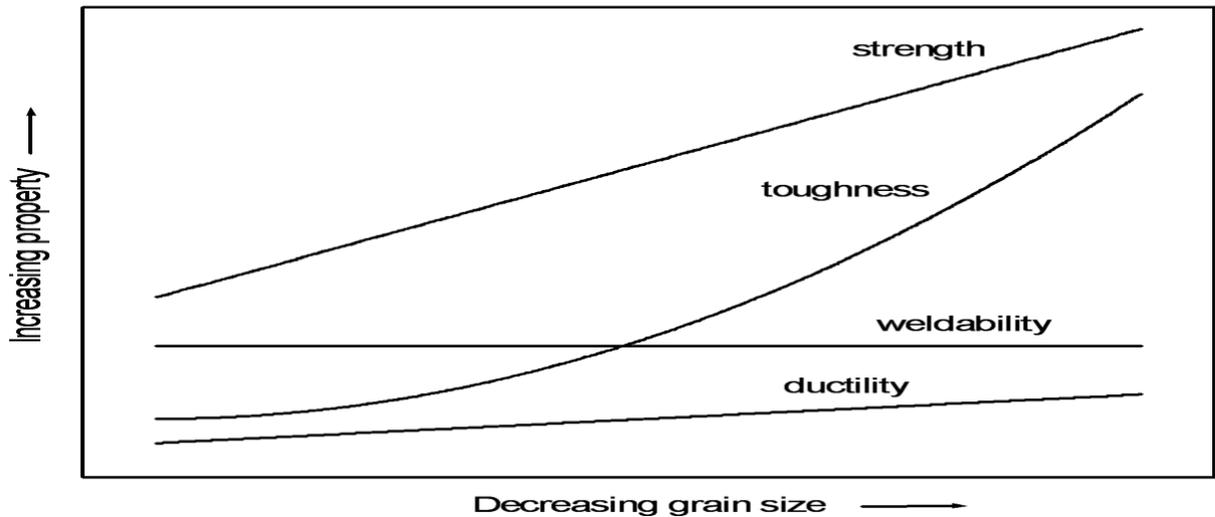


Figure I.5: L'effet de l'affinement des grains sur les propriétés des aciers [21].

I.5.2 Durcissement par dispersion :

La présence d'une fine dispersion de particules dans les grains d'un alliage métallique modifie la limite d'élasticité du métal non déformé. Il s'agit de particules de petite taille devant la taille de grain. Ces particules peuvent être des inclusions formées lors de la solidification en raison de leur très faible solubilité dans le métal solide (oxydes, sulfures) ou des précipités obtenus par un traitement thermique approprié de mise en solution à haute température suivie d'un maintien à une température plus basse à laquelle la limite de solubilité est plus faible. En général, le réseau cristallin et la nature des liaisons atomiques de la deuxième phase sont différents de ceux de la matrice. Par conséquent, il existe une discontinuité dans les plans de glissement des dislocations mobiles qui engendre une force de freinage au déplacement de celles-ci.

Lorsqu'une dislocation mobile rencontre des particules de deuxième phase dans son plan de glissement, elle est bloquée aux points d'appui sur les particules en raison de la discontinuité cristalline entre la matrice et la particule. Au fur et à mesure que la contrainte appliquée augmente, la dislocation se courbe entre ces points d'appui (**figure I.6**), la contrainte nécessaire pour courber la dislocation est inversement proportionnelle au rayon de courbure des arcs. La valeur maximale est atteinte lorsque l'arc de dislocation prend la forme d'un demi-cercle de rayon de courbure $\lambda/2$ où λ est la distance entre les particules

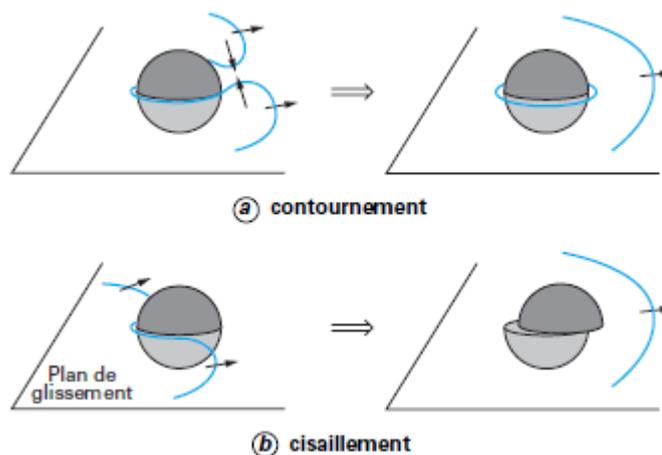


Figure I.6 : Franchissement des particules par les dislocations par le mécanisme de contournement (a) ou par le mécanisme de cisaillement (b) [22]

Au-delà de cette contrainte, la poursuite de la dilatation des arcs de dislocation conduit à une diminution du rayon de courbure de la ligne. La configuration devient instable et les arcs se rejoignent en aval des particules en laissant une petite boucle autour de chacune d'elles (figure 2a).

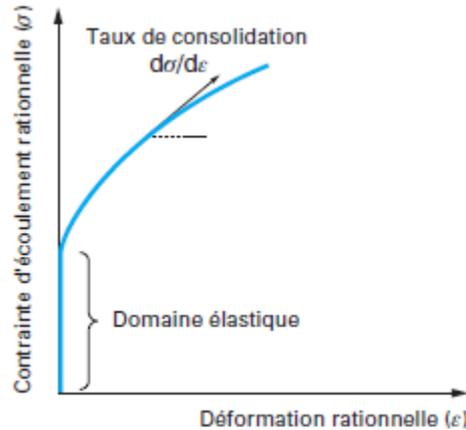
Mais, pendant le stade d'expansion de la dislocation entre les particules, la force exercée sur les particules par la dislocation augmente en même temps que la contrainte sur le plan de glissement.

Si cette force est suffisamment élevée, la dislocation pénètre les particules et les cisaille avant qu'elle ne prenne la configuration critique (figure 2b).

Le franchissement des obstacles, par contournement ou par cisaillement des particules, dépend de la cohérence entre les réseaux cristallins, de la taille des particules et de la distance entre elles [22].

I.5.3 Durcissement par écrouissage :

La manière la plus simple de durcir un métal est de profiter de l'augmentation de la contrainte d'écoulement plastique en fonction de la grandeur de la déformation plastique (**figure I.7**). Lorsque la température est inférieure à $0,3T_f$ ou T_f est la température de fusion, ce phénomène de consolidation, ou d'écrouissage, correspond une augmentation irréversible de la limite d'élasticité. Il découle de l'augmentation de la densité de dislocations au cours de la déformation.



Le taux de consolidation qui est défini par la pente $d\sigma/d\epsilon$ de cette courbe, diminue en fonction de la grandeur de la déformation

Figure I.7 : Courbe de traction rationnelle [22]

L'évolution de la configuration de dislocations en fonction du taux de déformation est connue grâce aux nombreuses observations effectuées par microscopie électronique en transmission sur des lames minces prélevées dans les métaux écrouis. Au-delà de la limite d'élasticité macroscopique, l'accumulation de dislocations sur les plans de glissement actif gêne le déplacement des dislocations mobiles de sorte qu'il faut augmenter la contrainte externe au fur et à mesure que le glissement progresse sur ces plans.

De plus, l'activation d'un glissement simple conduit à une rotation progressive des axes cristallographiques des grains par rapport aux axes de sollicitation ; ces deux effets combinés conduisent à l'activation d'autres systèmes de glissement, initialement moins favorablement orientés (*glissement multiple*). Ces plans coupent les plans de glissement primaires et l'intersection entre dislocations sur les plans sécants crée des enchevêtrements qui, peu à peu, conduisent à la formation d'une configuration cellulaire constituée de parois à très forte densité de dislocations entourant des volumes à faible densité de dislocations.

À ce stade, la densité de dislocations sature car le stockage des dislocations dans les parois est compensé par des processus d'annihilation qui résulte de la rencontre de deux dislocations de signe opposé (restauration dynamique) [22].

En admettant que le durcissement par dislocations est indépendant de la taille de grain, la contrainte d'écoulement plastique devient :

$$\tau_i = \alpha G b \sqrt{\rho}$$

Ou

τ_i : Contrainte d'écoulement plastique

Chapitre I: Etude bibliographiques

α : Constante qui dépend de la structure du cristal.

G : Module de Young.

B : La dislocation du vecteur Burgers.

ρ : Densité de dislocation [23].

Le durcissement par écrouissage augmente la dureté au dépend de la ductilité et de la ténacité de l'acier, pour cette raison cette méthode de durcissement n'est pas beaucoup utilisée [24].

I.5.4 Durcissement par traitements thermiques :

Il existe plusieurs procédés de traitements thermiques qui permettent d'aboutir à un même résultat mais, en général, l'un d'eux seulement est plus économique ou plus sûr.

Les principaux paramètres de ces procédés sont :

- Le temps de maintien.
- La température de maintien.
- L'atmosphère ou le milieu de traitement.
- Les vitesses de chauffage et /ou de refroidissement.
- La composition du matériau traité.
- La profondeur de matière traitée [25].

Le durcissement des aciers par précipitation de carbures passe par la réalisation des opérations suivantes :

- La mise en solution des carbures dans l'austénite par chauffage (austénitisation).
- Le refroidissement adapté pour transformer l'acier en martensite.
- Le réchauffage pour provoquer la précipitation des carbures dans les grains de ferrite (revenu).

Dans ces conditions, l'acquisition des caractéristiques de résistance par traitement thermique dépend de deux propriétés fondamentales de l'acier : sa capacité de durcissement et sa trempabilité.

La **capacité de durcissement**, qui détermine la gamme des performances accessibles, se caractérise par le niveau maximal de dureté que peut atteindre l'acier après avoir subi le traitement thermique optimal. Cette capacité de durcissement dépend essentiellement de la teneur en carbone de l'acier. Il s'agit d'une caractéristique intrinsèque. On peut noter qu'une opération de cémentation augmente la teneur locale en carbone, et donc localement la capacité de durcissement.

Chapitre I: Etude bibliographiques

La **trempeabilité** conditionne les possibilités pratiques d'obtention des niveaux potentiels de durcissement par précipitation sur des pièces de différentes sections. Elle peut se définir comme l'aptitude d'un acier à acquérir son durcissement optimal, et donc ses propriétés d'emploi, par traitement thermique dans des conditions industrielles. Cette trempeabilité dépend surtout des éléments d'alliage ajoutés à l'acier et de la taille des grains d'austénite ; toutes proportions gardées, plus ceux-ci sont gros, plus la trempeabilité est grande.

Un acier sera dit d'autant plus trempant qu'il répondra correctement au traitement de durcissement alors que la section des pièces réalisées est plus grande. En passant d'une nuance d'acier à une autre nuance plus trempant (c'est-à-dire plus alliée), on peut :

- Refroidir moins énergiquement une pièce de dimensions données pour engendrer la transformation martensitique à cœur,
- Obtenir par trempe dans un milieu donné une transformation martensitique à cœur de pièces de plus forte section.

Facteur de faisabilité du durcissement, la trempeabilité a une grande importance industrielle [18].

I.6. Procédés de soudage :

Différents procédés sont utilisés pour souder les matériaux métalliques. Ces procédés se distinguent par :

- Le principe du procédé : soudage par fusion, soudage par pression.
- La nature de l'énergie utilisée (soudage au gaz, soudage électrique par résistance, soudage à l'arc électrique, soudage au laser, soudage par friction).
- La nature de l'électrode : enrobée, fusible, réfractaire.
- La protection gazeuse.

Les procédés les plus utilisés, dans l'industrie, sont :

- Le soudage par fusion au gaz.
- Le soudage électrique par résistance (bout à bout, à la molette, par point, par bossage).
- Le soudage électrique à l'arc (MIG, MAG, TIG).
- Le soudage laser.
- Le soudage par pression (par friction, par ultrasons, ...) [25]

Chapitre I: Etude bibliographiques

I.6.1 Principe de soudage à l'arc par électrode enrobé :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), appelé soudage manuel à l'arc (*manual arc welding, shielded metal arc welding process*), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la figure I.8.

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

L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur la figure I.8, recouvert du laitier vitrifié dû à l'enrobage fondu et que l'on évacue ultérieurement.

La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable.

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

- La technologie des électrodes.
- L'habileté de l'opérateur.

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

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre [26].

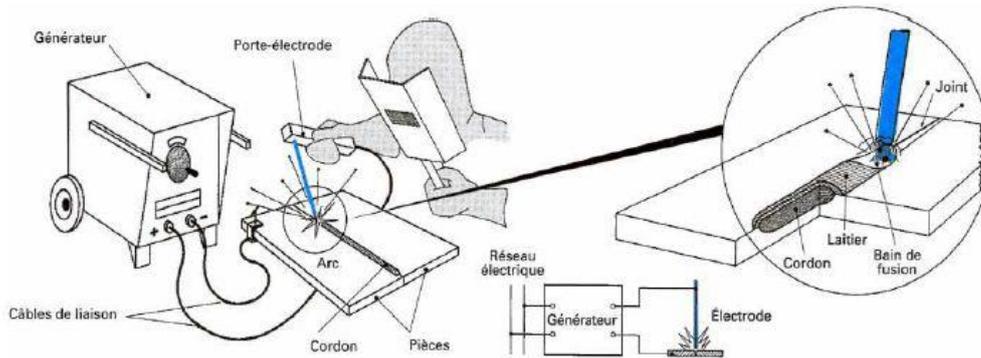


Figure I.8 : Soudage à l'électrode enrobée : principe [26]

I.6.2 Principaux types d'enrobages :

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, on ramène les différents types d'enrobage à cinq grandes classes qui, du fait de certains composants, présentent chacune des caractéristiques majeures (NF A 81-300) et dont les plus importantes sont :

- Enrobage acide (symbole *A* ou *RA*) : réservé à des aciers de bonne soudabilité
- Enrobage basique (symbole *B* ou *RB*) : courant continu, laitier facile à détacher
- Enrobage cellulosique (symbole *C* ou *RC*) : forte pénétration, arc relativement instable, soudage en position, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures
- Enrobage rutile (symbole *R* et *RR*) (le rutile est l'oxyde de titane TiO_2) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, pénétration moyenne, bonnes caractéristiques mécaniques des soudures
- Enrobage oxydant (symbole *O*) : stabilisation de l'arc en alternatif et en continu, faible pénétration, belle apparence du cordon, travaux courants.

Le symbole *S* est relatif aux enrobages spécifiques non répertoriés [26].

I.6.3 Principe de soudage électrique à l'arc sous flux solide (SAW):

Le procédé de soudage est essentiellement utilisé en installation automatique sur banc ou potence de soudage avec des installations dont le principe est représenté sur la figure I.9. Il est principalement utilisé pour le soudage à plat. La bobine de fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la tête de soudage. La tête de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie généralement positive du générateur de soudage à courant continu. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une trémie branchée par une dérivation sur la tête de soudage l'alimente par la poudre. L'arc jaillit lorsque l'opérateur actionne le bouton électrique du

Chapitre I: Etude bibliographiques

coffret de commande et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder. Le flux en poudre non fondu est récupéré à l'aide d'un aspirateur et le flux est recyclé après tamisage [27].

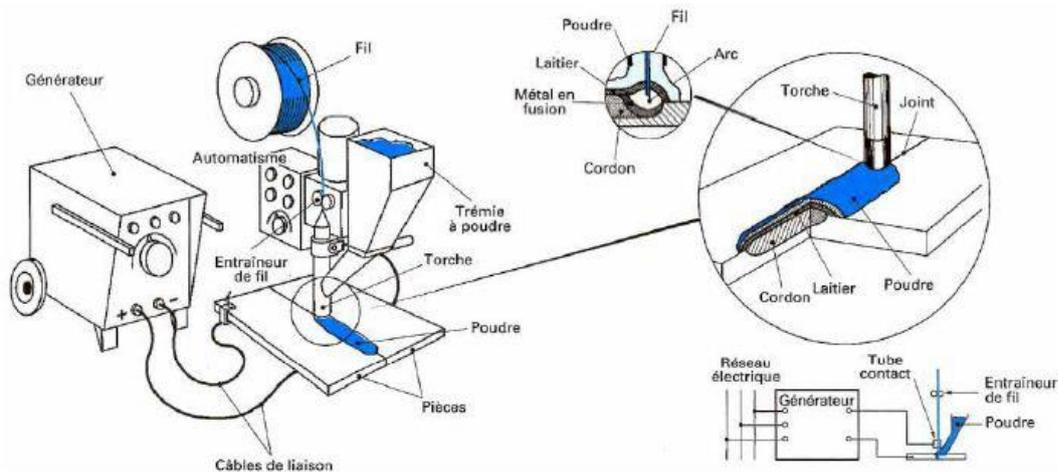


Figure I.9. Soudage sous flux en poudre : principe [26].

I.6.4 Types de flux en poudre utilisés :

- **Flux fondu** : Les ingrédients sont mélangés et traités dans un four électrique à l'arc. Le produit obtenu est parfaitement homogène.
- **Flux aggloméré** : Les ingrédients constitués de poudres métalliques et de produits minéraux sont agglomérés avec un liant (silicate de sodium) dans un four à basse température [27].

Le flux en poudre à trois rôles principaux :

1. Rôle électrique :

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

2. Rôle physique :

Le flux transformé en laitier liquide pendant le soudage maintient et moule le métal déposé. De là, les effets du flux sur l'aspect du cordon, sa forme, son profil et ses raccordements avec les bords soudés, ainsi que celui sur la compacité du métal déposé du fait du dégazage en cours de soudage [28].

3. Rôle métallurgique :

Le flux protège le bain de fusion contre l'action de l'oxygène et de l'azote atmosphérique.

Chapitre I: Etude bibliographiques

Il participe à la scarification de l'oxyde de fer existant sur les bords à souder.
Affine le métal en fusion par l'action de ses éléments calmants. (Manganèse, silicium...)
Incorpore en faible quantité des éléments d'alliage tels que chrome, nickel, etc.
Assure un refroidissement lent du bain [28].

I.6.5 les facteurs de soudabilités :

Par définition, la soudabilité de l'acier est son aptitude à être assemblé par un procédé et un type d'application donnés, qui assure effectivement la continuité métallique du matériau par la constitution de joints soudés.

On peut envisager la soudabilité sous trois aspects principaux :

- Soudabilité métallurgique.
- Soudabilité constructive.
- Soudabilité opératoire [29].

Cette propriété dépend de deux facteurs essentiels qui sont :

I.6.5.1 Choix du métal d'apport :

Le métal d'apport (Composition chimique, impuretés) entre dans la composition chimique de la zone fondue et contribue donc largement aux caractéristiques de celle-ci. Le choix d'un métal d'apport doit donc se faire en fonction : - Du métal de base. - Des propriétés recherchées mécaniques, chimiques (choix d'un métal d'apport ayant au moins les mêmes propriétés). - Du degré de soudabilité de l'acier de base (choix d'un soudage hétérogène dans le cas des fontes). - Du taux de dilution entre métal d'apport et métal de base [30].

