

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ CHADLI BENDJEDID - EL TARF



جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف

FACULTÉ DES SCIENCES  
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

# MÉMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIÈRE

FILIÈRE : Physique

OPTION : Physique des Matériaux

## Thème

*Etude du comportement mécanique des joints soudés  
lors du soudage des tubes en acier X70 réalisées par le  
procédé SAW*

Présenté par :

DJOUIDA Roumaïssa

Dirigé par :

Dr. HAFS Ali

### Jury de soutenance :

LAMROUS Douniazed	Président	MCB	Université - El Tarf
ARROUCI Soumia	Examineur	MCB	Université -El Tarf
HAFS Ali	Rapporteur	MCA	Université -El Tarf

*Année Universitaire: 2022/2023*

## Résumé

Le transport d'énergie par pipelines est l'outil le plus fiable pour les industries d'hydrocarbures, ces tubes sont fabriqués par le procédé de soudage à l'arc submergé suivant la norme **API 5L**. Cependant, lors de l'élaboration de ces tubes, beaucoup de rebuts furent enregistrés, de plus, ils sont exposés à d'autres risques tels que fissures, déformations, corrosion...etc.

Le but de ce travail est l'étude du comportement mécanique du pipeline de catégorie **API 5 L X70** fabriqué par « **ALFAPIPE ANNABA** » et employés pour le transport des hydrocarbures.

Différente technique de caractérisation mécanique a été réalisé à savoir : les essais de traction, pliage, essais de dureté et de résilience à différentes températures ( -20°C, -10°C, 0°C, 10°C, et 20°C), sur le métal de base et métal avec soudure. L'étude est complétée par une analyse chimique.

***Mots clés :** soudage, arc submergé, norme **API 5L**, pipelines, rebuts, propriétés mécaniques*

## **Abstract**

Pipeline energy transport is the most reliable tool for the hydrocarbon industries, and these pipes are manufactured using the **API 5L** submerged arc welding process. However, during the production of these tubes, a lot of scrap was recorded, and they are also exposed to other risks such as cracks, deformation, corrosion, etc.

The aim of this work is to study the mechanical behavior of the **API 5 L X70** category pipeline manufactured by "**ALFAPIPE ANNABA** " and used for the transport of hydrocarbons. Different mechanical characterization techniques were carried out, namely: tensile tests, folding, hardness and resilience tests at different temperatures (-20°C, -10°C, 0°C, 10°C, and 20°C), on base metal and metal with weld. The study is completed by a chemical analysis.

***Keywords :*** *welding, submerged arc, API 5L, pipelines, mechanical properties.*

## الملخص

يعتبر نقل مختلف أنواع الطاقة عبر خطوط الأنابيب من الوسائل الأكثر إستعمالا و موثوقية الهيدروكربونية. يتم تصنيع هذه الأنابيب عن طريق عملية لحام القوس المغمور وفقا لمعيار **API** للصناعات و مع ذلك أثناء صنع الأنابيب تسجل نفايات عديدة، بالإضافة إلى ذلك تتعرض هذه الأخيرة إلى مخاطر أخرى مثل التشققات التشوه و التآكل.....إلخ.

الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الميكانيكي لخط أنابيب فئة **API 5L X70** المصنوع بواسطة **ALFAPIP ANNABA** و المستخدم في نقل المحروقات.

تم تنفيذ تقنيات توصيف ميكانيكية مختلفة و هي إختبارات الشد و الإنحناء و إختبارات الصلابة و المرونة في درجات حرارة مختلفة (-20 درجة مئوية -10 درجة مئوية ، 0 درجة مئوية ، 10 درجات مئوية ، 20 درجة مئوية) ، على المعدن الأساسي و المعدن مع اللحام . إكتملت الدراسة بتحليل كيميائي .

**الكلمات الرئيسية:** اللحام ، القوس المغمور ، العيار **API** ، خطوط الأنابيب ، الخواص الميكانيكية.



# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*A mon fils mohamed sadjed*

*A mes chers parents ma mère, mon père, mon époux et sa  
famille*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs  
encouragements.*

*A mes sœurs Chaima et Khadidja*

*A mon frère seif eddin*

*A mon amie préférée Amel*

*Roumaissa DJOUIDA*

# Remerciements

Un très grand merci à mon dieu **ALLAH** qui est toujours présent avec moi dans les moments faciles et difficiles de la vie, et ma donnée la volonté, la santé, la force et la patience pour l'accomplissement de ce travail.

Par ces quelques lignes, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près et de loin au bon déroulement de cette mémoire, en espérant avoir oublié personne...

Je tiens avant tout à remercier du fond du cœur Dr. **HAFS Ali**, Maître de Conférences grade A à l'université d'EL TARF, pour m'avoir proposée le thème de master et pour m'avoir dirigée ce mémoire.

Je voudrais également le remercier pour ses conseils, la pleine confiance, le temps et la patience qu'elle m'a accordée. Il est impossible de résumer ici toutes les raisons de mes remerciements, mais je voudrais souligner, l'excellence des conditions de travail et mon admiration pour ses qualités humaines.

Mes remerciements s'adressent également à Dr. **LAMROUS Douniazed**, Maître de Conférences grade B à l'université d'EL TARF, qui m'a fait l'honneur de présider jury de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement Dr. **AROUCI Soumia**, Maître de Conférences grade B à l'université d'EL TARF, pour avoir accepté de faire partie du jury, qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect.

Enfin, je voudrais remercier ma famille et surtout mes parents pour leur soutien moral et financier durant ces années d'étude. Que ce travail rend hommage à leur dévouement et à leur affection.

### Chapitre I :

Figure I. 1 : Principe de fabrication des tubes soudés en spirale.....	06
Figure I. 2 : Stockage des bobines.....	07
Figure I.3 : Machine de préparation des bobines.....	08
Figure I.4 : Machine à souder.....	09
Figure I. 5 : Le rabotage par Soudage automatique.....	10
Figure I. 6 : : Dressage bande.....	10
Figure I. 7 : Cisailage.....	11
Figure I. 8 : Soudure intérieure(a) soudure extérieure (b).....	12
Figure I.9 : Soudure intérieure(a) soudure extérieure (b).....	12
Figure I.10 : Machines nettoyage tubes.....	13
Figure I.11 : Fil (a) flux (b).....	13
Figure I.12 : Tubes soudés sous flux en poudre (SAW).....	14
Figure I. 13 : Représentation schématique du joint soudé.....	15
Figure I.14 : Fissure longitudinale (Fissuration à chaud) .....	16
Figure I.15 : Fissure à froid. ....	17
Figure I.16 : Types de soufflures fréquentes .....	18
Figure I.17 : Manque de pénétration.....	19
Figure I.18 : Manque de fusion de la soudure.....	19
Figure I.19 : Morsures et caniveaux .....	20
Figure I.20 : Défaut de convexité.....	21

<b>Figure I.21 : Défaut d'excès de pénétration.....</b>	<b>21</b>
<b>Figure I.22 : Défaut d'alignement.....</b>	<b>21</b>

## **Chapitre II :**

<b>Figure II .1 : Diagramme binaire d'équilibre de phases Fer-Fe<sub>3</sub>C .....</b>	<b>26</b>
<b>Figure II.2 : Représentation schématique des microstructures pour un acier Fer-Carbone hypoeutectoïde au refroidissement à partir de la phase austénitique.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure II.3: Mise en solution des éléments dispersoïdes.....</b>	<b>28</b>
<b>Figure II.4 : (a) La limite d'élasticité, résistance à la traction et une dureté Brinell en fonction de la concentration de carbone pour plaines aciers au carbone ayant une microstructure constituée de perlite fine. (b) La ductilité (% EL et% RA) et au choc Izod énergie fonction de la concentration de carbone pour les aciers au carbone ordinaire d' microstructures constituées de perlite fine .....</b>	<b>29</b>
<b>Figure II.5 : Effet des éléments chimiques sur le durcissement par solution solide.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure II.6 : Effet des éléments chimiques sur le durcissement par solution solide.....</b>	<b>32</b>

## **Chapitre III :**

<b>Figure III. 1 : Prélèvement des plaques : (a) en métal de base transversale par rapport au virole et (b) transversales au cordon de soudure.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure III. 2 : :(a) Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tube(b) Eprouvette de traction de la soudure (c) Eprouvette de traction MB.....</b>	<b>38</b>
<b>Figure III. 3 : :(a) Plaque "1" totalement en métal de base (b) Plaque "2" contenant le cordon de soudure.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III. 4 : Presse hydraulique.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III.5 : Scie mécanique à ruban semi-automatique.....</b>	<b>40</b>

<b>Figure III. 6 : Fraiseuse universelle almo.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.7: Les éprouvettes usinées par la fraiseuse.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III. 8 : Spectromètre à étincelle de type SECTROLAB.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure III.9: Schématisation du comportement d'un matériau élasto-plastique.....</b>	<b>44</b>
<b>Figure III. 10 : Description dimensionnelle d'une éprouvette de traction.....</b>	<b>44</b>
<b>Figure III.11: Machine de traction universelle de type Z1200 ZWICK/ROELL.....</b>	<b>45</b>
<b>Figure III.12: Machine de pliage universelle de type Z1200 ZWICK/ROELL.....</b>	<b>46</b>
<b>Figure III.13 : Description dimensionnelle d'une éprouvette de résilience de l'entaille V.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure III.14 : Mouton de Charpy.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure III.15 : Principe du choc Charpy.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure III.16 : Exemple de courbe de résilience.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III.17 : Machine de résilience universelle de type PSW750 ZWICK/ROELL....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III.18 : Cryostat (ALFAPIPE, ANNABA) .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.19 : Configuration des éprouvettes de résiliences.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure II. 20 : Principe de la mesure de dureté par la méthode Vickers.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure II. 21 : Principe de la mesure de dureté par la méthode Vickers.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III. 22 : (a) L'opération de polissage(b)L'échantillon après l'opération de polissage.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III. 23 : Variation de dureté Vickers dans les trois zones.....</b>	<b>54</b>
 <b>Chapitre IV :</b>	
<b>Figure IV.2: Evolution de la Contrainte en fonction de la déformation.....</b>	<b>61</b>

<b>Figure IV.3: Traction de métal de base.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.4: Eprouvette avec cordon de soudure avant et après rupture.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV.5: Graphe de pliage.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.6 : Eprouvettes de pliage ED et EV après l'essai.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.6: Résultats des essais de résilience en Joule/cm<sup>2</sup>.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV.7: Courbe des essais de résilience a différentes températures.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV.8: Éprouvette de résilience après la rupture à différentes températures pour le métal de base (a)-20°C (b)-10°C (c) 0°C (d)10°C (e)20°C.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.9: Éprouvette de résilience après la rupture à différentes températures pour le cordon de soudure (a)-20°C (b)-10°C (c) 0°C (d)10°C (e)20°C.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.10 : (a) Eprouvette avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X 70) (b) Points de mesures de la dureté.....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.11: Courbe décrivant l'évolution de la dureté en fonction de la zone .....</b>	<b>69</b>

**Chapitre I :**

**Tableau I.1 :** La gamme des tubes produits .....6

**Chapitre IV**

**Tableau IV.1 :** Résultats de l'analyse chimique sur métal de base.....58

**Tableau IV.2:** Résultats d'essais de traction.....60

**Tableau IV.3:** Résultats d'essais de pliage.....63

**Tableau IV.4 :** Les résultats des essais de résilience en J/cm<sup>2</sup>.....65

**Tableau IV.6 :** Résultats de dureté Vickers HV10.....68

# ***SOMMAIRE***

<b>Introduction générale.....</b>	<b>02</b>
-----------------------------------	-----------

## **Chapitre I : Processus de fabrication de tubes dans l'unité ALFAPIPE Annaba**

<b>Introduction.....</b>	<b>04</b>
--------------------------	-----------

<b>I.1 Présentation de l'unité ALFAPIPE Annaba.....</b>	<b>04</b>
---	-----------

<b>I.1.1. Historique .....</b>	<b>04</b>
--------------------------------	-----------

<b>I.1.2. Les produits de l'unité ALFAPIPE ANNABA.....</b>	<b>05</b>
--	-----------

<b>I.2. Tube soudée en spirale .....</b>	<b>06</b>
--	-----------

<b>I.3. Les opérations principales pour la fabrication des tubes en spirale.....</b>	<b>07</b>
--	-----------

<b>I.3.1. Stockage des bobines .....</b>	<b>07</b>
--	-----------

<b>I.3.2. Contrôle les bobines.....</b>	<b>07</b>
---	-----------

<b>I.3.3. Machine de préparation bobine.....</b>	<b>08</b>
--	-----------

<b>I.3.4. Machine à souder .....</b>	<b>08</b>
--------------------------------------	-----------

<b>I.3.5. Le rabotage .....</b>	<b>09</b>
---------------------------------	-----------

<b>I.3.6. Le Guidage .....</b>	<b>10</b>
--------------------------------	-----------

<b>I.3.7. Dressage bande.....</b>	<b>10</b>
-----------------------------------	-----------

<b>I.3.8. Cisailage .....</b>	<b>11</b>
-------------------------------	-----------

<b>I.3.9. Formage de la bande.....</b>	<b>11</b>
--	-----------

<b>I.3.10. Tronçonneuse des tubes.....</b>	<b>12</b>
--	-----------

<b>I.3.11. Machines nettoyage tubes .....</b>	<b>12</b>
---	-----------

<b>I.4. Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW) .....</b>	<b>13</b>
<b>I.5. Les principaux défauts de soudure.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5.1. Fissurations.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5.1.1. Fissuration à chaud.....</b>	<b>16</b>
<b>I.5.1.2. Fissuration à froid.....</b>	<b>17</b>
<b>I.5.2. Cavités (Défauts des soufflures) .....</b>	<b>17</b>
<b>I.5.3. Inclusions solides.....</b>	<b>18</b>
<b>I.5.4. Manque de fusion et de pénétration.....</b>	<b>18</b>
<b>I.5.4.1. Manque de pénétration.....</b>	<b>18</b>
<b>I.5.4.2. Manque de fusion .....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.5. Défauts de forme (forme irrégulière - largeur irrégulière).....</b>	<b>19</b>
<b>I.5.5.1. Morsures et caniveaux.....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.5.2. Défaut de convexité.....</b>	<b>20</b>
<b>I.5.5.3. Excès de pénétration.....</b>	<b>21</b>
<b>I.5.5.4. Défaut d'alignement.....</b>	<b>21</b>
<b>I.6. Conclusion du chapitre .....</b>	<b>22</b>

## **Chapitre II : Généralités sur les aciers à haute limite élastique (HLE) et métallurgie de soudage**

<b>Introduction.....</b>	<b>24</b>
<b>II.1. Les aciers à haute limite élastique (HLE).....</b>	<b>24</b>
<b>II.1.1. Généralités.....</b>	<b>24</b>
<b>II.1.1.1. Ferrite.....</b>	<b>24</b>

II.1.1.2. Perlite .....	25
II.1.1.3. Facteurs de variations des proportions ferrite-perlite.....	25
II. 1. 2. Diagrammes d'équilibre des phases .....	25
II.2. Propriétés mécaniques.....	27
II.2.1. Performances mécaniques de la ferrite.....	27
II.2.2. Intérêt des éléments d'additions.....	28
II.2.3. Influence des éléments chimiques sur la tenue mécanique .....	29
II.2.3.1. Le carbone.....	29
II.2.3.2. Le cuivre.....	30
II.2.3.3. Le manganèse.....	30
II.2.3.4. Le soufre.....	30
II.2.3.5. Le phosphore.....	30
II.2.3.6. Le silicium.....	30
II.2.3.7. Nickel.....	31
II.2.3.8. Chrome et molybdène.....	32
II.3. Influence des éléments chimiques dans l'acier sur la soudabilité.....	32
II.3.1. Le carbone.....	32
II.3.2. Le manganèse.....	32
II.3.3. L'azote.....	33
II.3.4. Le Niobium, le Vanadium et le Titane.....	33
II.3.5. Le Nickel.....	34
II.3.5. Le Molybdène.....	34
II.3.6. Le soufre et le phosphore.....	34

<b>II.4. Conclusion du chapitre .....</b>	<b>35</b>
---	-----------

## **Chapitre III : Procédure expérimentale**

<b>Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>III.1. Contrôles destructifs .....</b>	<b>37</b>
<b>III.1.1. Prélèvement des échantillons.....</b>	<b>37</b>
<b>III.1.2. Préparation des éprouvettes.....</b>	<b>39</b>
<b>III.1.2.1. Aplatissement.....</b>	<b>39</b>
<b>III.1.2.2. Découpage.....</b>	<b>39</b>
<b>III.1.2.3. Usinage.....</b>	<b>40</b>
<b>III.2. Essais utilisés pour la caractérisation .....</b>	<b>42</b>
<b>III.2.1. Analyse chimique par spectromètre à étincelle.....</b>	<b>42</b>
<b>III.2.2. Essais de traction.....</b>	<b>43</b>
<b>III.2.2.1. Principe .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2.2.2. Diagramme de traction .....</b>	<b>43</b>
<b>III.2.2.3. Dimensionnement de l'éprouvette d'essai.....</b>	<b>44</b>
<b>III.2.2.4. Machines d'essais.....</b>	<b>45</b>
<b>III.2.3. Essais de pliage.....</b>	<b>45</b>
<b>III.2.3.1. Principe.....</b>	<b>45</b>
<b>III.2.3.2. Machines d'essais.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2.4. Essais de résilience.....</b>	<b>47</b>
<b>III.2.4.1. L'éprouvette de résilience.....</b>	<b>47</b>

III.2.4.2. Principe de l'essai.....	47
III.2.4.3. Caractéristique obtenue lors d'un essai de résilience .....	48
III.2.4.4. Effet de la température d'essai .....	49
III.2.4.5. Les équipements d'essai.....	50
III.2.5. Essais de dureté Vickers.....	52
III.2.5.1. Principe de l'essai.....	52
III.2.5.2. Machine d'essai.....	53
III.2.5.3. Mesures et filiations de dureté et micro dureté.....	54
II.3. Conclusion du chapitre.....	56

## **Chapitre IV : Résultats et Discussions**

<b>Introduction .....</b>	<b>58</b>
<b>IV.1. Essais de contrôle destructif.....</b>	<b>58</b>
IV.1.1. Analyse chimique de l'acier X70.....	58
IV.1.2. Essai de traction.....	60
IV.1.3. Essai de pliage.....	63
IV.1.4. Essai de résilience.....	65
IV.1.5. Essai de dureté Vickers.....	67
<b>IV.2. Conclusion du chapitre.....</b>	<b>70</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>71</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>73</b>



*Introduction générale*

## *Introduction générale*

De nombreuses industries réalisent des assemblages d'éléments métalliques par soudage (chaudronnerie, menuiserie métallique, construction navale, et automobile,). Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés.