I.6.5.2 Carbone d'équivalent :

Le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité d'un acier, car plus la teneur en (C) est élevée, plus l'acier n'est susceptible de subir la trempe. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent C_{eq} .

Le carbone équivalent C_{eq} est calculé selon la formule de l'I.H.S. (Institut International de Soudure) reprise dans la norme EN 10025 par la relation suivante :

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15}$$

Une autre formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haute limite d'élasticité à plus bas carbone [6].

Chapitre I: Etude bibliographiques

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

Les propriétés de soudabilités sont meilleures si la valeur du carbone équivalent est plus faible [33].

I.7 Procèdes de fabrication des pipelines :

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication [34], constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier algérien. On retrouve :

- Les tubes soudés sous la forme en spirale.
- Les tubes soudés sous forme longitudinale.
- Les tubes formés sans soudure

Pour le cadre de cette étude on se limitera à la présentation du mode de fabrication des tubes dits de moyens diamètres, c'est-à-dire aux tubes de diamètre extérieur compris entre 228.6mm et 406.4mm (9"à16"). Ils sont obtenus par formage suivi de l'opération de soudage en long (longitudinal) ou en spirale de tôles laminée à chaud. [35].

I.7.1 Les tubes soudés sous forme spirale :

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder. Après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage ou elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin. L'obtention du formage en spirale est réalisée par l'inclinaison d'angle α entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube représenté sur la figure I.10.

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaires telles que l'expansion ou le calibrage. De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage, le reste par la suite. Pour des épaisseurs de paroi au-dessus de 20mm, on utilise habituellement des tôles fortes.

Ce procèdes permet une exploitation économique optimale de la largeur de bande disponible, de par le rapport largeur de bande-diamètre allant jusqu'à environ 2,2.

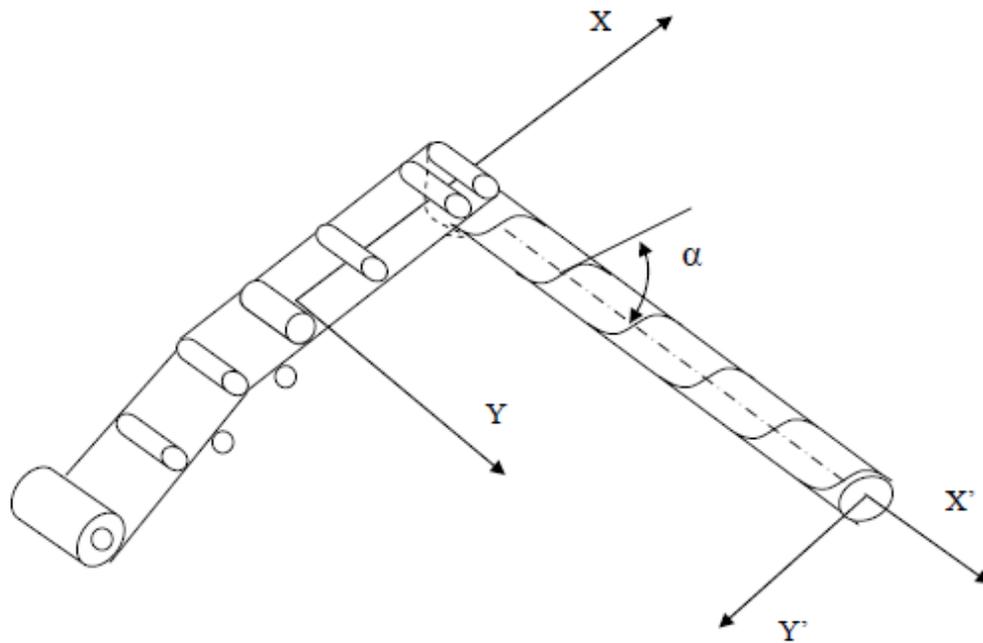


Figure I.10 : Principe de fabrication des tubes soudés [34]

Le processus de formage ou de cintrage du tube est conditionné par l'angle d'introduction de la bande selon la relation :

$$\sin \alpha = \frac{B}{D \cdot \pi}$$

Dans laquelle :

B, est la largeur de bande.

D, est le diamètre extérieur.

α , est l'angle d'introduction de la bande par rapport à la tête de formage.

Pratiquement, c'est très difficile de fabriquer les tubes avec un petit angle aigu, c'est pour cela, que les valeurs de l'angle β se limitent entre 15° et 50° .

La gamme des diamètres dans laquelle les tubes spirale sont fabriqués, s'étale de 400 à 3000mm environ avec des épaisseurs allant jusqu'à 30mm.

La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales suivantes représenté sur la figure I.11 :

- La préparation de la bande.
- La bande de rabouillage.

Chapitre I: Etude bibliographiques

- Le cintrage.
- Le soudage.
- Le parachèvement.
- La réception et inspection [34]

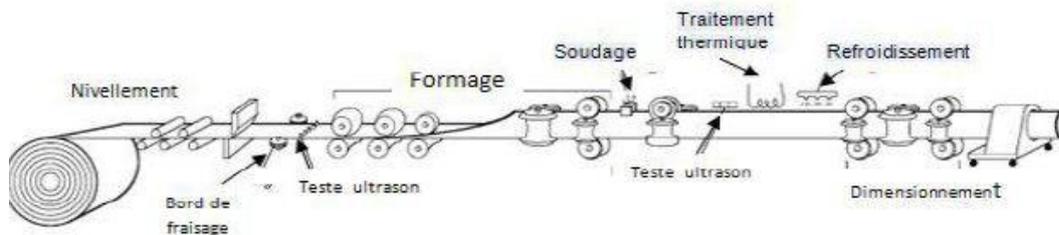


Figure I.11 : Technique de fabrication des tubes soudés en spirale [36].

La préparation de la bande et des rives de la bande ainsi que des soudures de raboutage influent directement sur la qualité du tube.

A l'entrée de la machine pour tubes spirale, on effectue les opérations suivantes :

- Déroulage de la bande.
- Dressage de la bande de cisailage.
- Chanfreinage des rives de la bande.
- Cambrage des rives pour éliminer l'effet de toit.

A l'entrée de la cage de formage on effectue la passe intérieure de la soudure alors que la passe extérieure est effectuée sur le tube formé.

Les procédés usuels pour la coupe sont :

- Oxycoupage.
- Découpage au plasma [34].

I.7.2 Les tubes soudés longitudinalement :

Les tubes de grands diamètres soudés longitudinalement sont fabriqués selon le procédé "UOE" désignation qui reprend la variation de forme au cours de la fabrication. Il comporte trois étapes principales :

- Le formage.
- Le soudage.
- L'expansion et le calibrage.

De plus la première étape est divisée en trois sous étapes :

Chapitre I: Etude bibliographiques

Le craquage et formage : Cette étape où la plaque va être pliée aux niveaux de l'extrémité, l'objectif de cette opération est de faciliter le processus de pliage par les étapes suivante, à partir de ça la tôle ou la plaque unitaire est pliée en deux types de presse la première confère la plaque sous forme "U" et la seconde lui donne une forme "O" les figures I. (12,13 et 14).

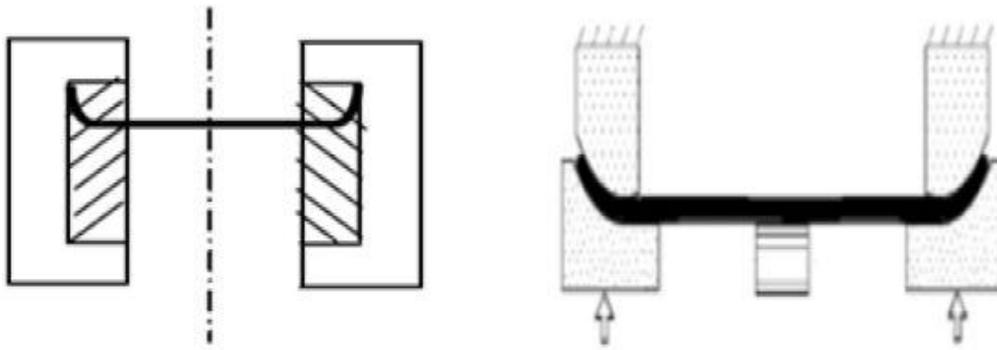


Figure I.12 : Le craquage [37].

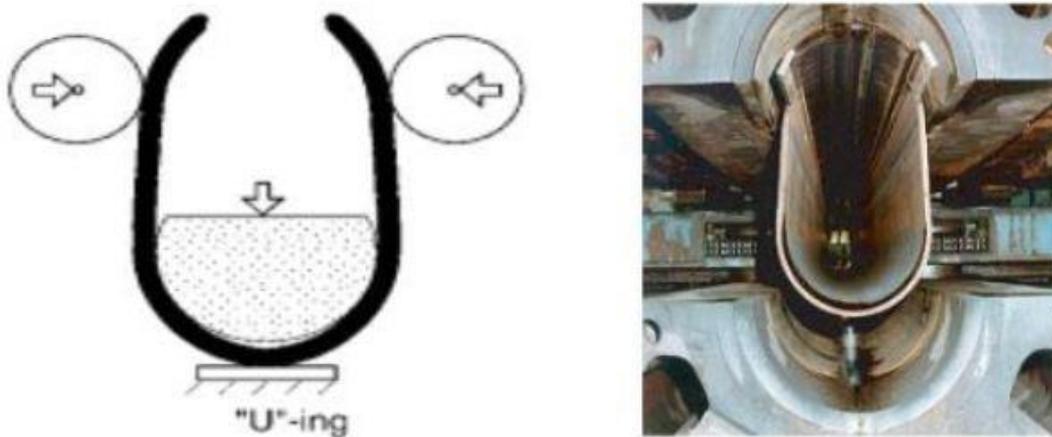


Figure I.13 : Formage sous forme ' U ' [37].

Le soudage : Il dépend ici de la technique de soudage à l'arc sous flux à l'aide de tête soudeuse automatique, les soudures intérieures et extérieures grandissent longitudinalement sur une trajectoire d'une ligne droite, généralement le cordon intérieur est réalisé le premier [34].

Expansion et calibrage : l'objectif de cette opération est d'atteindre des tubes de section parfaitement circulaire, l'augmentation des diamètres ici est de plus jusque' à 1.5% au maximum figure I.15.

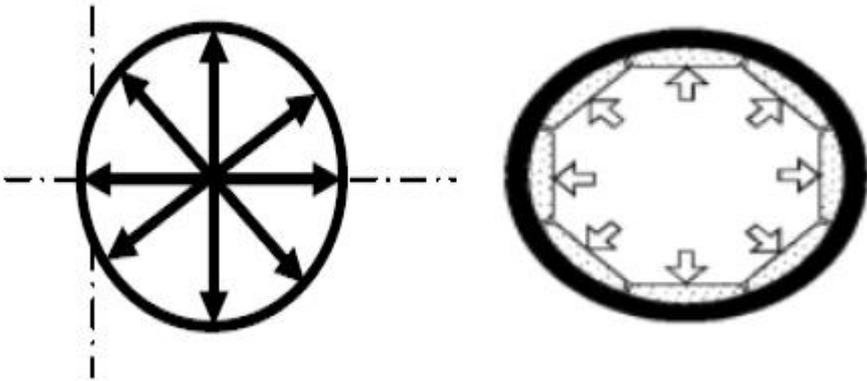


Figure I.15 : Expansion [36].

CHAPITRE II :
Généralités sur la fabrication
des tubes soudés en spirale

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

II.1. Introduction :

Dans le monde, le développement a permis à des moyens de transport des fluides dans des tubes. Ce transport se fait dans les pipelines pour des grandes distances. Au paravent le transport a été dans les camions citernes et dans les bateaux de transport hydrocarbure. Ces derniers provoquent un grand risque au cours de ce transport et des accidents mortels et en plus de la pollution à l'environnement.

La fabrication 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 compte de tous les exigences techniques du cahier de charge.

La qualité des tubes soudés en spirale fabriqué par ALFAPIPE est basé sur le contrôle des la réception de la matière première (bobine) jusqu'au produit fini (tube) en suivant la norme *Américaine API 5L* (American Petroleum Institut), en passant par plusieurs étape de contrôle.

Le respect des procédures de contrôles, des normes, des exigences ces et des spécifications du client a permis à ALFAPIPE de réserver sa place en tant que fournisseur potentiel dans le domaine de fabrication de canalisation soudée pour hydrocarbure au niveau national et internationale. [37]

II.2. Historique de l'unité ALFAPIPE :

En 1966, afin de satisfaire les besoins urgents en moyen de transport des hydrocarbures exprimés par la société nationale de transport et commercialisation des hydrocarbures (**Sonatrach**), un projet d'implantation d'une unité de fabrication de tubes soudés en spirale au sein du complexe d'EL HADJAR était mis à l'étude.

Le chantier du tube spiral a débuté en 1967 et mis en marche 1969, il occupe une superficie de 98000 m² couverts.

La gamme des tubes fabriqués : variant en diamètre entre 16" (406 mm) et 48" (1220 mm) doit répondre aux exigences des spécifications techniques ainsi qu'au code de sécurité en vigueur national qu'international.

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

En 1996 dans le cadre de la restructuration de l'entreprise SIDER ; l'unité tube spirale a fait l'objet d'une externalisation à compter du 2 janvier 1996 et désormais devenue **ALFATUS** (algérienne de fabrication de tubes soudés).

En 2008 ALFATUS et **Anabib Ghardaïa**, se sont fusionnées pour devenir ALFAPIPE. Leur direction générale se trouve actuellement à Alger.

La structure générale du complexe pour la fabrication de produit fini, est représenté par la figure I.1. Le complexe est gouverné par une direction générale telle que montre par l'organigramme de la figure II.2.

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

Structure générale du complexe :

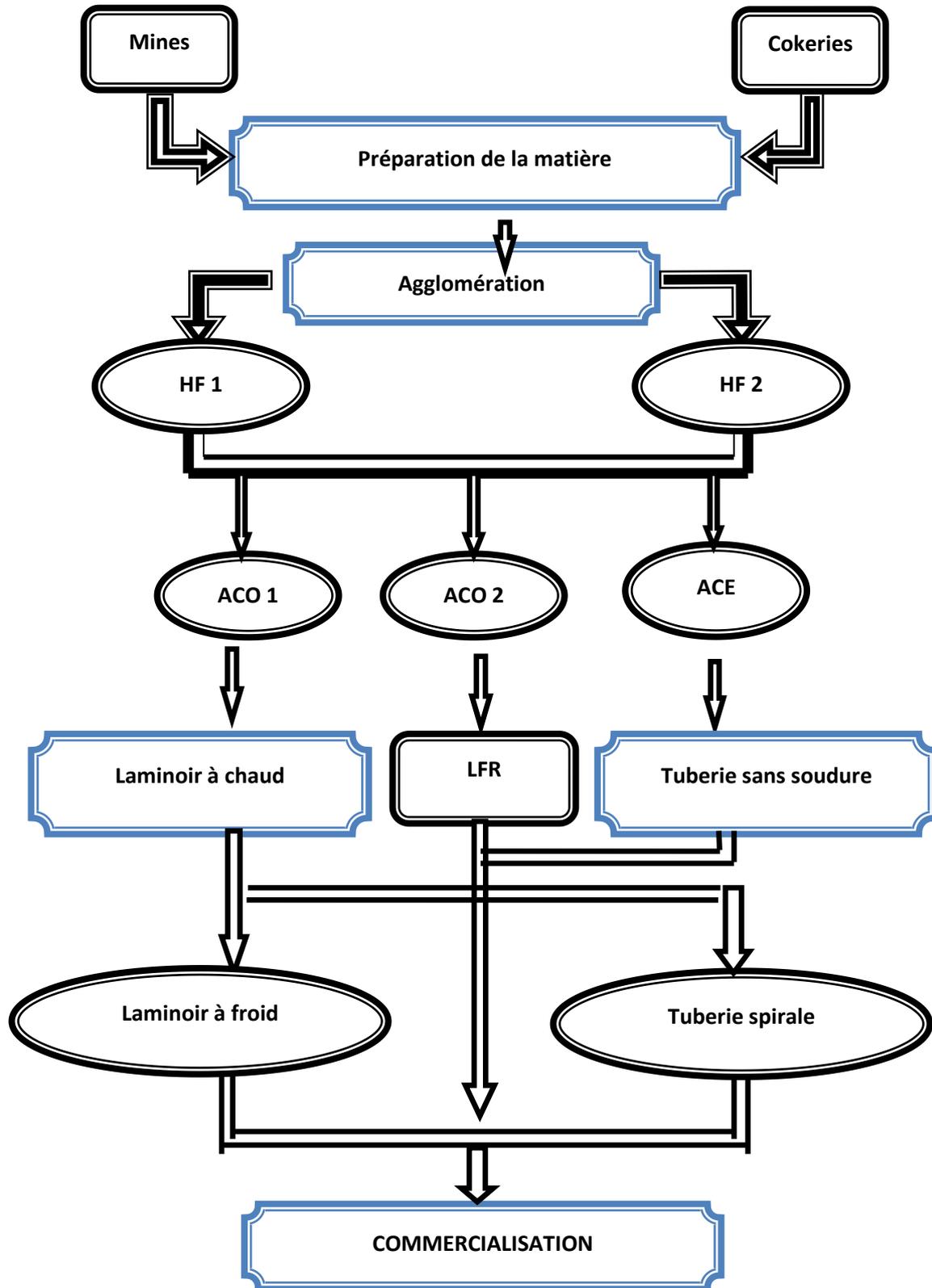


Figure II.1 : Structure générale du complexe [48]

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

L'organigramme de la direction générale d'Alfa pipe :