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

Parmi les procédés de soudage par chauffage, on trouve le soudage à l'arc submergé sous flux SAW, cette technique est la plus utilisée pour assembler deux pièces en acier.

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

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

Ce mémoire contient quatre chapitres, précédé par une introduction générale pour préparer ce qui sera traité :

- Le premier chapitre, nous allons présenter le processus de fabrication de tubes dans l'unité ALFAPIPE Annaba.
- Le deuxième chapitre, une synthèse bibliographique portant sur les aciers à haute limite élastique (HLE) et métallurgie de soudage a été étayée.
- Le troisième chapitre présente les techniques expérimentales utilisées, le mode opératoire et les normes appliquées.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats microstructuraux et mécaniques effectués.
- En fin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.



# *Chapitre I*

*Processus de fabrication de tubes  
dans l'unité ALFAPIPE Annaba*

# Chapitre I

## Processus de fabrication de tubes dans l'unité ALFAPIPE Annaba

### Introduction

Les hydrocarbures sont actuellement fondamentaux pour l'économie de nombreux pays. Ainsi, le transport des hydrocarbures par pipelines reste le moyen le plus sécurisant pour, acheminer de grandes quantités de pétrole et de gaz, sur de longues distances. Ce qui les rend, par conséquent, d'une importance capitale pour transport des hydrocarbures.

La production des tubes en spirale soudés destinés au secteur d'hydrocarbure, débute du métal de base en forme de bande en bobine. Cette dernière passe par un procédé de soudage, inspecté de plusieurs manières et enfin, revêtu. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la présentation de la production dans ALFAPIPE Annaba

### I.1. Présentation de l'unité ALFAPIPE Annaba

Ce mémoire de master a été réalisé au niveau de l'unité de fabrication de tubes soudés en spirale ALFAPIPE du complexe sidérurgique d'EL-HADJAR.

#### I.1.1. Historique

En 1966, la SONATRACH, société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures, précisait ses besoins urgents et considérables en moyens de transports oléoducs et gazoducs et par la même des hydrocarbures et d'hydraulique, en tubes d'acier.

La SNS, société nationale de sidérurgie, était alors chargée par le ministère de l'industrie de prendre toutes les dispositions nécessaires pour assurer la réalisation immédiate de ce projet. Projet devant permettre de satisfaire une part importante de ces besoins exceptionnels en tubes ; auxquels s'ajoutaient ceux de l'hydraulique, de l'agriculture et de l'équipement industriel en général.

C'est pourquoi le projet d'implantation d'une unité de fabrication des tubes soudés en spirales au sein de la SNS était mis à l'étude.

Le chantier de réalisation de Tuberie SNS débutera en 1967 et mise en service en 1969.

Deux investissements importants ont été effectués entre 1975 et 1995 pour répondre aux besoins du marché en tubes de transport des hydrocarbures :

- En 1975, Implantation d'un atelier d'enrobage intérieur (revêtement intérieur) de tubes par époxy, surtout utilisés pour les tubes de gaz.
- En 1995, Implantation d'un atelier d'enrobage extérieur en tri-couches en polyéthylène.

Après décomposition de **SIDER** en 1999, l'unité devient **ALFATUS** (ALGERIENNE DE FABRICATION DE TUBES SOUDES EN SPIRALE), une filiale du groupe **SIDER**.

En juillet 2006, **ALFATUS/SIDER** signe sa fusion avec **PIPE GAZ GHARDAIA /ANABIA** et devient **ALFAPIPE** (ALGERIENNE DE FABRICATION DE PIPES) avec une direction générale commune à Alger.

**ALFAPIPE ANNABA** occupe une superficie de 98.000 m<sup>2</sup> à 15 Km au sud d'Annaba.

### I.1. 2. Les produits de l'unité ALFAPIPE ANNABA

ALFAPIPE a pour rôle de produire et contrôler des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. Ces tubes sont conçus pour le transport de gaz, pétrole et d'eau. La gamme des tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406,4 mm) et 52 pouces (1320,8 mm). Actuellement, la plupart des commandes sont à 48 pouces (1219,2 mm), et de longueur entre 9 à 12 m. Le tableau I.1 illustre les caractéristiques des tubes fabriquées :

*Tableau I.1 : La gamme des tubes produits*

<b>Diamètre des tubes en pouces</b>	16	24	30	36	42	48
<b>Epaisseur en (mm)</b>	5,0	7,5	9,0	11,0	12,0	15,0
<b>Largeur des bandes (mm)</b>	800	1200	1500	1800	1800	1800
<b>Capacité de production (m de tube / heure)</b>	57	47	42	34	24	14

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

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

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

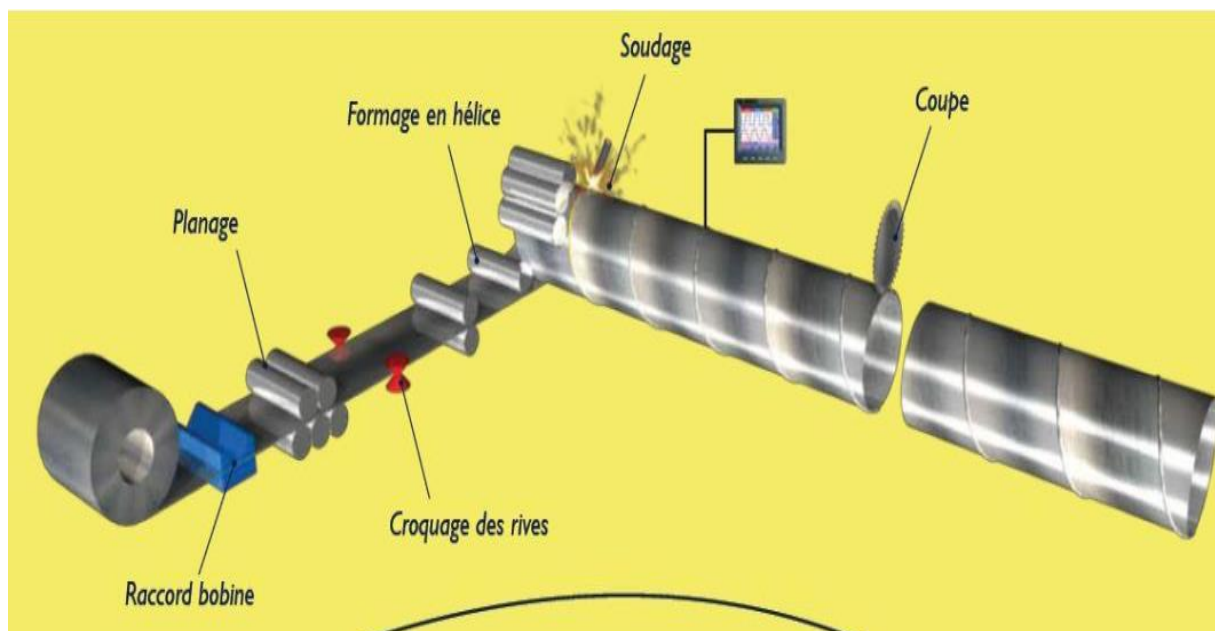
## I.2. Tube soudée en spirale

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 où elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin.

L'obtention du formage en spirale est réalisée par l'inclusion d'angle  $3$  entre l'axe initial de la bande et l'axe de sortie du tube.

L'enroulement des tubes en spirale permet d'obtenir des tubes calibrés sans avoir besoin de recourir à des étapes de fabrication supplémentaire telles que l'expansion ou le calibrage (figure I.1).

De ce fait, le tube précontraint lors de la phase de pliage, le reste par la suite des épaisseurs de paroi au-dessus de 20 mm, on utilise habituellement des tôles fortes. Ce procédé 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. 1 : Principe de fabrication des tubes soudés en spirale*

### I.3. Les opérations principales pour la fabrication des tubes en spirale

#### I.3.1. Stockage des bobines

Le hall de stockage des bobines est desservi par 2 voies ferrées et une voie sous – terrain reliée directement au LAC ainsi qu'un pont roulant de 44 tonnes, il permet de stocker 15 000 tonnes de bobines (figure I.2), soit la consommation d'un mois et demi de production. [1-4]



*Figure III. 2 : Stockage des bobines*

#### I.3.2. Contrôle les bobines

Contrôle (diamètre - largeur – épaisseur) poids (30t-31t) Mesure les épaisseurs par appareil (échométrie).