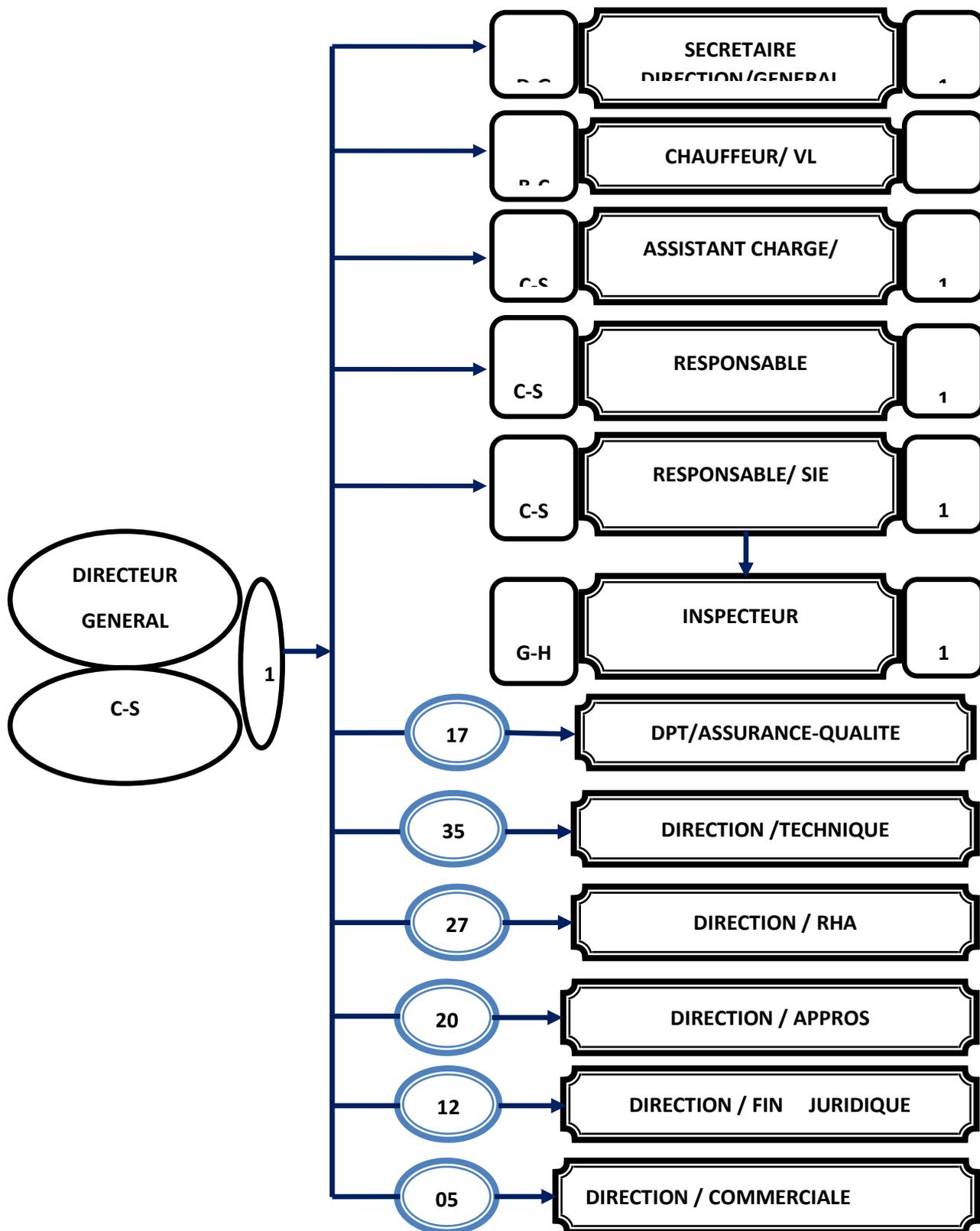


Figure I.2 : L'organigramme de la direction générale d'Alfa pipe [48]

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

TUBERIE ANNABA :

Située à 15 Km d'Annaba ALFAPIPE Annaba spécialisée dans la fabrication de tubes soudés en spirale et revêtement.

Son savoir-faire et son aptitude à répondre aux besoins diversifiés des utilisateurs, est entré dans le concert des grands fabricants de tubes.

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.
- ✚ Une ferme volonté de conforter sa place de leader de producteur de tubes par la recherche de nouvelles formes d'association et par le renforcement de son processus de modernisation

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 automatiquement à l'arc émergé sous flux, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur

Spécification technique :

TUBE GAZ ET PÉTROLE SELON API 5L :

Tableau II.1 : Caractéristiques mécanique des matériaux

Grade de l'acier	Limite élastique $R_{e0,2}$ MPa	résistance à la rupture MPa
X42	289	413
X46	317	434
X52	378	455
X56	386	489
X60	413	517
X70	482	566

[48]

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

TUBE HYDRAULIQUE SELON NFA 49150 :

Grade de l'acier	Limite élastique MPa	Résistance à la rupture MPa	Allongement %
TSE 235	235	370	≥ 23

[48]

Domaines d'application :

- ✚ Canalisation pour transport de fluides (Pétrole, Gaz, Eau)
- ✚ Construction métallique (poteaux, pieux pour fondation)

➤ Revêtement intérieur :

Le revêtement intérieur en résine époxy s'applique sur les tubes destinés au :

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

L'aspect du revêtement est brillant, lisse et répond aux exigences de la norme API RP 51 et au standard AWWC210.

➤ Revêtement extérieur :

En polyéthylène en tri couches :

Domaine d'application :

- ✚ Canalisation enterrée ou posée en surface
- ✚ Canalisation émergée en eau douce ou salée
- ✚ Le revêtement est constitué de :

- Une couche de résine époxydique appliquée par pulvérisation électrostatique de 50-80 microns d'épaisseur.
- Une deuxième couche en copolymère destiné à assurer l'adhérence polyéthylène.
- Une couche de polyéthylène extrudé.

✚ Les avantages du revêtement extérieur en polyéthylène se caractérisent par une grande inertie chimique, une excellente adhérence de revêtement sur le corps de l'acier.

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

Un apport au réseau d'une résistance fiable vis à vis des sols agressifs et des courants vagabonds. [38]

II.3. Cycle de fabrication du tube :

Les tubes sont obtenues à partir des bobines laminés à chaud de tonnage 10 à 30 t et d'une largeur bande 600 à 1800 mm, selon le diamètre de tube.

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

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

La fabrication des tubes spirale peut être subdivisée en opérations principales suivantes :

Comme sont montré par les photos.

- ✓ Stockage bobines
- ✓ Préparation bobines
- ✓ Entrée bobine
- ✓ Préparation arêtes
- ✓ Soudure intérieure
- ✓ Soudure extérieure
- ✓ Coupe du tube
- ✓ Nettoyage de tube
- ✓ Contrôle visuel
- ✓ Contrôle Radioscopie
- ✓ Contrôle par hydrostatique
- ✓ Contrôle par ultrasons
- ✓ Contrôle par Radio Graphie
- ✓ Contrôle finale

Comme à été déjà mentionné auparavant la figure I.3 montre le processus de fabrication des tubes de la bobine jusqu'à la dernière opération de contrôle mécanique et radiologique ce processus est suivie par une autre opération de revêtement extérieur de tube en PE tri couches, le processus est présenté par la figure II.4.

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale



Stockage bobines



Préparation bobines



Entrée bobine



Préparation arêtes



Soudure intérieure



Soudure extérieure



Tronçonnage du tube



Nettoyage de tube



Contrôle visuel



Contrôle Radioscopie



Contrôle hydrostatique



Contrôle par ultrasons



Contrôle par Radio Graphie



Livraison

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

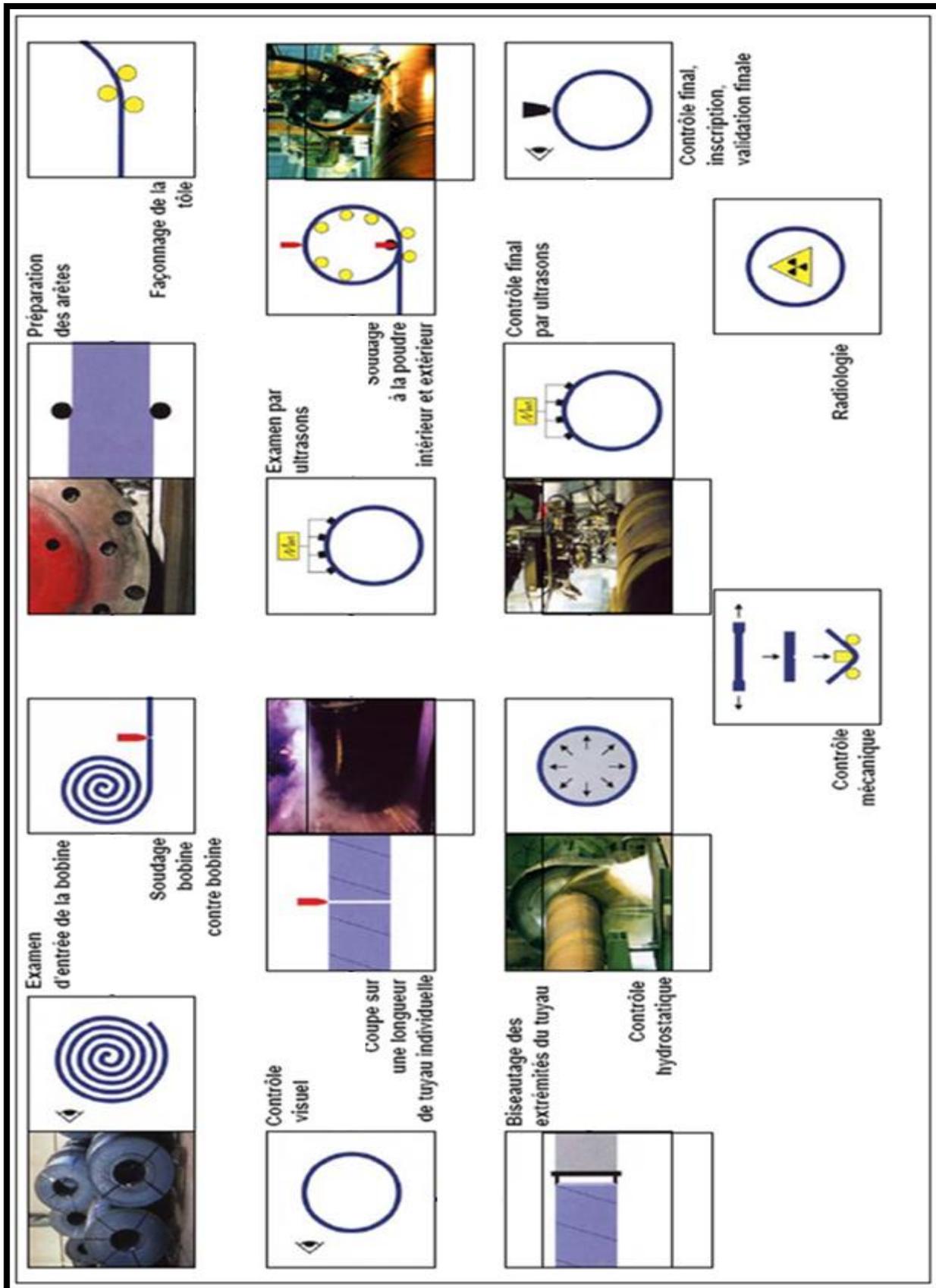


Figure II.3 : Processus de fabrication des tubes [48]

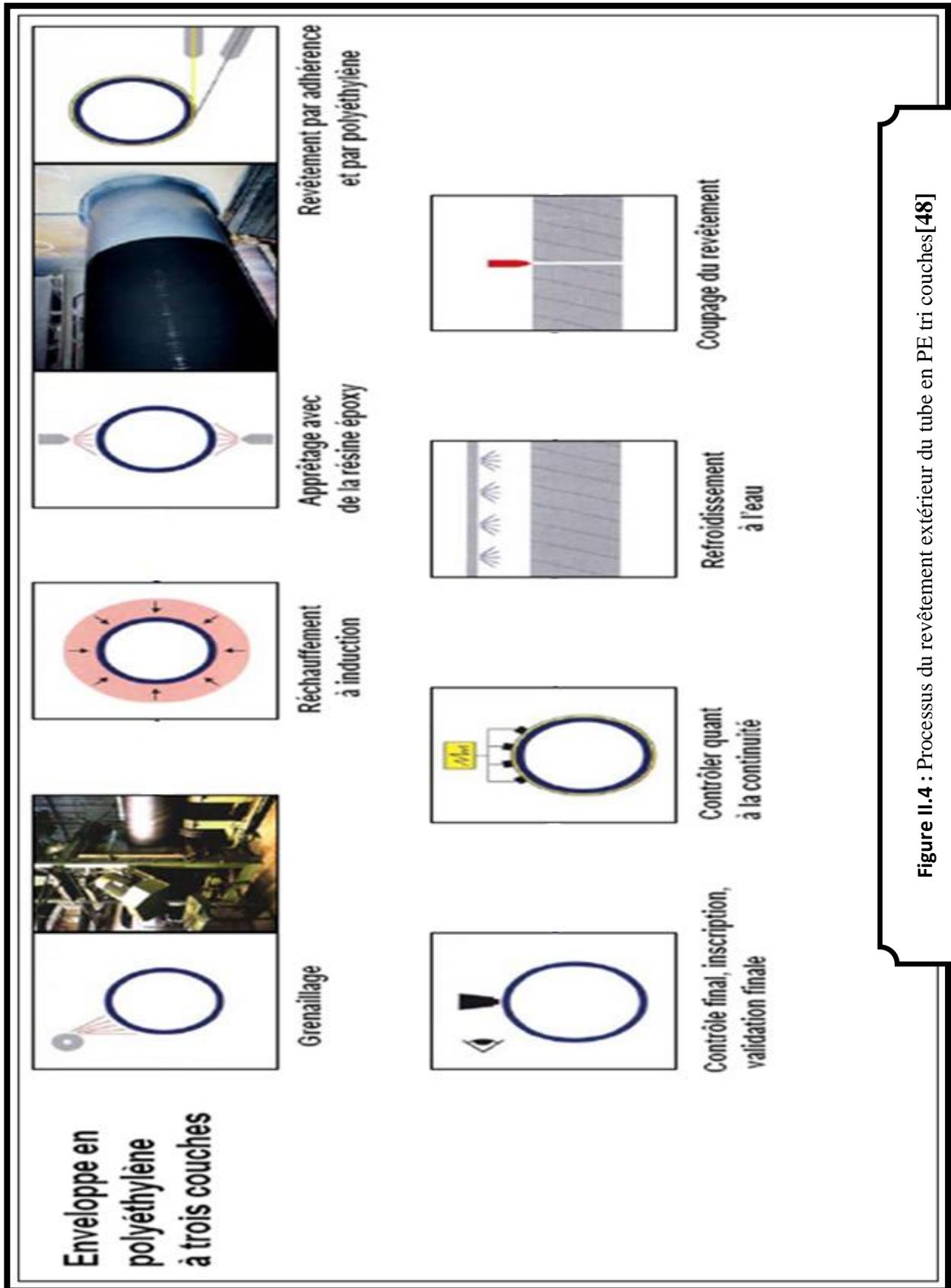


Figure II.4 : Processus du revêtement extérieur du tube en PE tri couches [48]

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

Elle dispose d'un système qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales API et ISO9001 en passant par plusieurs étapes de contrôle.

II.4. Description d'une opération de soudage à l'arc :

II.4.1. Généralité :

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à assembler est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène aux caractéristiques plus au moins proches de celle du métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones :

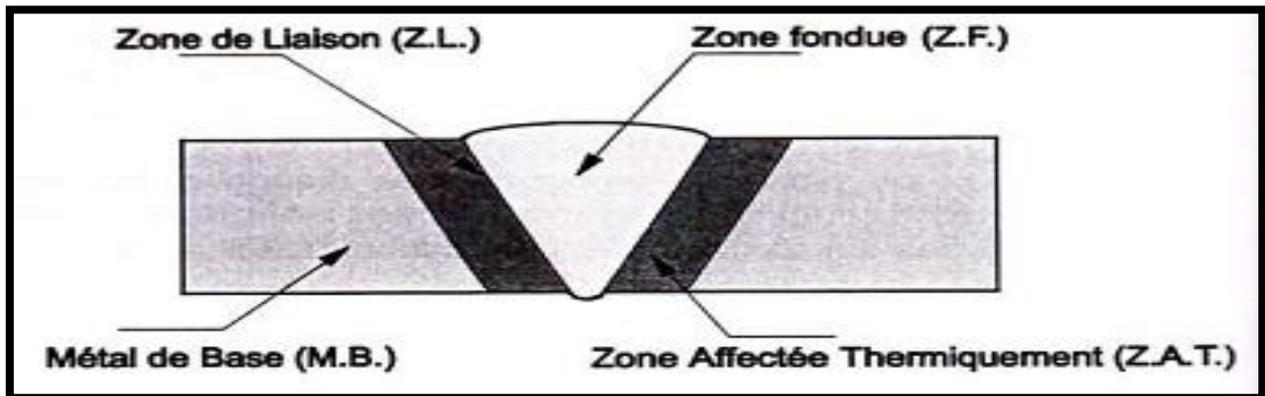


Figure II.5 : Structure de joint soudé [48]

✚ **Métal de base** : zone dans laquelle le métal n'a subi aucune transformation car la température est restée suffisamment basse.

✚ **Zone affectée thermiquement** : zone du métal de base qui a subi des transformations à l'état solide sous l'action de la chaleur.

✚ **Zone fondue** : zone où le métal a été porté à fusion. Ce métal est composé d'un mélange du métal de base et du métal d'apport.

✚ **Zone de liaison** : frontière de la zone fondue et du métal resté solide.

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

II.4.2. Processus de soudage sur la machine :

Théoriquement les tubes obtenus sont de longueurs limités 12 m pour raison de transport, le tonnage d'un tube produit varie en fonction de poids bobine, largeur bande, épaisseur de la bande et en fonction de la vitesse de soudage. le formage du tube en hélice est obtenus par l'introduction de la bande dans la cage à galet déjà réglée au diamètre 48'' et suivant l' angle de l'hélice des tubes à fabriquer l'effort poussant sur la bande par deux rouleaux entraînés par un ensemble moto- réducteur de 45 KW..

Avant de soudage au niveau cage de formage, la bande est chanfreinés de part et d'autre et aussi bien nettoyer afin qu'il y est une bonne pénétration de la soudure.

Une fois enroulées en hélice, les bandes sont soudées par le procédé dit à l'arc immergé sous flux par 2 passes successives, l'une à l'intérieur du tube, à l'accostage des rives, l'autre soudé extérieurement une demi-spire plus loin.

Lors du soudage l'accostage de rives est contrôlé par un système automatique de réglage de la fente de soudage qui fonctionne par un groupe hydraulique alimentant un vérin.

II.4.3. Paramètres de soudage exigés pour souder un tube 48'' :

Le procédé de soudage à l'arc immergé sous flux doit suivre les exigences et paramètres de soudage automatique sur machine, pour le soudage intérieur et extérieur afin d'avoir une bonne qualité du joint soudé le tableau II.2 montre les paramètres de soudage sur la machine.

Tableau II.2 : paramètres de soudage d'une machine

Soudage intérieur		Soudage extérieur	
Intensité (A)	Tension (V)	Intensité (A)	Tension (V)
800 / 825	33 / 34	825 / 850	33 / 34
Vitesse de soudage		0,75 m/min	
Nuance d'acier		X 70	
Épaisseur de la bande		14,3 mm	
Largeur de la bande cisaille		1680 mm	
Diamètre du fil de soudage int / ext		4 mm – L70 / LNS 140 A	
Flux de soudage		p 223	

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

❖ Caractéristiques mécaniques du fil et flux :

Tableau II.3 : Essai de traction du fil. [48]

Test temp (C°)	Rp0.2 (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A %
RT	546	616	26

RT : Température ambiante

Tableau II.4 : Charpy : essai de résilience du fil. [48]

Test temp (C°)	KV (j)			KV moy (j)
-40	124	76	104	101

❖ Caractéristiques chimique du fil et flux:

Tableau II.5 : Analyse chimique du fil [48]

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.2	1.01	<0.01	<0.01

Tableau II.6 : Analyse chimique du flux [48]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V
0.16	0.32	1.01	0.07	0.01	0.03	0.03	0.48	<0.01	0.01	<0.01

Le produit identifié ci-dessous à été fabriqué, examiné et fourni dans la conformité. Avec un programme de qualité qui remplit la condition d'ISO 9001 V2000. [38]

II.4.4 .Modes opératoires de soudage :

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

Objectif :

Passer en revue les modes opératoires de soudage couramment utilisés et mettre l'accent sur quelques considérations pratiques

Résumé :

Cette partie décrit les modes opératoires de soudage couramment utilisés dans la construction : soudage à l'arc manuel avec électrode enrobée sous gaz, soudage par protection de gaz actif avec transfert par grosses gouttes et par pulvérisation, soudage à l'arc sous flux en poudre et le soudage des goujons. Chaque mode opératoire est décrit brièvement et les avantages, inconvénients et limites de chacun sont résumés. On étudie le choix d'un mode opératoire de soudage appliqué à une situation particulière.

Abréviations :

MAG : soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil-électrode fusible (Métal Active Gaz) (parfois appelé soudage MIG - Métal Inerte Gaz : soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec fil-électrode fusible)

MMA : soudage manuel avec électrode enrobée (Manuel Métal Arc Welding)

SAW : soudage à l'arc sous flux en poudre (Submerged Arc Welding)

HAZ : zone affectée thermiquement ZAT (Heat Affected Zone)

Sources de chaleur et méthodes de protection :

Il y a trois méthodes principalement utilisées pour créer la chaleur nécessaire au soudage :

- ✚ flamme oxyacétylénique,
- ✚ résistance au passage d'un courant,
- ✚ arc électrique.

II.4.5. Soudage à l'arc sous flux en poudre (SAW):

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint (figure I.6). L'électrode est un fil nu dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le voltage et l'intensité du courant sont choisis au début de la soudure et sont maintenus à ces valeurs par des systèmes de régulation (feedback) qui, en pratique, peuvent être plus ou moins sophistiqués. Le flux se trouve sous forme

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

de particules et est déposé à la surface du joint. L'arc opère sous la surface du flux, dont il fond une partie pour former du laitier. Le flux non fondu est récupéré et peut être réutilisé pour la soudure suivante.

Le soudage à l'arc sous flux en poudre opère généralement à des intensités entre 400 et 1000A. Ceci veut dire que les bains de fusion sont importants et ne peuvent être maîtrisés qu'en position à plat, bien que des cordons d'angles puissent être déposés en position de soudage en corniche, jusqu'à 10 mm de longueur de côté en une passe. Aux endroits où il est difficile de contrôler la pénétration de la passe de racine, on peut utiliser une latte-support ; sinon, la première passe peut être réalisée par un procédé de type MMA ou MAG, puis la gorge remplie selon le procédé SAW. Le procédé SAW offre des avantages considérables quand on veut souder des joints longs (supérieurs à 1 m de longueur). Les vitesses de soudage élevées et l'opération en continu conduisent à une productivité élevée. La première exigence est, toutefois, d'avoir un accostage précis.

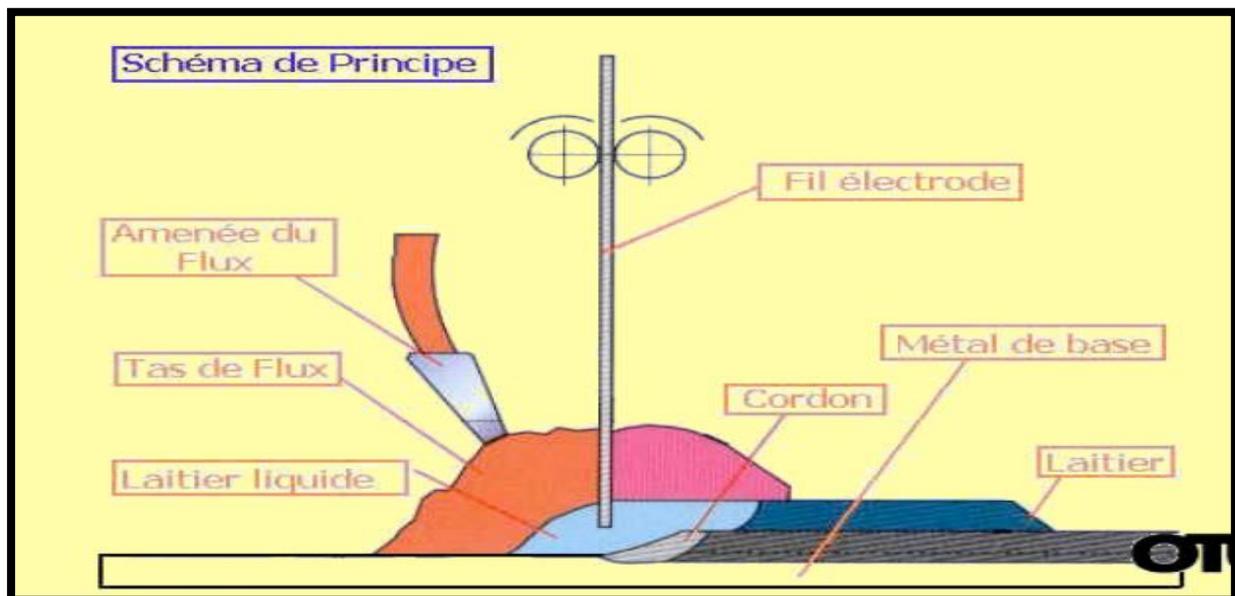


Figure II.6 : Soudage à l'arc sous flux en poudre (SAW). [48]

Choix de procédé :

Quand on veut choisir un procédé de soudage, il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de facteurs :

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

L'épaisseur du matériau à souder ;

L'endroit où la soudure doit être faite : Les procédés SAW et MAG conviennent mieux à l'environnement protégé de l'atelier de fabrication. Le procédé MMA peut, plus volontiers, être utilisé sur chantier ;

La précision de l'accostage et les possibilités de mauvais alignement :

Les procédés SAW et MAG avec transfert par pulvérisation requièrent une bonne présentation des pièces ; ils sont particulièrement sensibles à la variation de l'écartement à la racine et/ou aux dimensions de la surface racine ;

L'accès au joint : Il est nécessaire de s'assurer qu'à la fois l'équipement de soudage et la torche ou la tête de soudage peuvent être positionnés correctement ;

La position de soudage : Les procédés SAW et MAG avec transfert par pulvérisation ne conviennent pas pour du soudage vertical ou en position plafond. Le procédé MAG avec transfert par grosses gouttes est acceptable pour du soudage vertical ou en position plafond, mais le procédé MMA est probablement le meilleur pour des travaux en position plafond, en particulier sur site ;

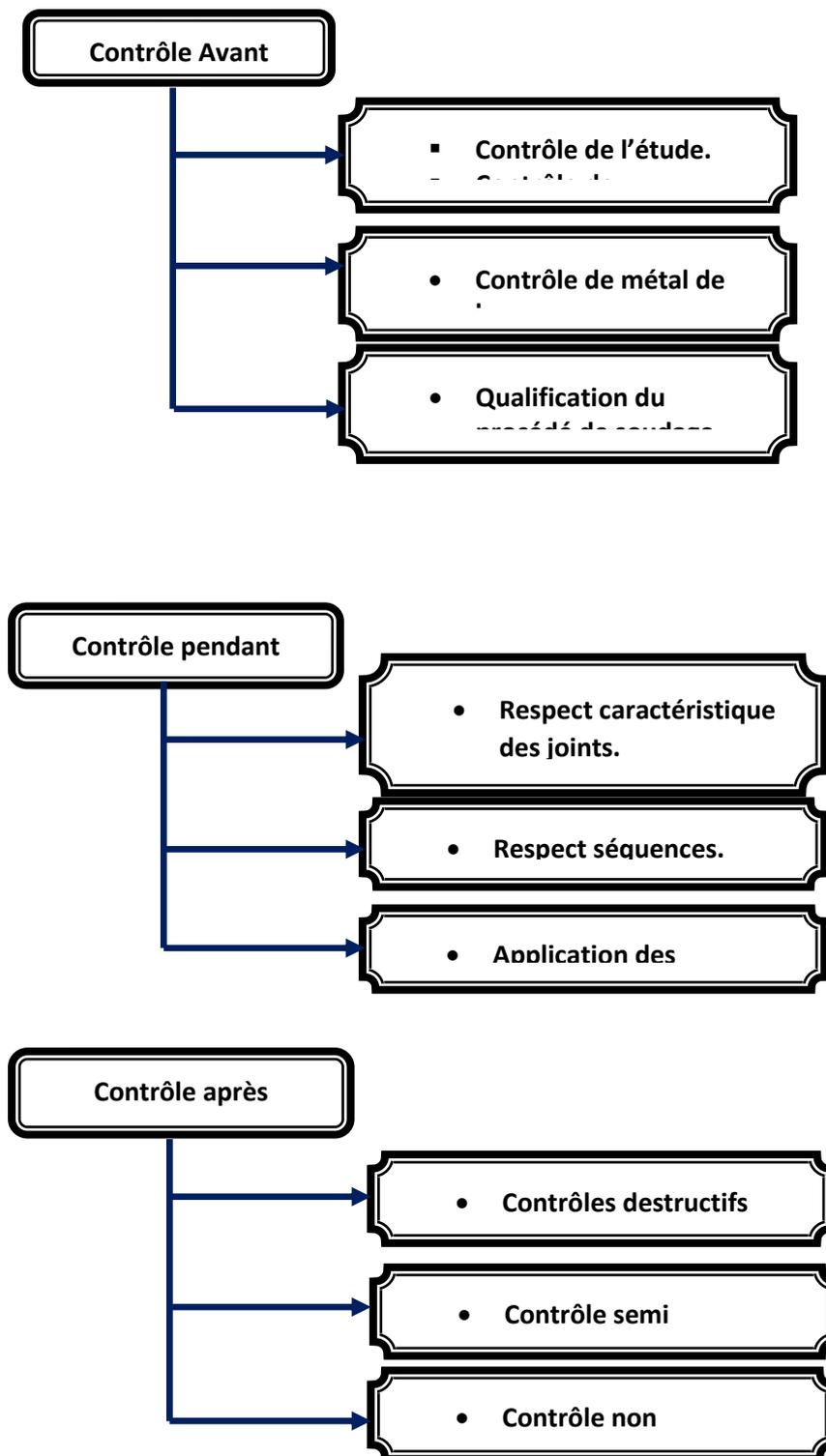
La composition de l'acier : Les aciers ayant une faible valeur d'équivalent carbone sont plus volontiers soudables et nécessitent des niveaux de préchauffage plus faibles ;

Le coût comparé : On peut calculer le prix par unité de longueur de soudure, mais il dépend du coefficient de fusion du procédé et doit autoriser des différences dans les cycles de travail (temps inoccupé entre les électrodes pour le procédé MMA) ;

Le caractère correct du choix du mode opératoire dépend de : la situation, l'accostage, l'accès, la position, la composition de l'acier et les facteurs économiques. [38]

I.5. Procédures de contrôle des tubes :

En soudage, où les facteurs régissant la qualité des assemblages sont nombreux et complexes, il y a lieu de prévoir trois types de contrôles distincts, en fonction du stade d'intervention.



CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

II.6. Contrôles Non destructifs et destructifs :

II.6.1. Contrôles Non Destructifs (CND) :

❖ 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), de la liste de colisage et la spécification des bobines dans le but de s'assurer la conformité des bobines reçues avec les documents d'accompagnement 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.

Cette identification permet d'assurer la traçabilité du produit réceptionné. Les bobines non conformes sont isolées avec un marquage spécifique.

❖ Contrôles des tubes :

Ces contrôles concernant le métal de base et le cordon de soudure. Ils ont pour but de mettre en évidence des défauts soit directement (visuel) soit indirectement par leurs effets (visuel, magnétoscopie, ultrasons, radiographié...). Ces défauts sont de types :

- ✚ Défauts admissibles (soufflures sphériques ou allongées, coup d'arc...)
- ✚ Défauts non admissibles (manque de pénétration, fissures, caniveaux...).

La conformité des tubes est vérifiée à la fin de l'opération de fabrication et avant leur acheminement vers le parc par différents moyens de contrôle. Ces contrôles concernent le métal de base et le cordon de soudure. Les étapes de contrôle sont les suivants

❖ Contrôles visuels :

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

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

soudés. L'inspection est faite sous un niveau d'éclairage d'au moins de 350 lux. L'évaluation métrologique des tubes soudés à l'arc sous flux en poudre comporte les paramètres suivants :

Voir le tableau I.7.

Tableau II .7 : paramètre de contrôle visuel. [48]

<i>Paramètre</i>	Unité	Méthode de mesure
Diamètre	Mm	Micromètre (ruban gradué)
Épaisseur de la paroi	Mm	DM2 (micromètre)
Longueur	Mm	Double décimètre
Rectitude	Mm	Fil à plomb et règle
Équerrage des extrémités de tube	Mm	Équerre
Effet de toit	Mm	Comparateur
Dénivellation (décalage de soudure)	Mm	Comparateur
Hauteur du cordon de soudure	Mm	Calibre d'élévation
Largeur de cordon de soudure	Mm	Règle
Angle de chanfrein	Mm	Compas de chanfrein réglable
Talon de chanfrein	Mm	Règle
Enfoncement	Mm	Règle
Masse de tube	Kg	Balance

❖ *Contrôle par radiographie :*

Principe :

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

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

Le contrôle radiographique des soudures est effectué dans deux chambres à rayon X (figure I.7). Le cordon de soudure est visualisé en totalité par radioscope. Toute fois le repérage de défaut est sanctionné par une prise de clichés.

Un marquage indélébile repère l'endroit du défaut. Le contrôle des réparations et des indications de l'ultrason ainsi que les extrémités des tubes est réalisé au niveau de la chambre à radiographie.

Pour la traçabilité un dossier film est instauré pour chaque tube. Les contrôles par radiographie sont confiés à un personnel certifié niveau 2.

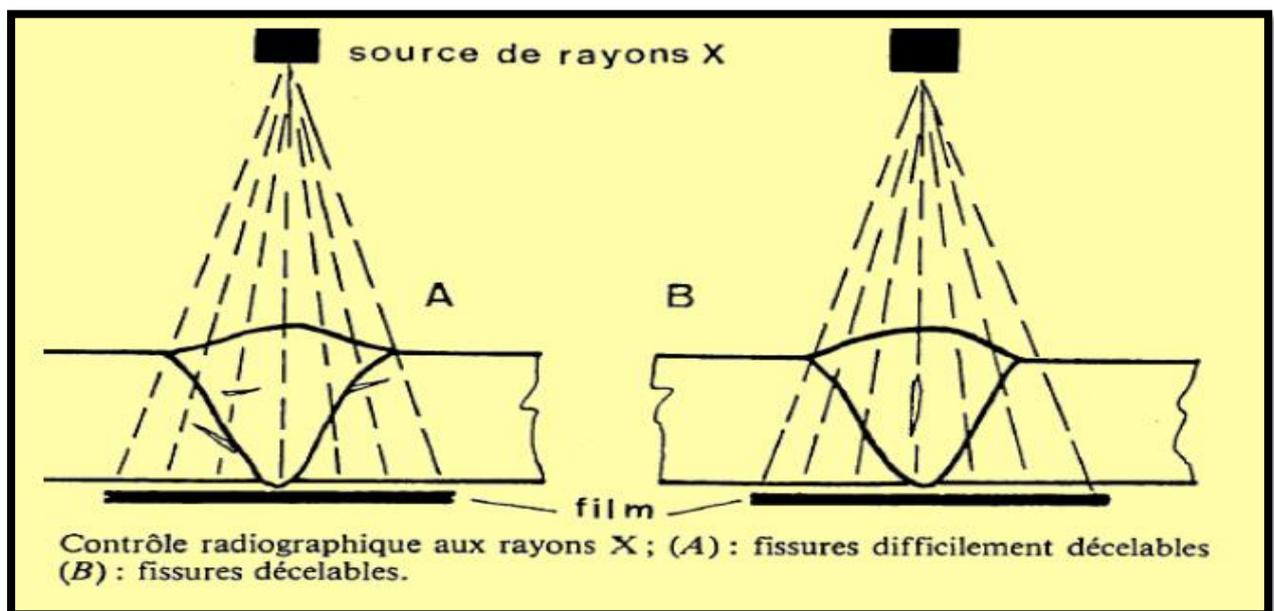
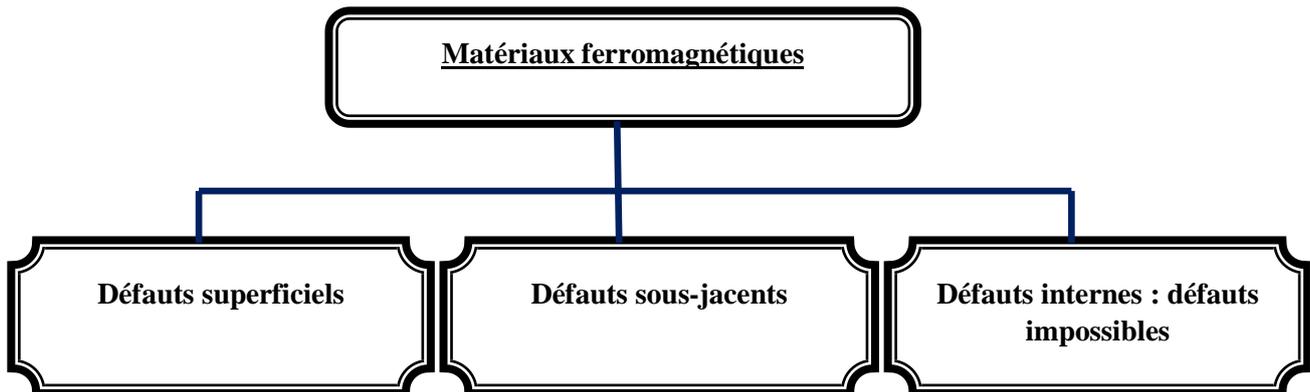


Figure II.7 : CND Radiographie [48]

❖ Contrôles par magnétoscopie :

Domaine d'application de la magnétoscopie[48]



Aussi appelé « **examen par aimantation** », ce procédé ne s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques : les aciers (sauf austénitiques), les fontes, le nickel, le cobalt.