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

### I.3.3. Machine de préparation bobine

Cette machine est alimentée en bobines à axe horizontal par le pont roulant, la bobine ainsi placée est déroulée sur une certaine longueur pour subir plusieurs opérations (figure I.3).

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

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



*Figure I.3 : Machine de préparation des bobines*

### I.3.4. Machine à souder

La TUBERIE spirale dispose de quatre (04) machines à souder identiques A – B – C – D (figure I.4), qui permettent la réalisation de plusieurs opérations pour la fabrication du tube.



*Figure I.4 : Machine à souder*

### **I.3.5. Le rabotage**

C'est une opération qui consiste à couper, avec l'oxycoupeur, la fine bande sur la machine est nettoyé par la brosse métallique ensuite raccordement le bout de la précédente bobine à la nouvelle est effectué par le soudage automatique sous flux (figure I.5). La durée de l'opération dure environ 30mins.

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



*Figure I.5 : Le rabotage par Soudage automatique*

### **I.3.6. Le Guidage**

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

### **I.3.7. Dressage bande**

Un train de rouleaux dresseurs assurent une parfaite planéité et contribuent au guidage de la bande (figure I.6).



*Figure I.6 : Dressage bande*

### I.3.8. Cisailage

Des cisailles de rive permettant la mise en largeur définitive de la bande. Les chutes ainsi obtenues par cisailage sont coupées par simple rotation de deux (02) tourteaux hacheurs équipés de plusieurs couteaux en acier (figure I.7).

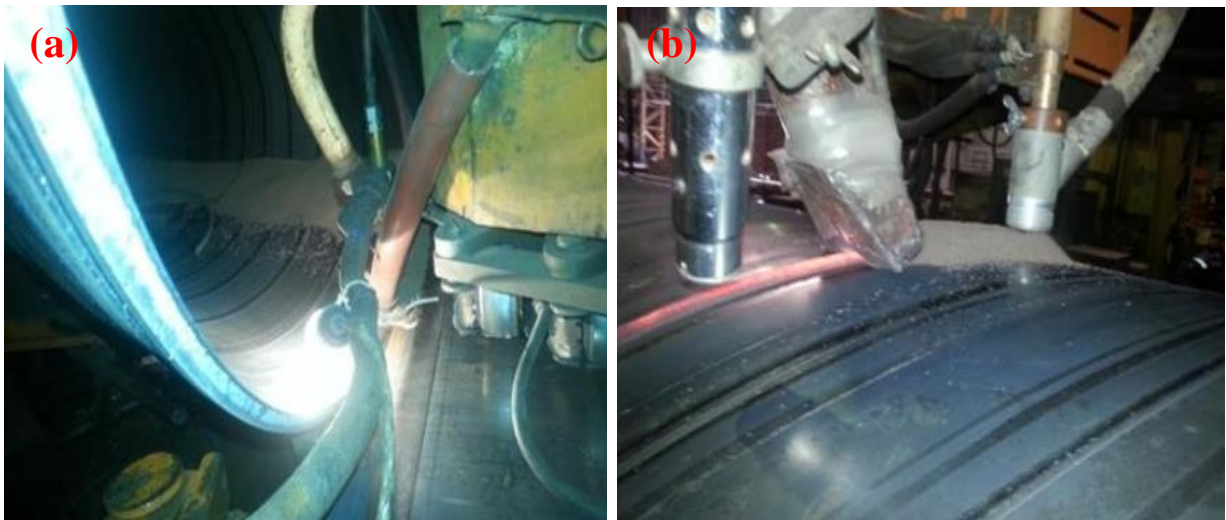


*Figure I.7 : Cisailage*

### I.3.9. Formage de la bande

La bande est entraînée par deux (2) rouleaux cylindriques, elle subit un préformage par des galets cambreurs, des bras de guidage avec plaque d'usure en téflon maintiennent la bande. Celle-ci est introduite dans la cage de formage constituée de plusieurs trains de galets, ajustés suivant le diamètre à réaliser. La bande ainsi formée, est soudée intérieurement, puis une demi-spire après, extérieurement (figure I.8).

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



*Figure I.8 : Soudure intérieure(a) soudure extérieure(b)*

### I.3.10. Tronçonneuse des tubes

Après une certaine longueur (exigé par le client) les tubes seront coupés par un chariot d'oxycoupage prévu à cet effet (figure I.9).



*Figure I.9 : Soudure intérieure(a) soudure extérieure(b)*

### I.3.11. Machines nettoyage tubes

Le tube ainsi mis en longueur est nettoyé sur une machine qui le débarrasse de tous les déchets (flux, laitier, ... etc.) (figure I.10).



*Figure I.10 : Machines nettoyage tubes*

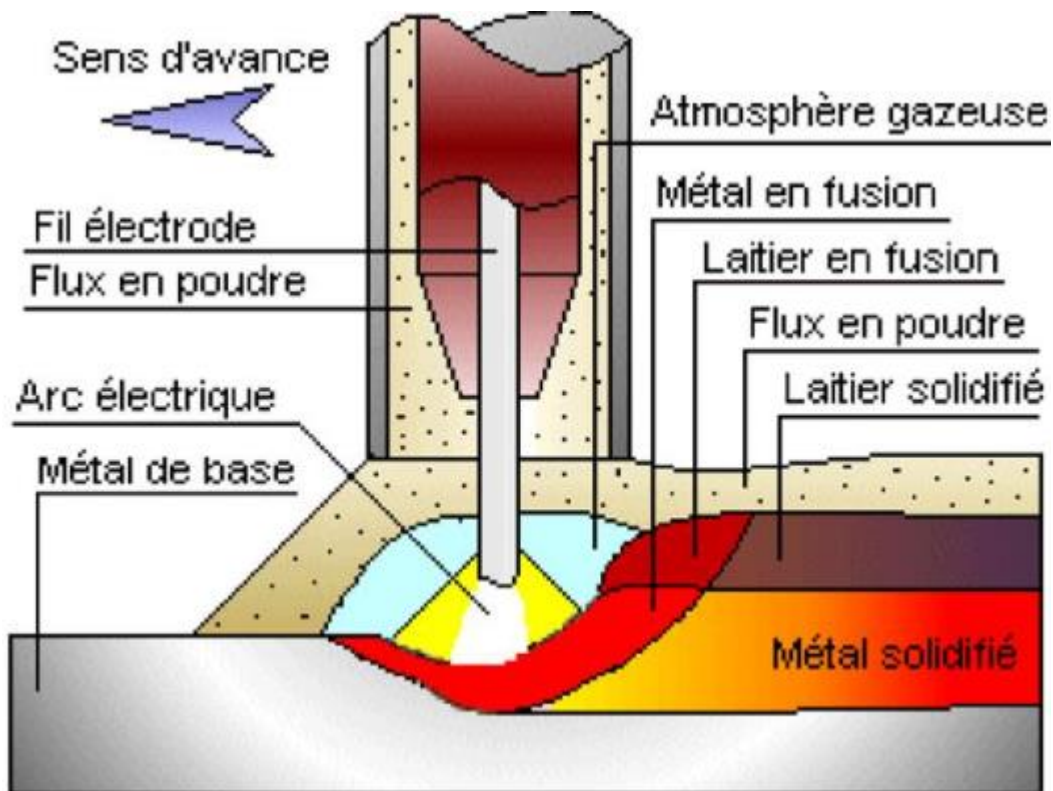
#### **I.4. Procédé de soudage sous flux en poudre (SAW)**

L'arc créé entre le fil d'apport et la pièce à souder est protégé par une couche de flux (figure I.11). Cette couche de flux protège le bain de fusion de la contamination de l'air ambiant (oxydation du bain) et concentre l'apport d'énergie dans le joint. Le flux en poudre fond, se mêle intimement au bain de fusion, avec une action désoxydante, purifiante et enrichissante sur le métal en fusion, puis remonte à la surface du bain de métal pour former le laitier après solidification [5-6].



*Figure I.11 : Fil(a) flux (b)*

Le soudage électrique à l'arc sous flux solide électro-conducteur (SAW : Submerged automatic welding) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil électrode d'apport de métal (de  $\varnothing$  1,6 à  $\varnothing$  6 mm) dévidé à une vitesse constante et la pièce à souder. Un dépôt continu de flux en poudre (parfaitement étuvé et de granulométrie homogène) recouvre l'extrémité du fil électrode et la pièce à souder (figure I.12). La fusion est accompagnée d'un dégagement gazeux. L'arc de soudage et le bain de fusion sont non visibles pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.