La magnétoscopie comme le montre la figure I.8, permet de déceler les défauts débouchant à la surface du cordon de soudure, voire même légèrement sous jacent. Elle est utilisée particulièrement pour la réparation du cordon de la soudure. Après chaque gougeage suivi d'un meulage. Un contrôle magnétoscopique par contraste est effectué pour s'assurer de l'élimination totale de défaut signalé par la chambre noire. La zone à réparer est contrôlée par radiographie.

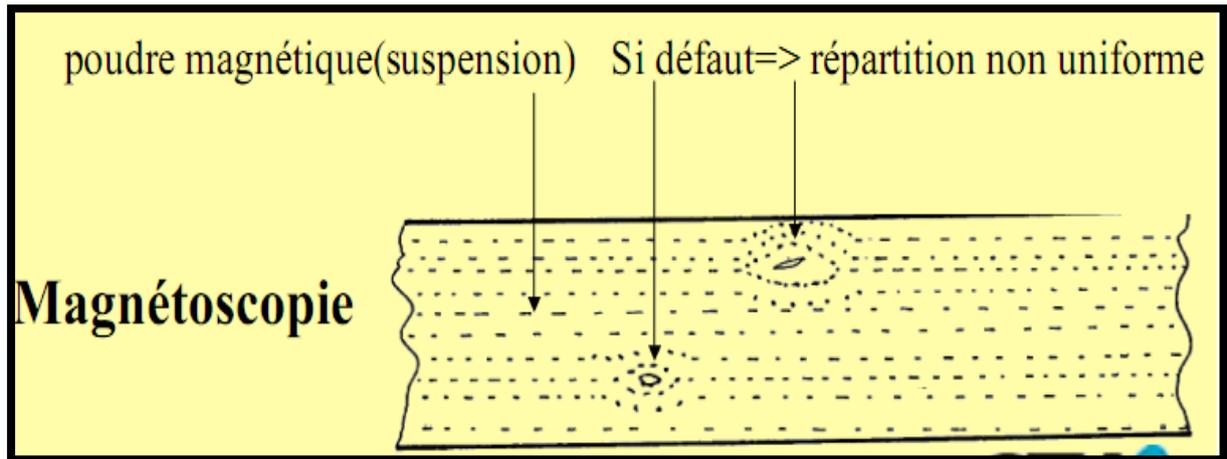


Figure II.8 : CND Magnétoscopie [48]

❖ Épreuve hydrostatique :

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test non destructif final.

Les tubes sont testés à 90% de leur limite élastique selon API 5L, et la spécification du client, en respectant la réglementation algérienne. Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai 103 bar pendant au moins 15 secondes. Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes.

Contrôle aux ultrasons automatiques (après test hydrostatique) :

Le contrôle aux ultrasons est réalisé sur le cordon de soudure (figure I.9), le métal de base et les extrémités du tube afin de détecter tout défaut. Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur PC et imprimé sur papier (rapport Ultrason ou numéro du tube y est reporté ; les indications des défauts sont affichées d'une manière acoustique et optique). Pour contrôler la fiabilité de l'installation ultrasonique, un tube étalon est passé périodiquement en contrôle début et fin de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tout les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle.

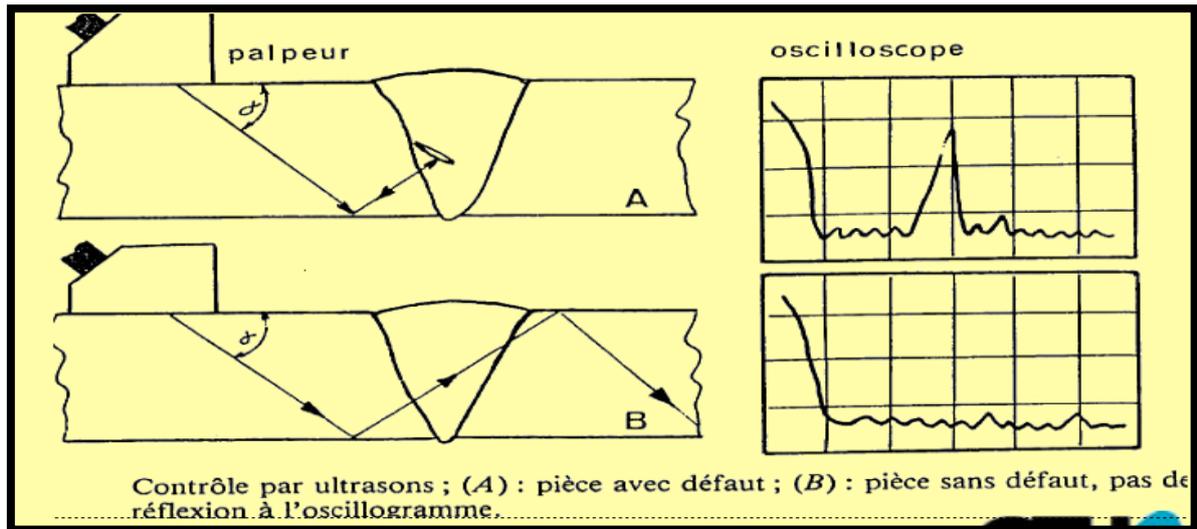


Figure II.9 : CND Ultrason [48]

❖ Contrôle par ressuage :

L'essai de ressuage est une méthode de contrôle non destructif. Cette méthode permet de détecter des défauts débouchant (fissures, porosités, traces d'outils,...).

Principe :

- ✚ Nettoyage de la surface à examiner.
- ✚ Application de la pénétration colorée.
- ✚ Elimination de l'excès de pénétrant.
- ✚ Application du révélateur.
- ✚ Examens sous lumière blanche.
- ✚ Remise en état de la pièce.

Domaine d'application :

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

De part son principe, le contrôle par ressuage ne permet que la détection, l'identification et dans une moindre mesure l'estimation de l'importance des défauts débouchant à la surface d'une soudure.

❖ Contrôle final :

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours.

II.6.2. Contrôles Destructifs (CD) :

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, BDWTT), des analyses chimiques et des observations macrographiques. [39]

❖ 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, cordon soudé) sont prélevés transversalement à l'axe du tube.

❖ Essais réalisés :

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

❖ 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).

❖ Essai de traction :

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

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.

❖ **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.

❖ **Essai de résilience :**

La ténacité de l'acier et de la soudure est vérifiée par les résultats de la lecture de l'énergie déployée pour rompre les éprouvettes de résilience et du taux de ductilité du faciès de rupture. La température d'essai est exigée par le client.

❖ **Examen macrographique :**

Cet examen révèle tous les problèmes de géométrie de la soudure (désaxage, manque d'interpénétration, surépaisseur du cordon,...).

❖ **Essai de BDWTT (Browken Drop Weight Test Tear) :**

Pour évaluer la résistance du métal de base à la propagation de criques et des fissures, un essai au mouton de choc (essai de chute de masse) est effectué.

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette entaillée en V avec une profondeur de 5mm portée à une température exigée dans une enceinte thermique, avec un maintien à la même température de 15 minute. Les éprouvettes sont soumises à un choc brutal d'une masse de 500 kg lâchée en chute libre d'une hauteur comprise entre 3 et 6 mètres selon la nuance de l'acier.

L'examen visuel à la loupe de la cassure permet de différencier entre une fracture due au cisaillement (aspect ferreux tendre) et une fracture de clivage (aspect brillant). Le calcul de pourcentage de la zone de cisaillement permet d'accepter ou de repousser l'essai. [40]

Conclusion :

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

CHAPITRE II : Généralités sur la fabrication des tubes soudés en spirale

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

**CHAPITRE III. LES CAUSE DE LA
RUPTURE DES TUBES REVETUS ET NON
REVETUS**

INTRODUCTION :

Un pipeline est une canalisation formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout about, destinée à l'acheminement d'un endroit à un autre *de* matières gazeuses ou liquides ; Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement, et presque toujours enterrées sauf dans certaines régions.



Figure III.1. Pipelines

Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres, voire des milliers de kilomètres. Très souvent les pipelines sont interconnectés entre eux pour former un réseau parfois très dense, formant une sorte de «toile d'araignée».

III.1. Facteurs métallurgiques :

III.1.1. Propriétés des tubes:

Depuis plus de 25 ans, les industries de la métallurgie et de la sidérurgie développent de nouveaux types d'aciers, appelés Aciers à Haute limite d'Elasticité (acier HLE), afin de diminuer le prix de revient des pipelines. Ces métaux, qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques (Tableau III.1.1), permettent de diminuer l'épaisseur des pipelines, donc de minimiser la quantité de matériau nécessaire à leur élaboration. Le coût de fabrication d'un pipeline étant essentiellement déterminé par cette quantité, l'usage d'aciers HLE permet de réaliser de fortes économies.

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).

CHAPITRE III : LES CAUSE DE LA RUPTURE DES TUBES REVETUS ET NON REVETUS

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.

III.1.2.Composition chimique

Elle est obtenue par l'analyse par spectrométrie (mesure d'onde d'élément) L'acier X70 contient une faible teneur de carbone (0.085). La composition chimique est détaillée au (tableau).

Tableau III.1.1. : Composition chimique de l'acier X70

Elément	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Value	0.085	0.321	1.52	0.002	0.006	0.033	0.018	0.003	0.038	0.003	0.013
Elément	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+Nb	S+D	Ceq	
Value	0.053	0.007	0.063	0.003	0.604	0.001	97.8	-	0.0073	0.36	

III.1.3.Propriétés mécanique :

Tableau III.1.2 : Caractéristiques mécanique de l'X70 selon l'API5L

Caractéristiques	Epaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Rc/Rm
API5L					
X70	5-25	485-605	570-605	≥ 18	0.90

Avec :

Re : la limite d'élasticité.

Rm : la résistance à la traction.

A% : le pourcentage d'allongement après rupture.

III.1.4.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.

III.1.5. 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 surlignes 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.

III.1.6. Influence de la composition chimique :

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLH) 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 dispersion des 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 AHL 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,....

III.1.7. 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.

III.2. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des canalisations:

Les canalisations sont largement employées pour le transport de fluides et de gaz car c'est le mode d'acheminement actuellement le plus économique. L'accroissement de leur diamètre et de la pression de service augmentent le risque de rupture amorcée à partir de défauts. La présence d'un défaut dans une canalisation associée à l'effet de la pression interne pourra provoquer une rupture localisée induisant une fuite et éventuellement une explosion. Généralement, pour les canalisations, on distingue les défauts suivants: les cratères de corrosion, les fissures, les enfoncements, les éraflures et le défaut dit combiner (enfoncement + éraflures).



Figure III.2.Éclatement d'un pipeline [47]



Figure III.2.1. Rupture d'un pipeline [47]



Figure III.2.3 Éclatement d'un pipeline [46]



Figure III.2.4.l'effet sur environnement [46]

III.2.1. Les fissures :

Au cours des dix dernières années, plusieurs études ont été réalisées dans le domaine d'évaluation et de contrôle de la nocivité des défauts de surfaces dans les pipelines [9]. Ces

défauts de surface résultent par exemple dans : la corrosion, les endommagements causés par des agressions de forces externes ou aussi les défauts de soudures et sont assimilés à des fissures semi elliptiques par conservatisme. Les canalisations sont le plus souvent assemblées à partir de la jonction de tubes d'acier soudés. Ces tubes sont roulés et soudés spiral en usine, par contre les soudures bout à bout (soudure de rabouillage) sont réalisées sur chantier (voir figure III.3).

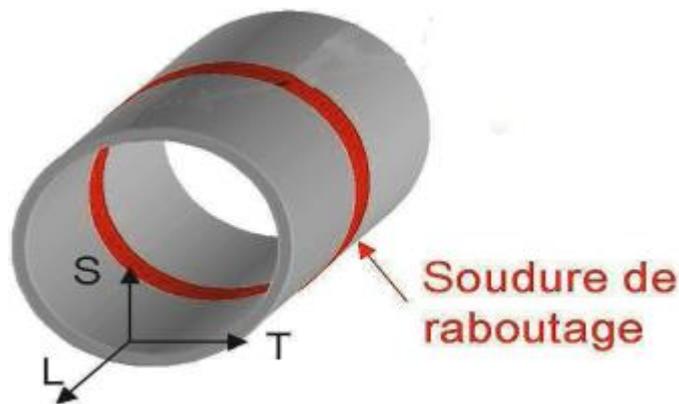


Figure III.3.Soudure de rabouillage dans une canalisation

L : sens long du tube

T : sens travers tube

S : épaisseur du tube

Les soudures spirales réalisées lors du formage du tube en usine sont considérées comme moins critiques vis-à-vis de la rupture de la canalisation, car elles sont contrôlées avant de transférer les tubes sur chantier. Par contre, les soudures réalisées sur chantier (soudage bout à bout) peuvent présenter des fissures car elles sont parfois réalisées dans des conditions difficiles. De plus, elles ne sont pas forcément contrôlées.

Les défauts rencontrés dans les joints soudés sont généralement assimilés à des fissures, comme celles résultant d'un manque de pénétration de la matière (voir figure III.3.1). [41].

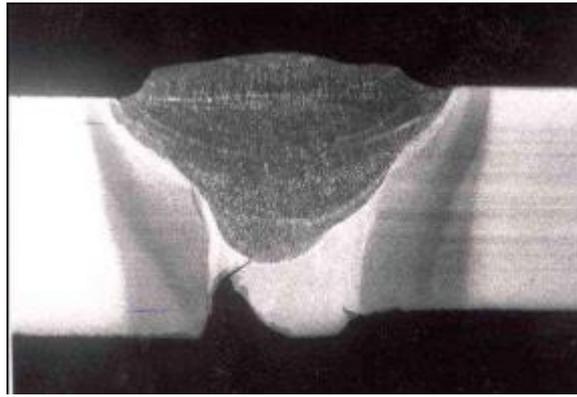


Figure III.3.1.Fissure dans des joints soudés

III.2.2. Les éraflures :

Lors des opérations de maintenance des tuyaux, il arrive que par maladresse ou négligence ou par défaut de précautions, le tuyau soit soumis à des agressions mécaniques.

Lorsque les personnes intervenant sur chantier n'arrivent pas à localiser le tuyau enterré avec suffisamment de précision, il arrive fréquemment que le tuyau soit soumis à un choc provoqué par un outil (coup de pic par exemple) ou un engin de chantier (choc d'une dent de godet par exemple, voir figure III.4)

La plupart du temps, l'incident passe inaperçu ou n'est pas signalé tout simplement.

Une éraflure est un endommagement superficiel de la surface dû à un contact avec un objet étranger qui provoque un enlèvement de matière (figure III.4). Cette éraflure peut être considérée comme une entaille. Les dimensions d'une éraflure sont définies de façon que la longueur soit plus grande que la largeur [41].

Le choc causé par l'agression externe peut néanmoins provoquer de graves endommagements au tuyau. En service, l'action de la pression pourra provoquer une rupture localisée qui provoquera elle-même une fuite et éventuellement une explosion.

Un exemple récent de grave accident résultant de ce processus a eu lieu en Belgique en été 2004 (voir figure III.4).



Figure III.4. Une éraflure

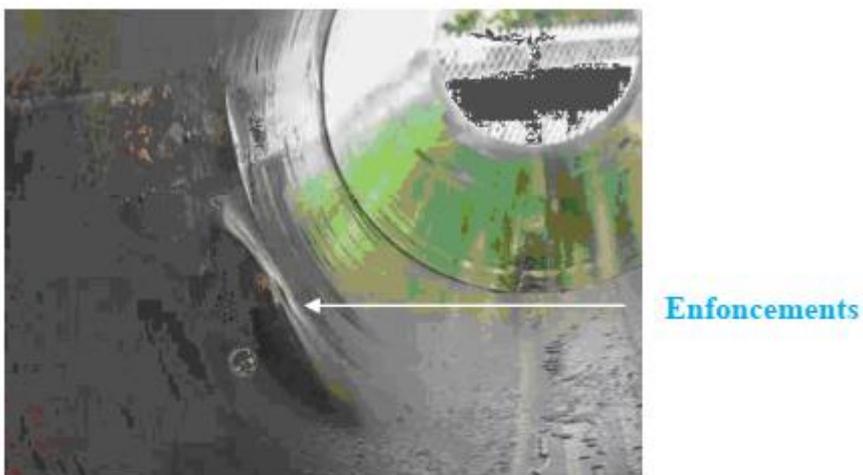


Figure III.5. Photo d'un pipeline enfoncé

Un enfoncement provoque une concentration locale de contrainte et de déformation et une réduction locale du diamètre du tuyau.

III.2.3.1. Les défauts combinés (enfoncements + éraflures) :

Un enfoncement est une déformation plastique permanente de la section du pipeline dû à un contact avec un corps étranger (agression externe), ce même contact peut aussi provoquer un enlèvement de la matière. Dans ce cas, on se retrouve dans une situation où on a un défaut combiné (enfoncement + éraflure, voir figure III.6). Ce type de défaut est très compliqué car il implique des non linéarités géométriques et matérielles. [41].



Figure III.6. Photo d'une éraflure dans un enfoncement

La présence d'un défaut tel qu'un enfoncement + éraflure dans une canalisation est très dangereuse. En effet, en plus de la concentration de contraintes provoquée par l'agression externe, il y a aussi une réduction de l'épaisseur du pipeline due à la présence de l'éraflure. En conséquence, on constate une diminution locale de la résistance mécanique de la canalisation.

III.3. Corrosion des aciers

On désigne sous le nom de corrosion métallique tout processus de dégradation de métaux et alliage faisant intervenir, ou moins partiellement, la composition chimique de leur environnement.

La corrosion métallique ramène métaux et alliages à leur état naturel d'oxydes ou de minerais, elle est donc le résultat de la présence simultanée de deux acteurs, le métal et le milieu corrosif.

A partir du moment où il contient de l'eau, l'environnement devient un milieu corrosif, dit «électrolyte», ce milieu est bien entendu, l'eau elle-même, qui contient certaine quantité d'espèces chimiques dissoutes ou en suspension, mais il y a aussi les sols qui contiennent plus ou moins de l'humidité.

La corrosion chimique est le résultat de réaction électrochimique, dont les particules proviennent d'une électrode métallique et d'un électrolyte qui réagissent au contact l'un de l'autre. Ces réactions, à l'interface de la phase métallique et la phase aqueuse, mettent en jeu à la fois les électrons du métal et certains éléments chimiques neutres ou ionisés contenus dans la solution. [41]

Généralement la corrosion est très présente sur les canalisations métalliques, elle conduit à une diminution de l'épaisseur des canalisations dans les zones affectées comme la montre la figure (II.7.2)

III.3.1.Types de corrosion :

Dun point de vue général et macroscopique, il existe deux types de corrosion :

- La corrosion uniforme ou généralisée.
- La corrosion localisée.

Le premier type affectant la totalité de la structure du métal.

La corrosion localisée est plus dangereuse car les dégâts quelle provoque en profondeur diminué fortement la résistance du métal en général ce type de corrosion ce manifeste sur les matériaux qui présente une hétérogénéité sur leur surface.

III.3.1.2.Corrosion électrochimique

Le mécanisme du processus de corrosion électrochimique et étroitement lié d'une part à la structure de métal et d'autre part à la structure de la solution (la solution est caractérisée par le pH, il s'agit du milieu acide, basique ou neutre). La solution est caractérisée par la circulation (formation) de courant électrique, c'est-à-dire par le déplacement d'électrons au sein de la masse métallique et par le déplacement des ions positifs et négatifs au sein de l'électrolyte.

III.3.1.3.Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûre se développe localement en formant une pile galvanique de corrosion entre la surface extérieure, passive et cathodique, et l'intérieur de la piqûre, actif et anodique (voir figure (III.7.1)) entraînant une Cavite qui peut rapidement devenir profonde bien qu'une petite quantité de métal se dissolvé globalement.

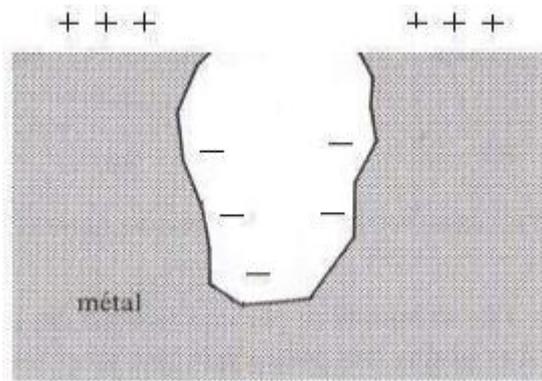


Figure. III.7.1 : Pile galvanique de corrosion : + Cathode,- Anode.

III.3.1.4. Corrosion par aération différentielle

Elle est de nature électrochimique est due à une différence importante de concentration d'oxygène locale du milieu d'où formation de pile dite pile D'EVANS, cas de gouttes d'eau salie a la surface d'une tôle de fer parfaitement propre.

III.3.1.5. Corrosion galvanique

C'est, en générale, lorsque deux métaux différents sont en contact ou reliés électriquement dans un milieu corrosif aqueux. La corrosion s'établit sur le métal le moins noble et s'arrête sur le métal le plus noble. Les sites anodiques et cathodiques sont distincts. Mais elle se manifeste aussi lorsque les deux parties d'un objet métallique d'un même métal ne sont plus au même potentiel à cause d'une hétérogénéité ou à cause d'un âge différent.

III.3.1.6. Corrosion sélective

C'est elle dont l'attaque se produit préférentiellement sur un des éléments de l'alliage, la signification des alliages cuivre-zinc et le cas le plus typique. Cette corrosion peut être éliminée par la protection cathodique.

III.3.1.7. Corrosion biologique

Si l'on met un matériau en présence d'oxygène et de bactéries anaérobie, il y a une réaction qui se forme avec le soufre, donnant des sulfures provoquant une violente attaque encore accrue par les phénomènes électrochimiques.

III.3.1.8. Des exemples de la corrosion interne et externe :

La corrosion des pipelines de pétrole et de gaz est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol,

l'atmosphère, l'eau ou d'autres Fluides. Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe.

La figure suivante présente des exemples de la corrosion interne et externe.

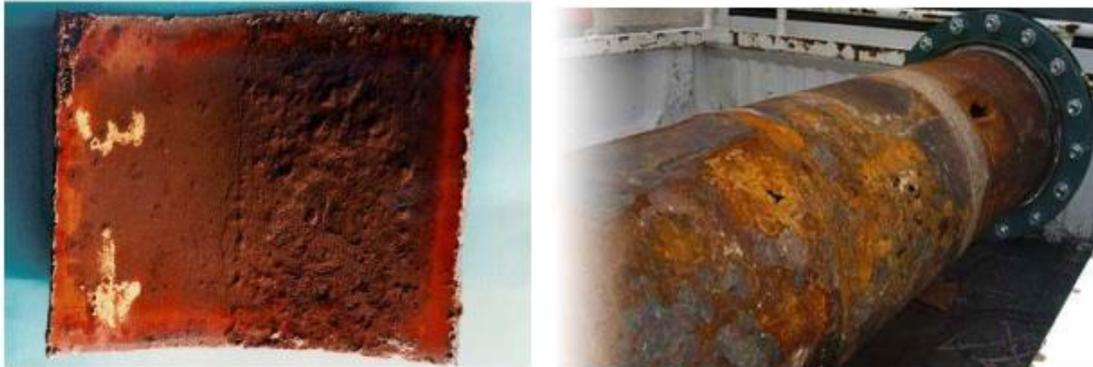


Figure III.7.2. Corrosion dans la pipe. (a) : interne, (b) : externe. [42]



Figure III.7.2. Corrosion par piqure



Figure III.7.3. Déformation



Figure III.7.4. Corrosion généralisée

III.4. Protection anticorrosion par l'application de revêtements

III. 4.1. Notions de protection cathodique

Dès lors que le revêtement ne joue plus son rôle de barrière, le métal peut se trouver en situation de corrosion car il est au contact d'eau et de produits potentiellement corrosifs. Le principe de la protection cathodique (PC) est de porter le métal à un potentiel inférieur afin de réduire significativement la vitesse de la réaction anodique, donc la corrosion. Deux techniques sont employées pour fournir ces courants de protection cathodique. La PC par anode sacrificielle consiste à placer la structure à protéger en contact électrique avec une masse métallique, moins noble que l'acier, et de créer ainsi un couplage galvanique favorable à la dissolution de celle-ci au profit de la structure à protéger. La PC par courant imposé utilise un générateur de courant (ou de tension) entre la structure à protéger et un "déversoir".

Le potentiel de la canalisation est alors abaissé dans le domaine dit d'immunité. [10]

III.4.2. Protection par des revêtements organiques

L'intérêt de protéger les canalisations à l'aide de revêtements organiques est double. En effet, les processus de corrosion font intervenir l'eau en tant qu'électrolyte, et divers oxydants susceptibles de capter les électrons libérés par l'oxydation du métal.

Le rôle du revêtement est donc de limiter le flux de ces produits en créant une barrière physique. Ces revêtements épais (quelques millimètres) ont par ailleurs une fonction de protection mécanique du tube lors du remblai des fouilles, bien que ce ne soit pas leur rôle principal. Cette protection n'est cependant pas totalement efficace car l'expérience a montré la majorité des défauts de revêtement constatés sur les canalisations a été créé par des pierres tombées sur le tube ou ayant poinçonné le revêtement.

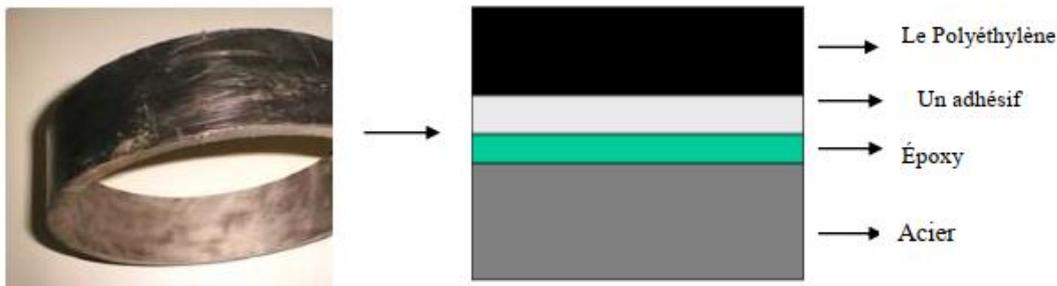


Figure III.7.5.L'assemblage tri-couche [43]

L'assemblage se compose de trois polymères différents, déposés sur la canalisation en acier.

Tout d'abord, une fine couche d'époxy (Ep), d'épaisseur moyenne 150 μm , recouvre la canalisation en acier.

Puis, avant réticulation totale de cette couche, les deux autres polymères sont successivement extrudés :

Un adhésif : l'Éthylène Butyl Acrylate (EBA) d'épaisseur moyenne 300 μm ,

Un revêtement épais : Haute Densité (PEHD), d'épaisseur moyenne 3mm.

Ces deux couches externes (PEHD et EBA) appartiennent à la classe des thermoplastiques : Le PEHD forme le revêtement épais protecteur, tandis que l'EBA, associé à des fonctions permet un collage intermédiaire entre matériaux.

III.4.3. Vieillessement et dégradation

Les revêtements hydrocarbonés sont susceptibles de perdre leurs propriétés d'isolant électrique et de barrière physico-chimique selon plusieurs mécanismes.

Ces modes de vieillissement sont principalement, une dégradation des propriétés intrinsèques du matériau ou une décohésion des interfaces matériau/métal.

Généralement, les techniques de vieillissement des revêtements polymères en milieu normalement oxygéné sont basées sur une élévation de la température, principe d'équivalence temps-température, ou sur une exposition à un rayonnement UV, en milieu souvent inerte par ailleurs.

D'une manière générale, nous pouvons différencier deux phénomènes pouvant induire une dégradation des propriétés physico-chimiques des matériaux constitutifs, et par

conséquent du revêtement lui-même. Le premier est un vieillissement physique dû à l'absorption d'eau pouvant entraîner un gonflement et des contraintes mécaniques internes fragilisant l'interface acier/revêtement. Le second est un vieillissement chimique dû à des réactions entre des molécules de polymère et d'eau entraînant une hydrolyse des chaînes moléculaires.

Généralement, ces deux phénomènes sont supposés être thermo activés (dans les limites de respect des propriétés physiques du matériau). [44]

III.4.4. Influence de l'eau sur l'adhésion des revêtements

Plusieurs travaux de recherche ont été conduits pour déterminer le rôle de l'eau dans la dégradation de la liaison adhésive entre les revêtements PE tri-couches et le métal. Bien que les matériaux étudiés dans ce travail soient différents, il est intéressant de constater qu'en présence de défauts de revêtement débouchant les phénomènes de pénétration de l'eau se font principalement aux interfaces métal/primaire et/ou primaire/revêtement. En conséquence, c'est la diffusion de l'eau aux interfaces qui contrôle les phénomènes de décollement au voisinage des défauts, et non la diffusion de l'eau dans le matériau lui-même.

III.4.5. Origine des décollements

Les décollements de revêtement sont majoritairement dus à la pénétration d'eau et d'oxygène à travers les revêtements, qui, au contact du métal, peuvent dégrader la liaison métal/revêtement suivant deux grandes familles de mécanismes possibles. On notera qu'il existe des différences entre les revêtements minces, de type peinture ou vernis, et les revêtements épais.

Le premier mécanisme est appelé décollement cathodique, car il est une des conséquences de la présence des courants de PC et touche les deux types de revêtements.

Le second, concernant plus particulièrement les revêtements minces au droit des porosités débouchant sur le métal, est dû à la formation de couches d'oxydes, qui en croissant dégradent mécaniquement l'interface métal/revêtement.

III.4.6. Influence des défauts de revêtement

Les revêtements que nous étudions sont intrinsèquement peu sensibles au vieillissement, et conservent des propriétés anticorrosion suffisantes pour continuer à assurer leur rôle. Les

risques de corrosion sont donc majoritairement liés à des défauts de revêtement créés à la pose.

Le système global de protection est, comme nous l'avons précisé au par avant, aussi assuré par la protection cathodique, qui est censée palier les imperfections des revêtements. Nous présenterons dans ce paragraphe les différentes situations de défauts qui peuvent être rencontrés, et leurs conséquences en termes de risque de corrosion.

III.5. Différents types de défauts précurseurs de la rupture des Canalisations revêtus :

III.5.1. Nomenclature des défauts

Différents types de défauts de revêtement sont observés sur les canalisations. Leurs origines et conséquences sont diverses, et peuvent dans certains cas conduire à une corrosion :

III.5.2. Porosité:

Le matériau du revêtement présente une porosité intrinsèque qui permet l'arrivée d'éléments potentiellement corrosifs à la surface du métal, (eau, oxygène, CO₂,...)[44]

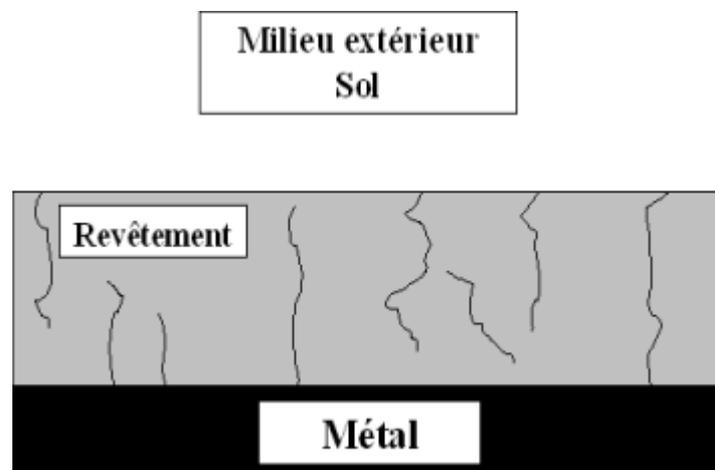


Figure III.8. Schéma d'un revêtement présentant des porosités.

III.5.3. Défaut ouvert :

Ce type de défaut est une lacune de revêtement, mettant le métal directement en contact avec le milieu électrolytique. La protection cathodique dans ces conditions sera efficace tant qu'il y aura continuité électrique. On pourra distinguer pour ce type de défaut une taille "critique", et dépendante de la conductivité du milieu extérieur, en dessous de laquelle les

courants de protection ne seront plus efficaces car la résistance intrinsèque du défaut sera trop importante,

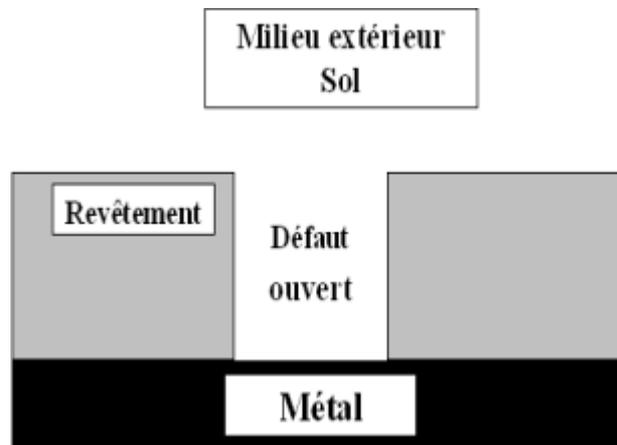


Figure III.8.1. Schéma d'un revêtement présentant un défaut ouvert sans décollement

III.5.4. Défaut avec écran :

Un obstacle non conducteur, typiquement une pierre, a créé le défaut et reste enfiché dans le revêtement. L'espace libre entre la pierre et le revêtement peut entraîner une chute ohmique empêchant les courants de PC de protéger le métal (effet d'écran) mais laisser passer des produits potentiellement corrosifs (oxygène, eau,...). Il peut aussi se créer une pile d'aération différentielle entre le point de contact de la pierre (anodique) et la partie au contact de l'électrolyte aéré(cathodique),

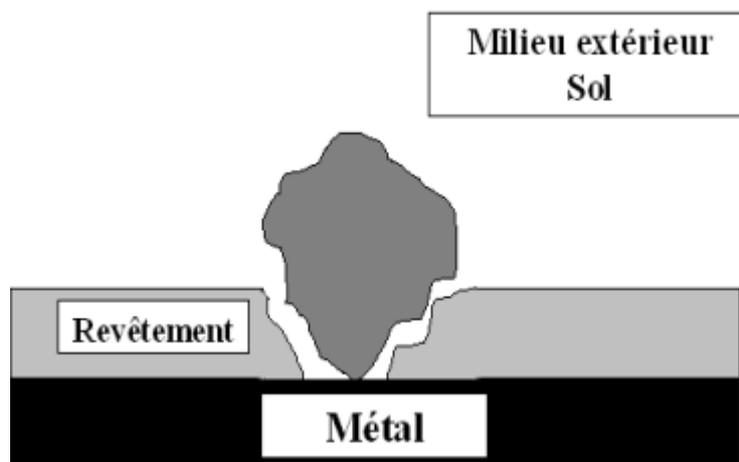


Figure III.8.2. : Schéma d'un revêtement présentant un défaut avec écran

III.5.5. Défaut ouvert avec décollement du revêtement:

Souvent conséquence d'un vieillissement d'un trou existant, ou résultant d'un défaut d'application. On parlera de trou "unique débouchant" dans le cas d'un décollement présentant

une seule ouverture sur le milieu extérieur. Les paramètres influents dans cette configuration sont la taille du défaut, la hauteur de l'interstice entre le métal et le revêtement, et la surface de métal mis à nu. [45]

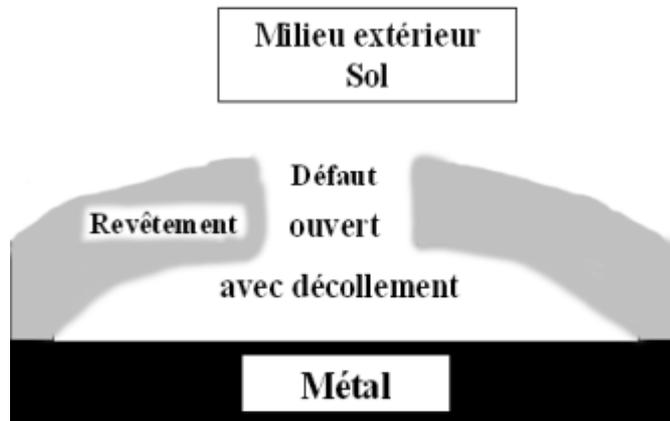


Figure III.8.3. Schéma d'un revêtement présentant un défaut ouvert avec décollement

III.5.6. Fluage du revêtement :

Ce type de défaut est plus particulièrement observé sur des tubes de grand diamètre, et est un cas particulier de décollement. Il semblerait que le fluage s'amorce dès la pose du revêtement, lorsque la préparation du métal n'a pas été appropriée, mais surtout lorsque le tube est resté exposé à la chaleur avant d'être enfoui. Il est maintenant admis que l'élévation de la température du revêtement, le plus souvent lors des opérations de pose, est responsable de ce phénomène. On constate parfois une absence totale de revêtement sur une bande de quelques centimètres de largeur sur le haut du tube (à 12 heures) due au fluage.

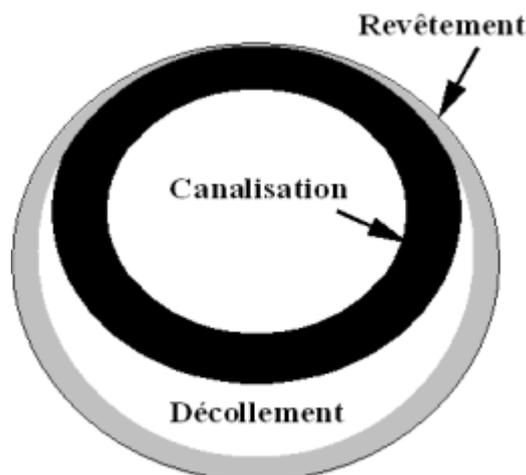


Figure III.8.4. Schéma d'une canalisation dont le revêtement a flué sous son propre poids.