**Figure I.12 :** Tubes soudés sous flux en poudre (SAW)

Le fait de joindre deux pièces en acier par soudure sous flux en poudre implique que le métal composant chacune des pièces sera amené à son point de fusion. La matière subira donc un choc thermique important lorsqu'elle sera soudée. La zone affectée par la chaleur de soudage est appelée « zone affectée thermiquement » ou ZAT. Cette dernière est définie par le procédé de soudage ainsi que le nombre de passes de soudures effectuées. La figure I.12 illustre l'effet de propagation de chaleur dans une soudure sous flux en poudre (SAW) [1-4].

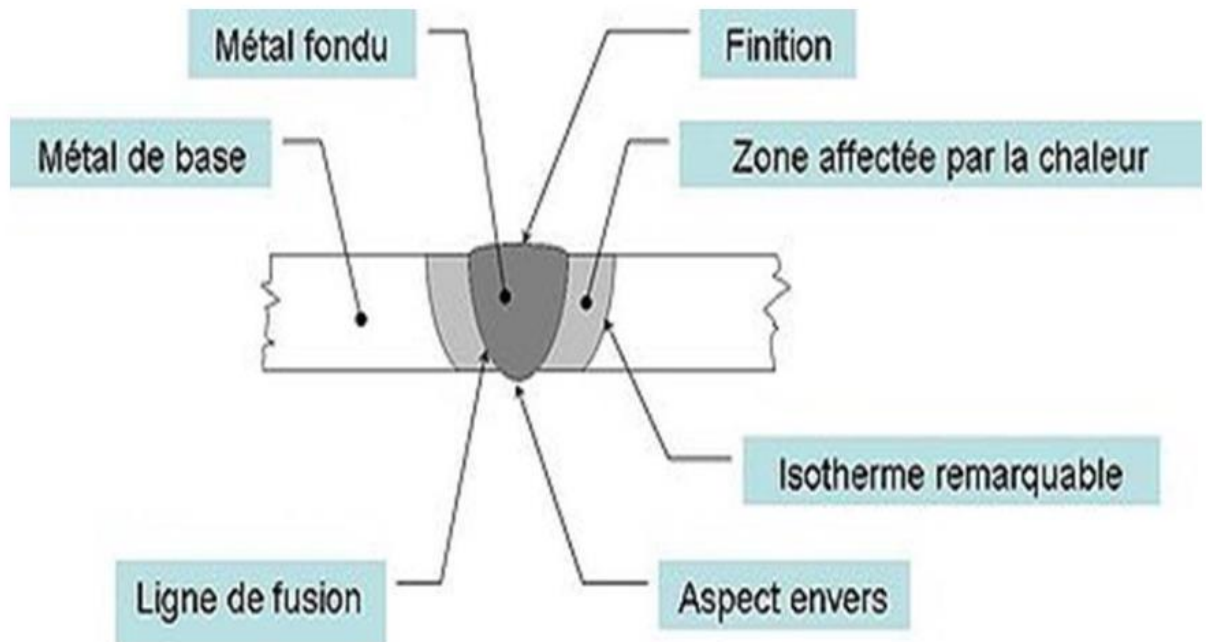


Figure I.13 : Représentation schématique du joint soudé

## I.5. Les principaux défauts de soudure

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Sont exposés dans cette ressource les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou du procédé de soudage utilisé. Ce sont [7-8] :

- **Groupe 1** : Fissures.
- **Groupe 2** : Cavités.
- **Groupe 3** : Inclusion solide.
- **Groupe 4** : Manque de fusion / Manque de pénétration.
- **Groupe 5** : Défauts de forme.

### I.5.1. Fissurations

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

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

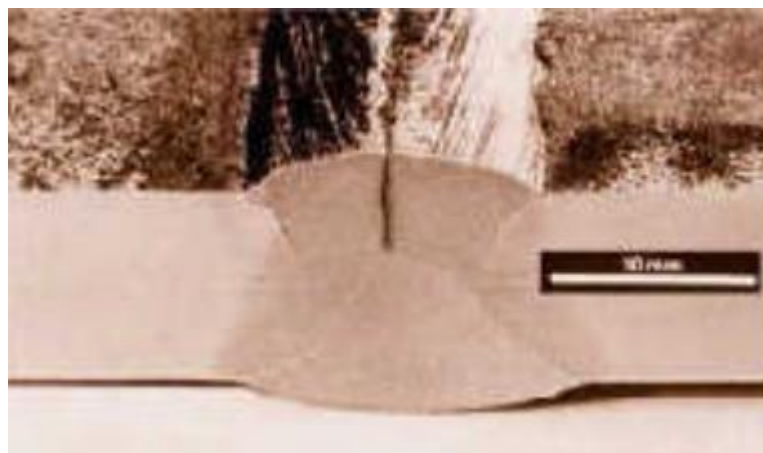
- Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.
- Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus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

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

### I.5.1.1. Fissuration à chaud

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

Dans d'autres cas, si on relève trop brusquement l'électrode à la fin de la soudure, on peut provoquer l'apparition d'un cratère formant une cavité interne provoquant une fissure (figure I.14). On peut prévenir ces fissures en effectuant un léger retour en arrière avec l'électrode, mais aussi en préchauffant le métal, en diminuant l'écartement entre les pièces ou en nourrissant le cratère par un apport plus important de métal.



**Figure I.14 :** Fissure longitudinale (Fissuration à chaud) [7-8]

### I.5.1.2. Fissuration à froid

La fissuration à froid peut apparaître des heures, voire des jours après le soudage. Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT (figure I.15) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.



*Figure I.15 : Fissure à froid. [7-8]*

### I.5.2. Cavités (Défauts des soufflures)

Les soufflures (cavités) sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz (figure I.16). Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchâtes (en surface). Les soufflures peuvent être causées par la présence de courants d'air, un manque de gaz de protection, la présence d'une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d'apport, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder.

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

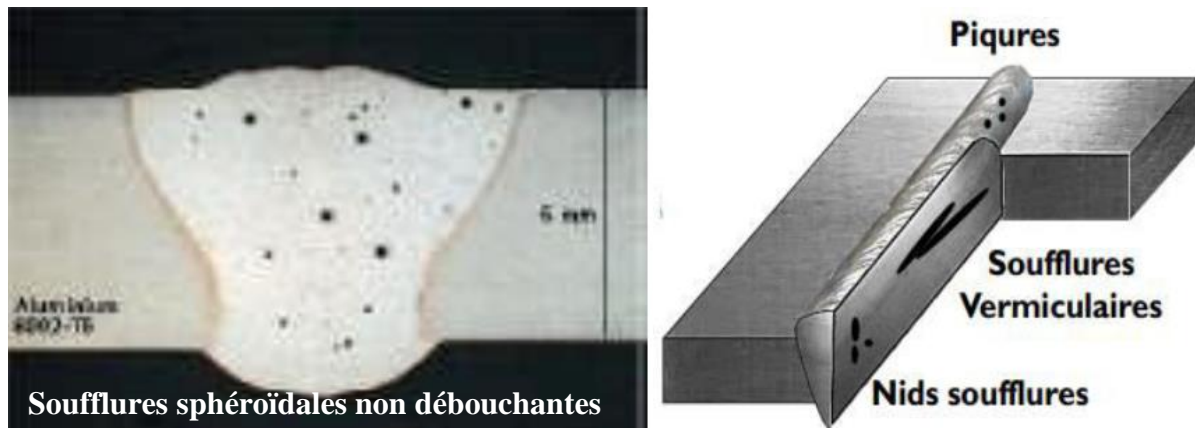


Figure I.16 : Types de soufflures fréquentes [7-8]

### I.5.3. Inclusions solides

En soudage, les inclusions désignent des corps étrangers présents au cœur du cordon.

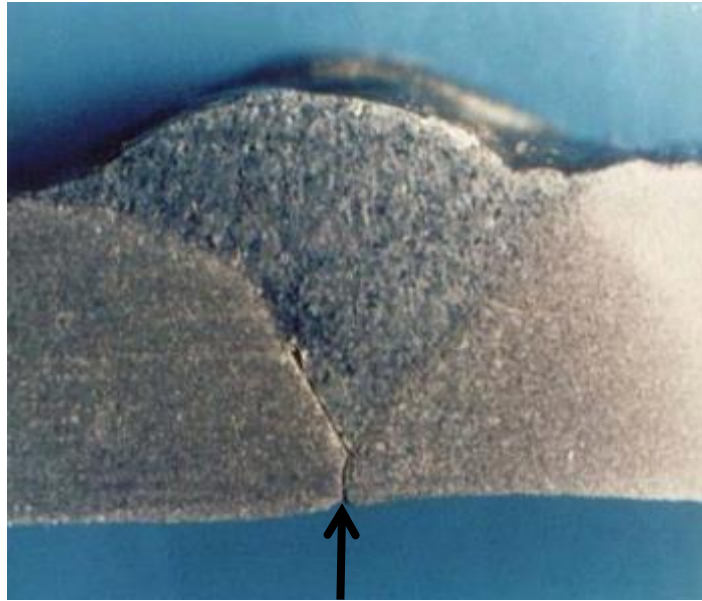
Les types d'inclusions fréquentes sont :

- Inclusion de laitier : résidu de laitier emprisonné dans la soudure ;
- Inclusion de flux : résidu de flux emprisonné dans la soudure ;
- Inclusion d'oxyde : oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification.