III.5.7. Défauts ouverts communicants :

Plusieurs défauts ouverts proches les uns des autres peuvent finir par communiquer en raison du décollement du revêtement. Une circulation d'électrolyte peut alors s'instaurer. Ce cas fera l'objet du chapitre 4 de cette étude.

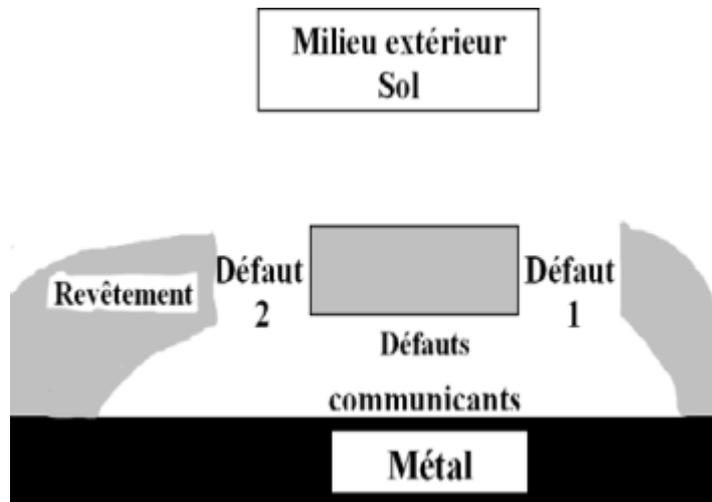


Figure III.8.5. Schéma de d'un revêtement présentant deux défauts communicants

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

IV. Résultats Expérimentaux Et Discussion

Le but recherché est d'estimer en priorité la sensibilité des soudures vis-à-vis des réparations successives en fonction des informations recueillies par les méthodes expérimentales suivantes :

- L'analyse des compositions chimiques de chaque échantillon.
- Etudes métallographique
- Calcule de taille des grains et la fréquence des structures.
- Les essais de traction et de pliage
- Essais de résilience.
- Essais de dureté Vickers HV

IV.1. Analyse chimiques :

La composition chimique est obtenue par analyse spectrométrique du métal de base.

Ces résultats sont regroupés dans le tableau (1).

Tableau IV(1) : [47]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Sn	Cu	Nb	Ti	V	PCM (CE)
Exigence de la composition chimique pour le grade API X70	0,12	0,45	0,170	0,025	0,015	0,300	0,300	0,100	0,050	0,010	0,250	0,060	0,060	0,100	0,20
Composition chimique du métal de base	0,07	0,35	0,158	0,00	0,003	0,041	0,032	0,009	0,046	0,001	0,022	0,057	0,004	0,080	0,18

On remarque que le résultat d'analyse chimique sur le métal de base de notre acier se concorde très bien avec l'exigence de la norme API 5L. donc nous somme devant un acier HLE de grade X70.

IV.2. Etudes métallographiques

IV.2.1. Macrographies

Les observations macroscopiques permettent d'avoir des macrographies (Figures 1.2.3.4) qui révèlent les différentes zones du joint soudé. Nous avons procédé à un agrandissement de quatre fois et demi pour une meilleure lisibilité.

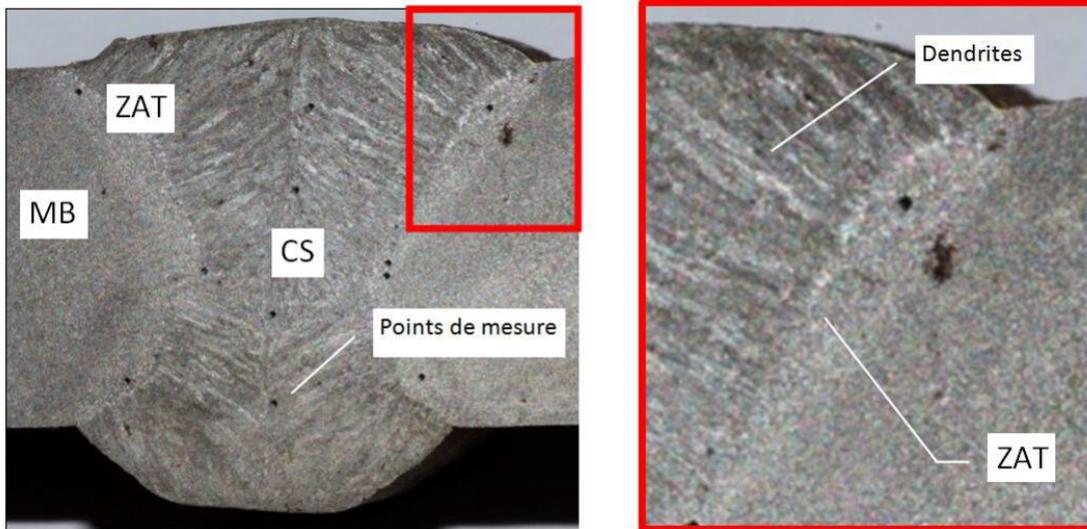


Figure IV.1: macrographie de la soudure automatique[47]

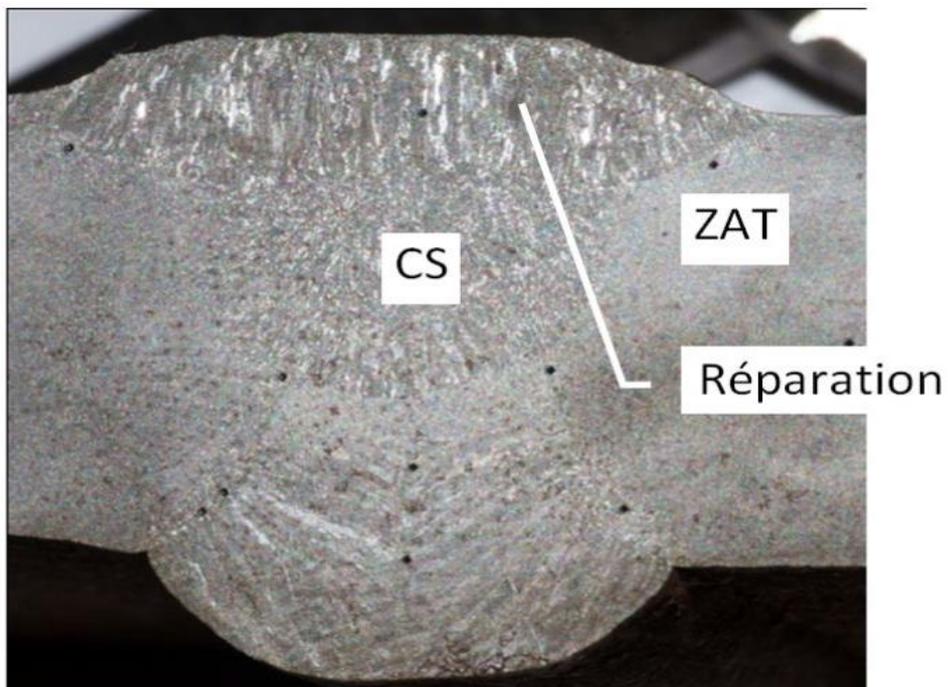


Figure IV.2 : macrographie de la soudure avec une 1ère réparation (R1) [47]



Figure IV.3 : macrographie de la soudure
une 2ème réparation (R2) [47]



Figure IV.4 : macrographie de la soudure
avec une 3ème réparation (R3) [47]

IV.2.1.1. Observations sur les macrographies

L'observation des macrographies permet de faire le point sur l'évolution de l'étendue de la ZAT et de la zone fondue en prenant comme référence la soudure initiale (automatique). C'est ainsi que l'on constate que l'étendue des différentes zones croît au fur et à mesure que l'échantillon subit des réparations successives.

Sur la figure III.1, qui correspond à la soudure automatique de la machine, on observe clairement les différentes zones de la partie soudée du pipeline. On observe également l'orientation des dendrites qui nous indiquent le sens du gradient de température. On peut également discerner la ZAT qui procède une largeur bien définie par des frontières franches avec les deux autres zones (métal de base et métal d'apport).

La figure III.2 montre les effets de la première réparation sur la soudure initiale. Le remplissage de la réparation présente des dendrites orientées vers le métal, ce qui renseigne sur le gradient de température. On remarque que la ZAT semble plus large mais diffuse. Le cordon de soudure en contact avec la réparation, a perdu son aspect caractérisé par les dendrites de départ.

Les mêmes observations faites pour le cas précédent, restent valables pour la deuxième et la troisième réparation. La figure III.3, III.4, qui correspond à la troisième réparation présente une bonne illustration de la ZAT. Comparée à celle de la soudure automatique, on note clairement l'élargissement de la bande de la ZAT, contrairement aux images précédentes, ce qui peut être attribué à la qualité des surfaces et/ ou de l'image.

IV.2.2. Micrographies

Des micrographies représentatives prises dans les différentes zones du cordon de soudure d'une part verticalement, et horizontalement d'autre part sont présentées ci-dessous ; les micrographies à différents grossissements de toutes les réparations sont présentées ci-dessous :



FigureIV.5: microstructure du métal de base acier API X70 G=X500[47]

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion



Figure IV.6: microstructure de la ZAT (soudure Automatique)
G=X500



Figure IV.7: microstructure de la ZF (soudure Automatique)
G= X500



Figure IV.8: microstructure de la ZAT (Première réparation)
G=X500



Figure IV.9: microstructure de la ZF (Première réparation)
G=X500



Figure IV.10: microstructure de la ZAT (deuxième réparation)
G=X500



Figure IV.11: microstructure de la ZF (deuxième réparation)
G=X500



Figure IV.12: microstructure de la ZAT
(troisième réparation)

G=X500

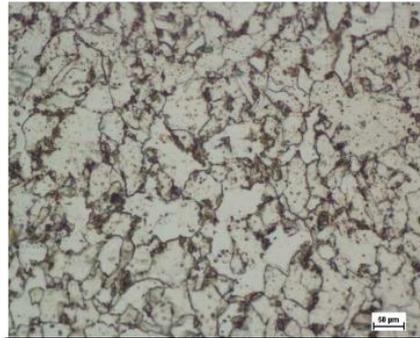


Figure IV.13 microstructure de la ZF
(troisième réparation)

G=X500

IV.2.3. Evolution de la structure

Le métal de base présente une structure alternée de ferrite et de perlite caractéristique des bandes de laminage (voir figure 5). La forme de la ferrite est globulaire de même que celle de la perlite ; notre équipement ne nous a malheureusement pas permis d'observer les lamelles de ferrite et de cémentite.

On constate que la structure change graduellement au fur et à mesure que l'on se rapproche de la ZAT ; on observe ainsi :

- * une destruction progressive des bandes de laminage
- * un affinement de plus en plus important du grain

Le fait de réparer (c'est à dire meuler et ressouder) fait apparaître un phénomène de dédoublement de la ZAT qui se distingue par une différenciation dans la grosseur des grains avec une nette discontinuité aux frontières, les plus fins se trouvant dans la partie de la ZAT située du côté de la zone fondue ; dans chaque partie de cette ZAT l'uniformité de la grosseur des grains est très remarquable. Ce phénomène vient du fait que lors de la préparation du cordon pour la réparation la zone fondue initialement n'a pas été entièrement éliminée et donc l'effet des cycles successifs de chauffage et de refroidissement conduit à la formation de plusieurs zones affectées thermiquement sur une étendue du métal de plus en plus large à mesure que le nombre de réparations augmente avec des frontières de moins en moins nettes.

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

IV.2.4. Mesure de la taille du grain et calcule de la fraction des phases :

Tableau IV.2 : Mesure de la taille du grain et calcule de la fraction des phases[47]

			Taille de grain (μm)	Fraction de la phase (%)
S auto	M B	Ferrite	7,9	83
		perlite	9,3	17
	Z A T	Ferrite	10,7	33
		perlite	9,8	67
	Z F	Ferrite	9,0	58
		perlite	9,2	42
R1	M B	Ferrite	7,4	83
		perlite	9,1	17
	Z A T	Ferrite	10,7	53
		perlite	10,8	47
	Z F	Ferrite	9,2	69
		perlite	9,2	31
R2	M B	Ferrite	7,2	83
		perlite	9,0	17
	Z A T	Ferrite	11,5	48
		perlite	11,1	52
	Z F	Ferrite	11,2	51
		perlite	10,9	49
R3	M B	Ferrite	7,6	83
		perlite	8,9	17
	Z A T	Ferrite	15,2	55
		perlite	15,3	45
	Z F	Ferrite	11,1	50
		perlite	10,2	50

Comparaison: Nous remarquons que la taille des grains de la ferrite et perlite sont très proches l'une de l'autre dans les différentes zones (MB, ZAT, ZF) surtout dans la ZAT. Mais cela n'est pas de même dans la fraction des phases car pour la ferrite et la perlite on distingue une nette différence des proportions dans chaque zone du matériau et pour chaque soudure Auto.

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

(S1.S2.S3).et plus la taille des grains est grande plus la fraction des phases de celle ci devient plus petite

IV.3. Analyse des caractéristiques mécaniques

IV.3.1. Essais de traction

Les différentes courbes de traction ont une allure de courbe de traction typique des aciers et ce mis à part celle de la troisième réparation. Du point de vue de la norme et vu que cette dernière accorde une importance toute particulière à la contrainte de rupture quant aux critères d'acceptation, que ce soit pour la soudure initiale ou même pour les deux premières réparations, les contraintes de rupture restent supérieures à celles préconisées par la spécification ASME et sont par conséquent satisfaisantes (voir tableau III.3). Acceptable par rapport à ce qui est donné par la spécification : $\sigma_{min} : 485 \text{ Mpa}$

Les observations et remarques suscitées ne sont pas du tout valables pour la troisième réparation, la contrainte maximale de rupture est inférieure au minimum préconisé par la spécification (500 MPa contre 570MPa)

D'un point de vue purement mécanique une troisième réparation est à éviter pour les tubes de nuance X70 ; on serait tenté de vouloir généraliser ces observations aux aciers HLE.

Et d'un point vue métallurgique on remarque que la rupture après essai de traction elle s'effectue dans le métal de base pour les éprouvettes (S, R1, R2) et pour R3 elle s'effectue dans la ZAT. Voir (figure IV.14). D'après la morphologie de la rupture on a remarqué deux types de rupture ; rupture ductile avec la présence de striction pour les éprouvettes (S, R1, R2) et rupture fragile pour R3



Figure IV.14 : rupture d'éprouvette de traction[47]

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

Tab III.3 : Caractéristiques de l'essai de traction des éprouvettes étudiées. [47]

	E (MPa) 10^5	$\sigma_{t0.5}$ MPa	σ_m MPa (MB)	σ_m MPa	A%
		Min=485 Max=635	Min=570 Max=760	Min=570 Max=760	Min=22%
S		529	664	716	36,7
R1		489	-	715	36,3
R2		490	-	676	35,7
R3		476	-	500	33.3

IV.3.2. Essais de pliage

L'essai de pliage à été effectué sur 02 éprouvettes (endroit et envers) voir (figure IV.15). Toutes les éprouvettes ont réagi positivement à l'essai, sans aucun signe de fissuration ni dans le joint ni dans la zone de liaison.

La bonne tenue à l'essai de pliage nous informe sur la bonne qualité du soudage et du comportement de l'assemblage en compression.



Figure IV.15: éprouvette de Pliage [47]

IV.3.3. Essais de résilience

On réalisé l'essai de résilience uniquement pour l'échantillon soudé automatiquement et les échantillons réparé 3 fois (R3)

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

a. pour l'éprouvette S, La variation d'énergie de rupture (Energie absorbé par l'éprouvette) dans les trois zones est très importante, la valeur moyenne la plus importante est obtenue dans la zone fondu ZF, suivi de celle du métal de base MB, puis de celle de la ZAT.

b. Pour l'éprouvette R3 la variation d'énergie prend la même allure que l'éprouvette S.

c. Si on compare les résultats obtenus on remarque une chute d'énergie entre les différents zone de deux éprouvettes surtout dans la ZAT où on remarque une chute brutale de l'énergie après la troisième réparation ce qui est confirmé par l'essai de traction. On conclut que notre matériaux perd ces propriétés de ductilités. Voir (figure IV.16).

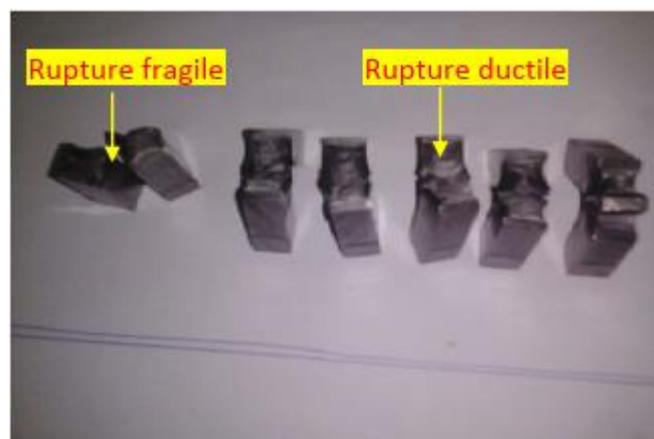


Figure IV.16: éprouvette de résilience[47]

	MB	ZAT	ZF
S	345	336	350
R3	336	246	328

S: variation d'énergie de rupture (Energie absorbé par l'éprouvette)

IV.4. Résultats des essais de dureté

Après avoir effectué des filiations de dureté sur les sections transversales des soudures, conformément à la norme API 5L, On constate une variation de la dureté dans les différentes zones du joint soudé (Zone fondue, Zone affectée thermiquement et métal de base) et ce pour toutes les soudures (initiales et réparées). La dureté dans la ZAT est élevée par rapport au M.B à cause de la forte densité de joints de grains, due au processus de l'affinement du grain dans cette région, provoqué par la succession des cycles thermiques répétitifs de soudage.

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

La partie centrale de la zone fondue est caractérisée par une dureté relativement faible comparée aux faces inférieure et supérieure du cordon correspondant respectivement aux passes de fond et de finition de la soudure. Cette constatation a pu être confirmée par une filiation de micro duretés effectuée dans le sens de l'épaisseur dans l'axe de symétrie du cordon (ZF) et peut être expliquée par l'effet du soudage multi passe où les passes antérieures subissent un adoucissement de la structure (dureté faible) en excluant bien entendu la passe de fond qui subit une trempe à l'air, de ce comportement. Ce phénomène est similaire à celui observé dans l'essai. Jominy où la dureté au cœur de l'échantillon traité est inférieure à celle relevée à son extrémité.

La mesure de la dureté est effectuée sur chaque point de mesure. Ces valeurs nous permettent de tracer le profil de la dureté en fonction des différentes zones, figure III.14 . Par rapport à la série Auto, les réparations présentent plus de dispersion, localisée au niveau de la ZAT et du cordon de soudure.

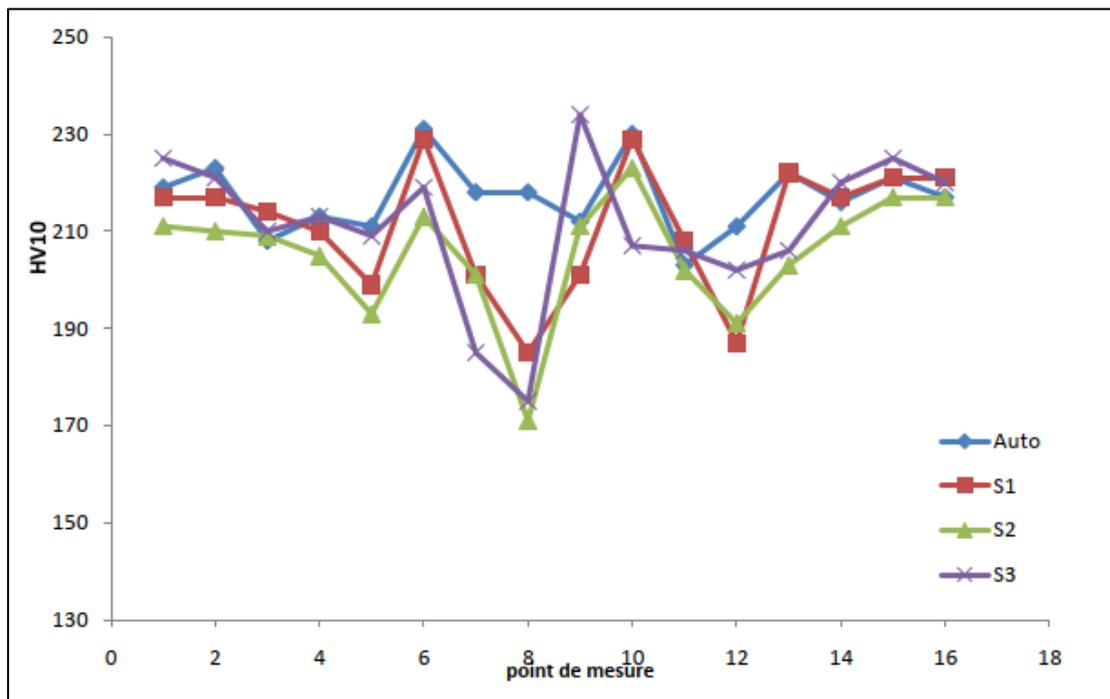


Figure IV.17 : Profil de la dureté des différentes séries[47]

L'histogramme de la moyenne, montre clairement l'effet de la réparation sur la moyenne arithmétique des mesures de la dureté. La valeur initiale (soudure auto) est nettement supérieure à celles des différentes réparations. D'une réparation à une autre, la moyenne fluctue, mais d'un autre côté, en corrélation avec l'histogramme de l'écart type, qui

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

augmente d'une réparation à une autre, la dispersion grandissante peut l'expliquer, (figure III.15).

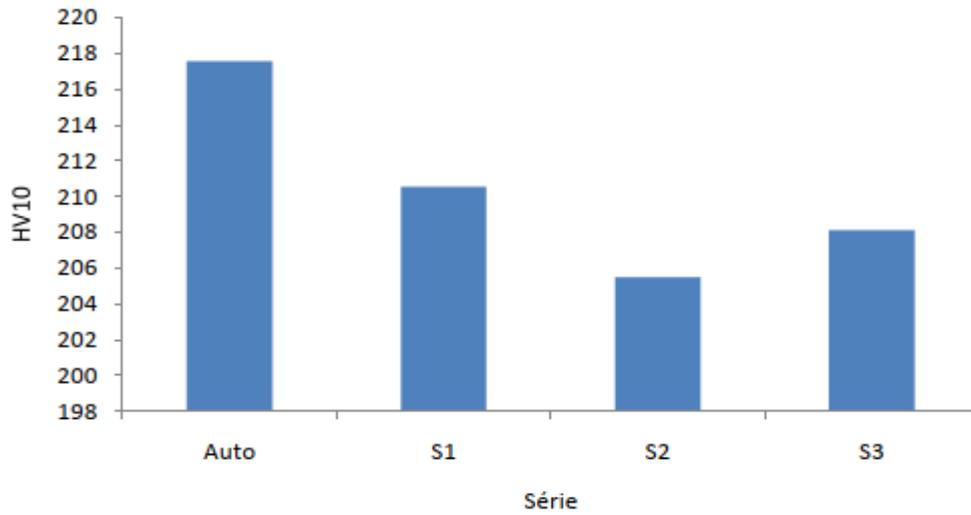


Figure IV.18: Histogramme de la moyenne de la dureté des éprouvettes [47]

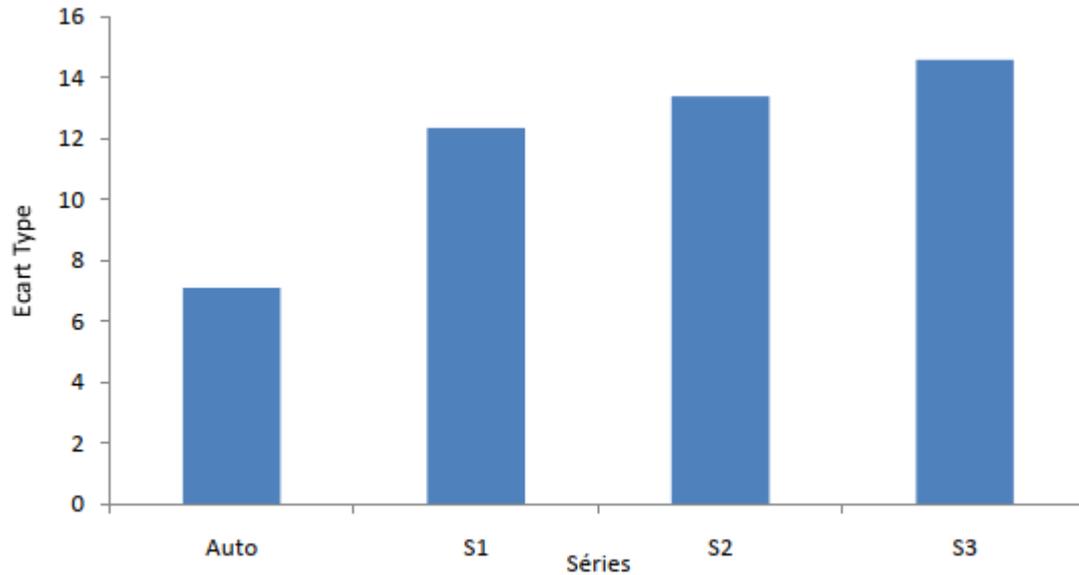


Figure IV.19: Histogramme de l'écart type de la dureté des éprouvettes [47]

Le coefficient de variation est un bon indicateur qui permet de :

* Apprécier la représentativité de la moyenne arithmétique \bar{x} par rapport à l'ensemble des données.

CHAPITRE IV : Résultats Expérimentaux et Discussion

*Apprécier l'homogénéité de la distribution, une valeur du coefficient de variation inférieure à 15 % traduit une bonne homogénéité de la distribution.

*Comparer deux distributions, même si les données ne sont pas exprimées avec la même unité ou si les moyennes arithmétiques des deux séries sont très différentes.

Les valeurs du coefficient de variation corroborent les constatations déjà présentées pour la moyenne et l'écart type. Une valeur croissante traduit l'effet de la dispersion croissante sur les différentes valeurs de chaque échantillon. Tout fois les valeurs sont inférieures à 15 % ce qui dénote une bonne homogénéité de la distribution.

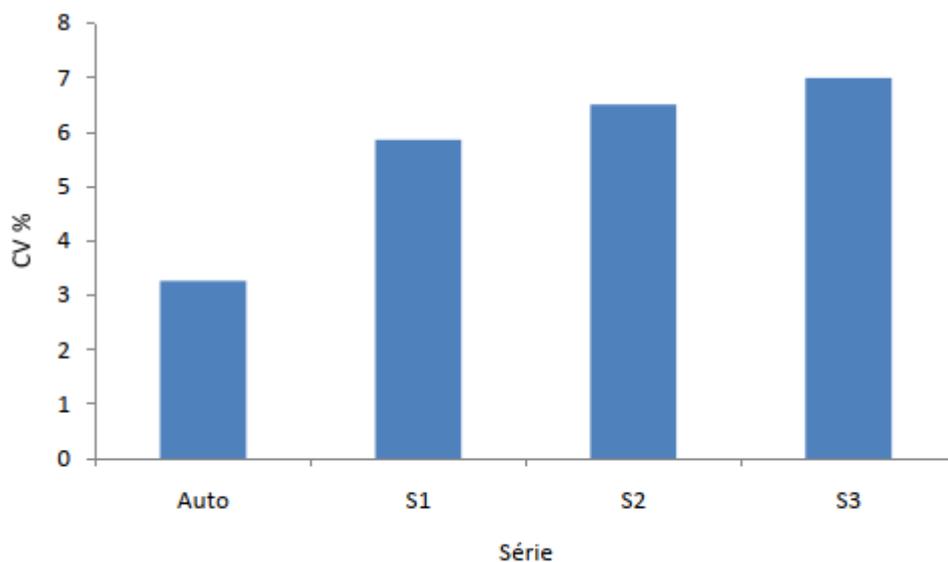


Figure IV.20: Histogramme de coefficient de variation [47]

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Les tests de traction sur des éprouvettes de métal de base et avec un joint de soudure, qui sont réalisées sur la machine MOHR FEDEHAF (ZWICK) UPD 60, au laboratoire ALFAPIPE, nous ont permis d'étudier les caractéristiques mécaniques du matériau en acier grade X70, ces résultats correspondant bien pour ce type de réalisation des tubes telle que mentionnée dans les normes Américaine API 5L, aussi ce matériau a une grande ductilité qui est représentée par la courbe de contrainte déformation, ce qui montre que cet acier a une grande déformation plastique et une bonne résistance.

Dans les essais de dureté, nous avons analysé la dureté dans la zone de la soudure, le prélèvement a été partagé en trois parties extérieures et intérieures du tube plus influencées au milieu de la paroi.

Dans la deuxième partie nous avons effectué sur la machine de l'essai de Charpy qui a la capacité maximale de 300J. Nous avons réalisés les essais de résiliences sur des éprouvettes normalisées du métal de base et avec un joint de soudure dans l'intervalle de la température au laboratoire ALFAPIPE pour mieux localiser les zones dans la courbe de résiliences nous remarquons que la seule zone obtenue est celle de la zone ductile, pour étudier la zone fragile il faut abaisser encore la température au-dessous de -20°C .

La seconde remarque que l'énergie absorbée par les éprouvettes de métal de base est supérieure par rapport à celles des éprouvettes avec soudure, et qui montre aussi que les éprouvettes de métal de base ont un faciès de rupture ductile à présent un aspect mat avec texture fibreuse.

Ce dernier nous permet de déduire la taille critique d'une fissure semi elliptique avec la plus grande température et la durée de vie si une fissure initiale existe sous la pression interne. Nous avons calculé la durée de vie de ce matériau.

Ce matériau possède une grande ductilité et bonne ténacité, ce qui convient pour les pipelines. Un bon recouvrement du tube, nous pouvons protéger la matière contre la corrosion et les pipelines peuvent jouer leurs rôles sous-marins.

Bibliographies

Références Bibliographiques

- [1] M.T. HANNACHI, "Etude du Comportement Mécanique des Joints Soudés lors du Soudage des Tubes par Induction à Haute Fréquence (HF) " , Université Hadj Lakhdar de Batna, 2011.
- [2] D.J NAYLOR "Review of international activity on micro alloyed engineering steels", Iron making and Steel Making 1989, vol 16, N° 4
- [3] B. Zouidja, "Caractérisation mécanique et microstructurale d'un cordon soudeure pour un acier X60 destiné à l'installation des hydrocarbures" , Université Amar Thelidji-Laghouat ,2012.
- [4] MARK GRUMBACH "Aciers d'usage général", techniques de l'ingénieur, 1991
- [5] Metals handbook Vol. 1 , " Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys" , ASM International, USA, 2005.
- [6] L.J. CUDDY "Grain Refinement of Nb Steels by Control of Recrystallization during Hot Rolling», Metallurgical Transactions A, vol 15A, January 1984
- [7] J.M. Gray , "Niobium bearing steels in pipeline projects, Niobium Science and Technology", Dec 2 &5, 2001.
- [8] F.B. PICKERING "The Spectrum of Micro alloyed, Hight Strength Low Alloy Steels", Proceeding of International Conférence on Technology and Application of HSLA Steels, october 1983
- [9] TADAAKITAIRA "Development of Super Tough Acicular Ferrite Steel for Line-pipe – Optimization of Carbon and Niobium Content in Low-Carbon Steel " , Proceeding of International Conférence on Technology and Application of HSLA Steels, october 1983
- [10] T.R. Thomson, R.M Hobbs , "Dual Phase Steels Production and Formability", Mémoires Scientifiques. Revue de métallurgie, avril 1980
- [11] J. Malcolm Gray , "Property Improvements in Bars and Forgings Through Microalloying and Inclusion Engineering", Proceeding of International Conférence on Technology and Application of HSLA Steels, october 1983
- [12] H.BENSAADI, M.CHERIER. " Étude de l'efficacité d'inhibition contre la corrosion, de l'acier API P110 avec différentes microstructures". Ecole Nationale Polytechnique ALGER (2015)

Bibliographies

- [13] S.DJERAF, "Etude comparative de l'influence du taux de déformation et de la température du recuit sur la microstructure et les propriétés mécaniques de deux aciers a haute limite d'élasticité (HLE) de type API», Ecole Nationale Polytechnique ALGER (2012).
- [14] D. Acevedo Reyes, "Évolution de l'état de précipitation au cours de l'austénitisation d'aciers microalliés au vanadium et au niobium ", Institut des sciences appliquées de Lyon (2007)
- [15] E.C. Bain, H.W. Paxton, "Les éléments d'addition dans l'acier", Dunod, Traduit par C.Leymonie, (1968)
- [16] M. Durand-Charre, "La microstructure des aciers et des fontes, Genèse et Interprétation" , (2003)
- [17] W.Wang, Andal, "Relation among rolling parameters, microstructures and mechanical properties in an acicular ferrite pipeline steel" , Materials and Design 30 (2009) 3436–3443.
- [18] François Leroy et Jean Saleil, "Les aciers spéciaux de construction mécanique", 1986
- [19] E. O. Hall, Proc. Roy. Soc, 64B, (1951), 747
- [20] N. J. Petch, Journ. Iron Steel Inst., 174, (1953), 28
- [21] J. R. Paules, Practical considerations in micro alloying with vanadium, niobium, or titanium", Proc of the Inter. Symp on Micro alloyed Vanadium Steels, Cracow, (1990), 19–32
- [22] Barry THOMAS, Jean-Hubert SCHMITT, "Durcissement des aciers", Technique de l'ingénieur M4 340.
- [23] Michalak, J. J, "The Influence of Temperature on the Development of Long-Range Internal Stress During the Plastic Deformation of High-Purity Iron", ActaMetall., Vol. 13(3), 213-222 (1965)
- [24] Smallman, R. E. and Bishop, R. J, "Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering", 6th ed. Butterworth- Heinmann, Oxford, Chap. 7, 233-234 (1999)
- [25] Michel Dupeux, " Aide-mémoire science des matériaux ", Dunod. Paris(2008).
- [26] Roland CAZES, "Soudage à l'arc", Technique de l'ingénieur B7 730.
- [27] Document technique ALFAPIPE GHARDAIA, "Procèdes de soudage".

Bibliographies

- [28] FORMATION MODULAIRE EN SOUDAGE, cofinancée par le Fonds Social Européen.
- [29] J. BINARD, "Réservoirs, Soudage en chaudronnerie", Techniques de l'Ingénieur, Réf a 683, 10 novembre 1985
- [30] D.ROSENTHAL, "Welding Journal", vol. 20, no 5 (1941).
- [31] Lancaster, J.F, "Metallurgy of welding" , Sixth Edition Abington Publishing (1999),p 464.
- [32] Chunming Wang, Xingfang W , Jie Lie , Ning an xu, "Transmission electron microscopy of martensite , austenite , islands in pipeline steel X70" , Materials science and Engineering A438-440, 267-276 (2006)
- [33] J-P MUZEAU, " Constructions métalliques– Assemblages par soudage", Techniques de l'ingénieur, Réf C2522, 10 août 2012.
- [34] A.BOUZIANE, "Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression intérieure", Université M^HAMED BOUGARA BOUMERDES ,2008
- [35] Sedrini Abdelkader, "Etude sur le comportement en endommagements des aciers API 5X65 du model weibull», Université Tlemcen, 2007.
- [36] KHOUKHI FAIZA, "Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (Eau, huile et gaz) ", Université M^HAMED BOUGARA BOUMERDES,2008
- [37] : documentation ALFAPIPE ANNABA.
- [38] : Documentation de soudage ALFA PIPE ANNABA
- [39] : <http://www.alfapipedz.com/spip.php?article10>
- [40] : <http://www.wa-produr.com/aciers-anti-abrasion-et-hle/aciers-de construction/aciers-hle/?gclid=CK20gouqmM0CFRG3GwodhoINLA> .
- [41] Mustapha ALLOUTI. Thèse de doctorat en Génie Mécanique option: mécanique des matériaux' Étude de la nocivité de défauts dans les canalisations de transport de gaz tels les éraflures, les enfoncements ou leurs combinaisons' .de l'Université Paul Verlaine de Metz 2010.

Bibliographies

- [42] GM. Fekih. Magister : Étude bibliographique sur les défaillances des structures de pipelines et réparation par renforcement par manchons composites.
- [43] Revêtements polymères de canalisation de Fluide : caractérisation et évolution de l'adhésion en milieu agressif
- [44] Stéphane GASTAUD thèse. Influence de l'état du revêtement hydrocarboné sur le risque de corrosion des canalisations enterrées de transport de gaz
- [45] Ordre d'exécution revêtement extérieure ISO/FDIS 21209-1 (ALFA PIPE. Annaba)
- [46] BELLAHCEN Tassadit : ETUDE DE LA NOCIVITE DES DEFAUTS DANS LES CANALISATION SOUS ENVIRENNEMENT HYDROGENE
- [47] DJEDID Ibrahim : Etude sur les défaillances des aciers API-5LX60 pour pipeline cas de la ligne GZL.JUIN 2013.
- [47] BOUMELITA-YASSINE THESE.
- [48] Bounouara et all Thèse Caractérisation et Contrôle de la Réalisation des Pipelines en Acier X70. Annaba 2010.