### I.5.4. Manque de fusion et de pénétration

#### I.5.4. 1. Manque de pénétration

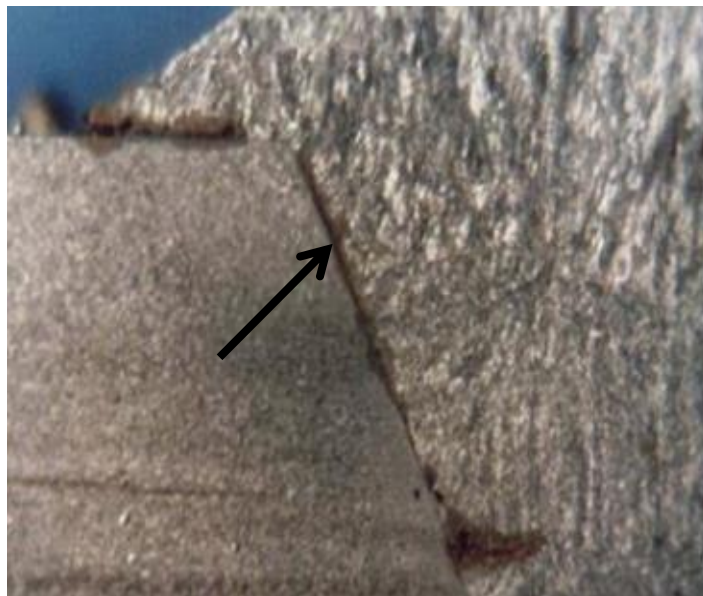
On dit qu'il y a manque de pénétration lorsque la soudure ne traverse pas complètement les tôles de part en part (figure I.17) ce défaut est le plus courant et aussi le plus grave parce qu'il diminue fortement la résistance du joint en créant une amorce de rupture.



*Figure I.17 : Manque de pénétration*

#### **I.5.4. 2. Manque de fusion**

C'est un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé, il constitue une entaille aigue susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue (figure I.18).



*Figure I.18 : Manque de fusion de la soudure*

#### **I.5.5. Défauts de forme (forme irrégulière - largeur irrégulière)**

Manque de conformité d'ordre géométrique de la surface externe par rapport au profil correct.

### I.5.5.1. Morsures et caniveaux

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figure I.19). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

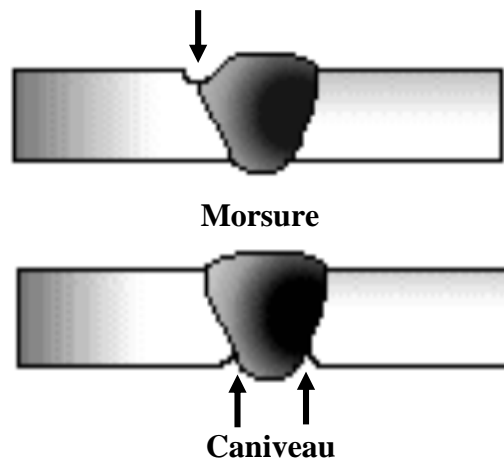


Figure I.19 : Morsures et caniveaux [7-8]

### I.5.5.2. Défaut de convexité

Il s'agit d'un excès de matière sur la longueur, ou localisé dans les passes terminales de la soudure (figure I.20). Ce défaut est dû à une vitesse de soudage lente ou un courant fort. Les normes imposent des limites d'épaisseur pour le cordon. Si le cordon est trop bombé et dépasse ces limites, il y a défaut de convexité.

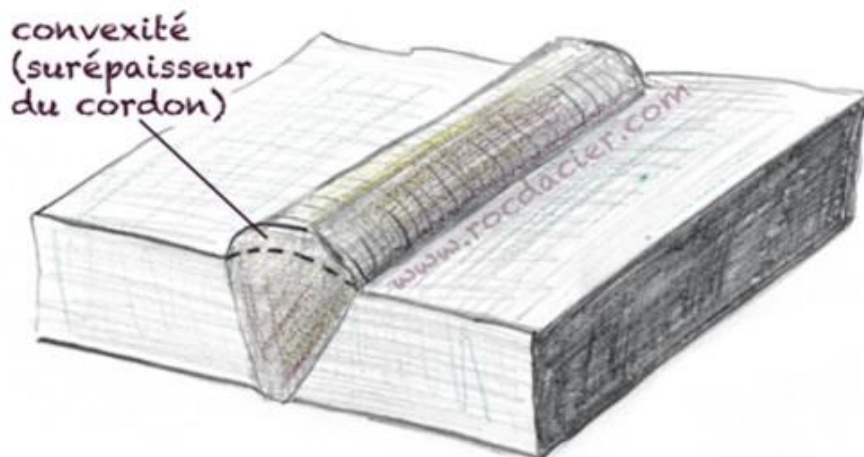


Figure I.20 : Défaut de convexité

### I.5.5.3. Excès de pénétration

Excès de métal à la racine pour une soudure exécutée à partir d'une seule face ou à travers le métal déjà déposé pour une soudure en plusieurs passes.

Ce défaut est dû aux : Energie de soudage élevée (courant). Vitesse de soudage lente. Ecartement large. Diamètre de l'électrode inapproprié (figure I.21).

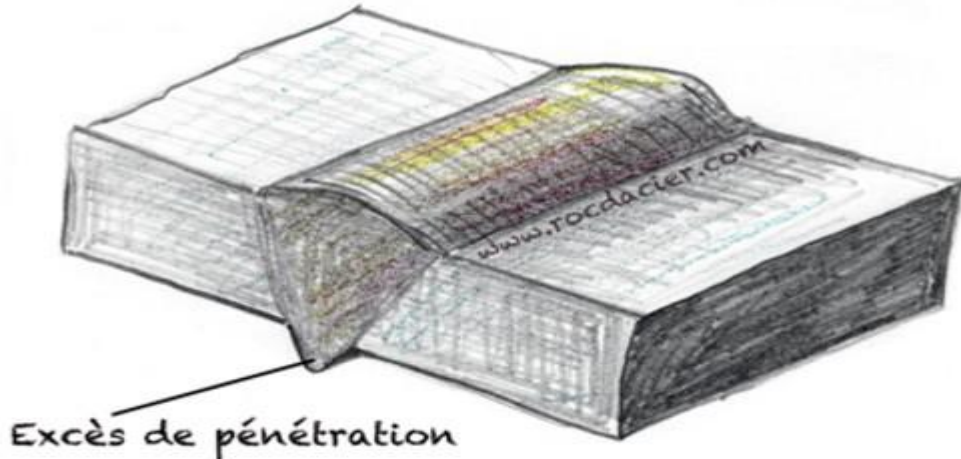


Figure I.21 : Défaut d'excès de pénétration

### I.5.5.4. Défaut d'alignement

C'est le non-respect du niveau prévu entre deux pièces soudées. Ce défaut est exprimé généralement par la mesure d'une dénivellation. Lorsque les pièces sont mal bridées et/ou le pointage insuffisant, on peut avoir un défaut d'alignement (figure I.22).

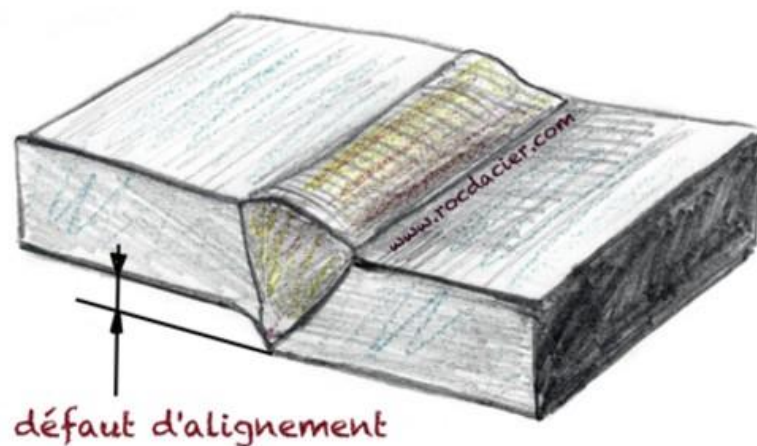


Figure I.22 : Défaut d'alignement

## **I.6. Conclusion du chapitre**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un processus de fabrication de tubes dans l'unité ALFAPIPE Annaba décrivant le procédé de soudage sous flux en poudre (SAW). Concernant défauts de soudure, nous avons exposés les principaux défauts les plus courants tel que les fissures, les cavités...ect



## *Chapitre II*

*Généralités sur les aciers à haute  
limite élastique (HLE) et  
métallurgie de soudage*

---

## Chapitre II

# Généralités sur les aciers à haute limite élastique (HLE) et métallurgie de soudage

### Introduction

Les aciers sont des matériaux métalliques les plus utilisés dans les différentes branches de l'industrie, composée de fer-carbone dont la teneur en carbone inférieure ou égale à 2%. Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique portant sur les aciers à haute limite élastique (HLE) et métallurgie de soudage a été égayée.

### II.1. Les aciers à haute limite élastique (HLE)

#### II.1.1. Généralités

Ces aciers comme leur nom l'indiquent à haute limite élastique dits HLE, ou à haute résistance HR (HSLA= steels high strengthlow alloy) présentent une bonne limite élastique et une meilleure soudabilité. Les éléments d'alliage principaux sont le carbone, le manganèse, le niobium, le vanadium, l'azote et l'aluminium.

La très grande majorité des aciers HLE est livrée et employée à l'état ferritoperlitique.

Ceci signifie qu'ils sont constitués de grains de ferrite juxtaposés avec des pseudo-grains de perlite, agrégat constitué lui-même de particules de ferrite et de particules de carbure de fer  $Fe_3C$  [9].

##### II.1.1.1. Ferrite

La ferrite est constituée essentiellement de fer  $\alpha$  qui ne peut contenir en solution solide d'insertion qu'au maximum 0,02 % de carbone, vers 725 °C, et encore bien moins à plus basses températures.

Le fer  $\alpha$  est susceptible d'admettre en solution solide de substitution des éléments d'alliage tels que Mn, Si, Cr, Ni, Mo, Cu... ou des impuretés comme P.

### II.1.1.2. Perlite

La perlite contient pratiquement tout le carbone de ces aciers sous forme de carbures précipités. L'agrégat perlitique est ainsi constitué d'une juxtaposition de petites particules de ferrite et de carbure. Ces particules sont d'autant plus fines que cette perlite s'est formée à partir d'une austénite à grains fins, et suite à un refroidissement relativement rapide

### II.1.1.3. Facteurs de variations des proportions ferrite-perlite

Les structures ferrito-perlitiques des aciers d'usage général sont constituées de proportions diverses de ferrite et de perlite, proportions qui varient en fonction des éléments suivants :

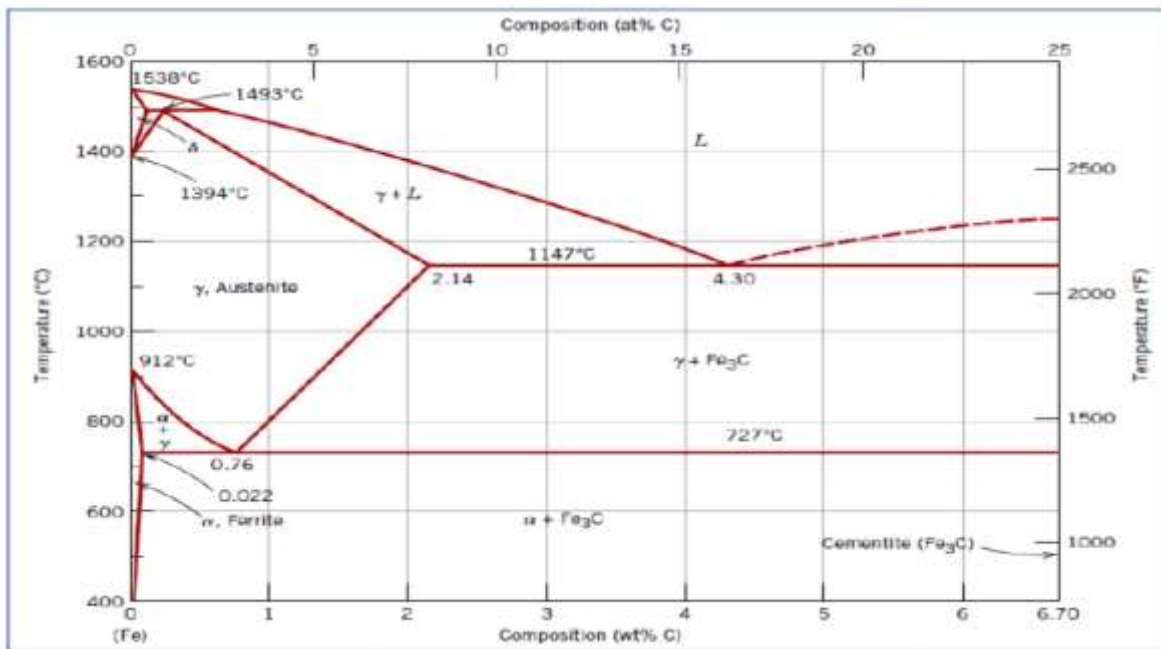
Tout d'abord, et principalement, de la **teneur en carbone** ; plus la teneur en carbone est élevée, plus la proportion de perlite est forte (et celle de ferrite faible).

Ensuite, et à un degré moindre, des éléments d'alliage présents dans l'acier en solution solide, ceux-ci diminuent la teneur moyenne en carbone des amas perlitiques et de ce fait provoquent, à teneur égale en carbone, la formation d'une plus grande proportion de ce constituant et diminuent donc la teneur en ferrite libre ; enfin, et dans de faibles proportions, des conditions de formation de la perlite lors de la transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  [10]

## I. 1. 2. Diagrammes d'équilibre des phases

Un diagramme d'équilibre est une représentation des transformations solide ou solide –solide d'un alliage. La partie haute température est formée par le diagramme fusion–solidification, et la partie basse température est constituée des lignes de transformation. (Figure II.1). On distingue les différentes variétés allotropiques du fer :

- Fe  $\alpha$ : stable de T ambiante à 906°C. Il ne dissout pratiquement pas le C (0,025% à 723°C).
- Fe  $\beta$ : stable de 906°C à 1400°C. Il dissout facilement le C (2% à 1150°C).
- Fe  $\delta$ : stable de 1400°C à 1540°C.

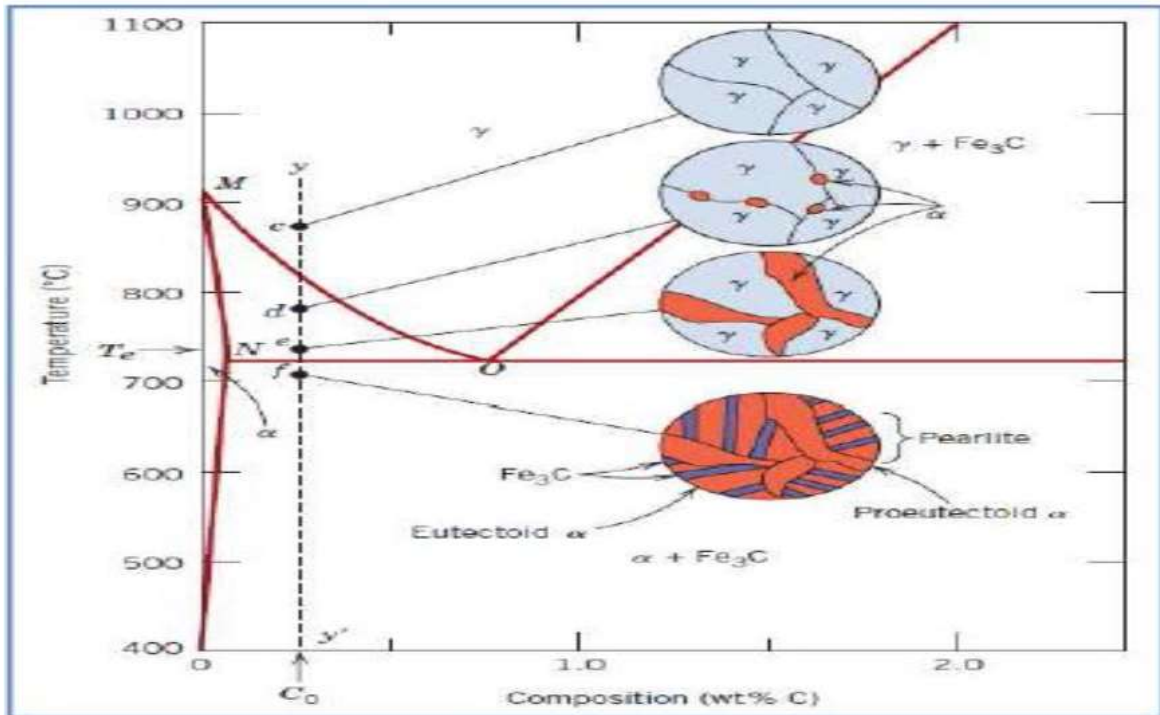


**Figure II.1** : Diagramme binaire d'équilibre de phases Fer-Fe<sub>3</sub>C [11-12]

Un acier hypoeutectoïde est un acier avec un pourcentage de carbone inférieur à 0.76%. Il est constitué de ferrite ( $\alpha$ ) et de perlite ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). La perlite se présente sous forme d'îlots aux joints de grains de la ferrite. Considérons une composition à la gauche de l'eutectoïde, entre 0,022 et 0,76% en C ; c'est ce qu'on appelle un acier hypoeutectoïde. Le refroidissement d'un alliage de la présente composition est représenté par le déplacement vers le bas de la ligne verticale sur la figure II.2.

En refroidissement jusqu'au point d, environ, qui est dans la région de phase, ces deux phases vont coexister comme dans la microstructure schématisée. La plupart des petites particules alpha se forment le long des joints de grains initiaux comme représenté au point e. Les compositions des deux phases correspondent, respectivement, à environ 0,020 et 0,40% en Carbone.

En continuant le refroidissement jusqu'au point f, on retrouvera toujours les grains alpha déjà formés en c par contre pour les grains gamma en remarque la formation de la perlite qui elle-même est composée de fines lamelles ferrite de 0,022% de C et de perlite de 0,76% de Carbone [13].



**Figure II.2 :** Représentation schématique des microstructures pour un acier Fer-Carbone hypoeutectoïde au refroidissement à partir de la phase austénitique [13].

Dans la plupart des cas, ces taux de refroidissement sont démesurément lents et vraiment inutile ; en fait, souvent les conditions hors équilibre sont désirables. Deux importances pratique sont à considérer : la survenance de modifications ou transformations de phase à des températures autres que celles prédites par les lignes de séparation de phases dans le diagramme de phase, et l'existence à la température ambiante de phases hors d'équilibre qui ne figurent pas sur le diagramme de phase [10].

## I.2. Propriétés mécaniques

### I.2.1. Performances mécaniques de la ferrite

Les performances mécaniques de la ferrite dépendent de la taille des grains. En effet, lors de la déformation plastique, les dislocations doivent franchir les joints des grains pour se propager et, pour ce faire, il est nécessaire d'appliquer une contrainte locale supérieure à la contrainte critique de franchissement ; ce fait est responsable d'un durcissement qui est traduit par la **loi de Hall Petch**:

$$\sigma_e = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (\text{II.1})$$

$\sigma_e$  : limite d'élasticité,

$\sigma_0$  : paramètre intégrant les autres facteurs de durcissement de la ferrite

$d$ : diamètre moyen des grains de ferrite.

Une explication détaillée de l'affinement des grains est donnée dans le paragraphe suivant.

Pour les aciers à haute limite élastique,  $\sigma_e = 200$  à  $250$  MPa,  $k = 18$  à  $21$  MPa/ $\sqrt{\text{mm}}$

### I.2.2. Intérêt des éléments d'additions

Les aciers HLE sont élaborés dans le but d'obtenir une combinaison de haute résistance, de bonne ductilité et de soudabilité. L'intérêt de ces matériaux est porté à l'addition d'éléments tels que Al, Nb et Ti, susceptibles de former des précipités fins, essentiellement des carbures et des carbonitrides. La très fine précipitation cohérente de ces phases (2 à 5 nm) qui survient au cours du refroidissement dans un procédé de laminage contrôlé, permet l'affinage des grains ferritiques à partir des grains austénitiques de départ. Les conditions thermomécaniques d'élaboration sont fixées pour induire l'affinement des grains ferritiques à l'état de livraison. Or, le degré d'affinage de la taille de grains est un paramètre déterminant pour un acier HLE, influencé par les phénomènes de mise en solution, de précipitation et de coalescence. La figure I.3 illustre les variations des teneurs en éléments dispersoïdes (Ti, Nb, V, Al) sous l'effet de traitement de mises en solution. En prenant le cas de l'aluminium (courbe n°1) qui est l'élément le plus utilisé comme élément dispersoïde formant un nitrure AlN, sa mise en solution s'effectue dans le domaine de température  $900^\circ - 1250^\circ\text{C}$  [14-15].

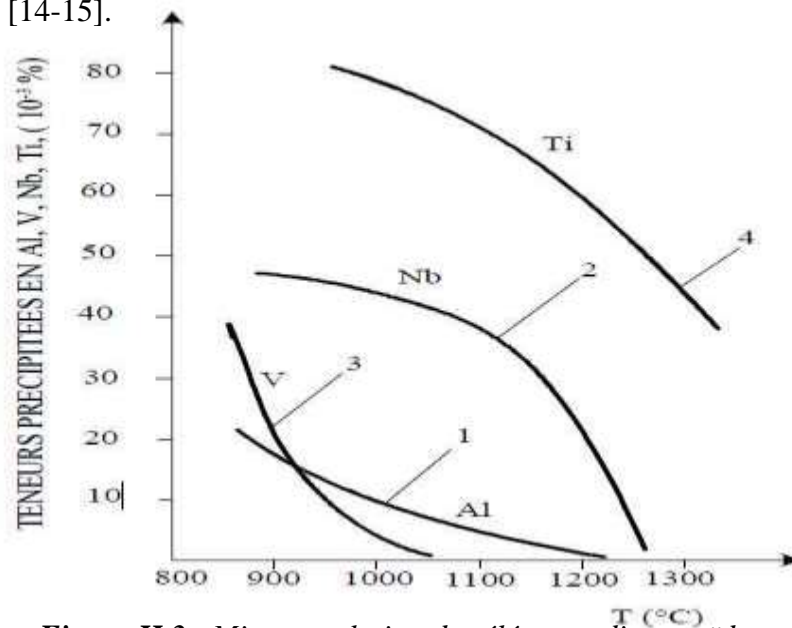


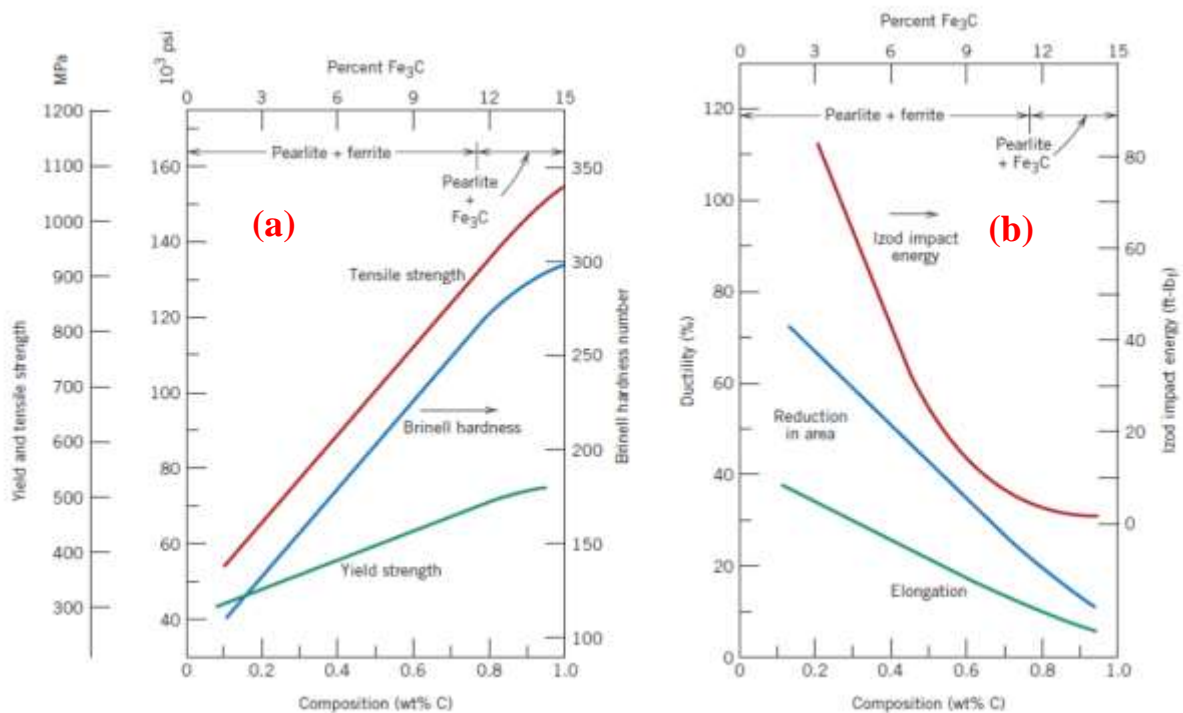
Figure II.3 : Mise en solution des éléments dispersoïdes

### I.2.3. Influence des éléments chimiques sur la tenue mécanique

Les aciers d'usage général de base sont des aciers au carbone ; ils contiennent toutefois quelques éléments autres, présents pour différentes raisons.

#### I.2.3.1. Le carbone

L'augmentation de la fraction en carbone dans un alliage d'acier tout en maintenant les autres éléments de la microstructure constante entraîne une augmentation de la dureté et de la résistance de ce dernier, comme l'illustre la figure II.4 dans laquelle la résistance à la traction et l'indice de dureté Brinell sont tracées en fonction du taux de carbone (ou de façon équivalente comme étant le pourcentage de carbone dans l'acier qui sont composés de perlite fine). Les deux paramètres augmentent avec l'augmentation de la concentration en carbone. Dans la mesure où la cémentite est plus fragile, l'augmentation de sa teneur en résultera une diminution de la ductilité et la ténacité à la fois (ou de l'énergie de l'impact).



**Figure II.4 :** (a) La limite d'élasticité, résistance à la traction et une dureté Brinell en fonction de la concentration de carbone pour plaines aciers au carbone ayant une microstructure constituée de perlite fine. (b) La ductilité (% EL et % RA) et au choc Izod énergie fonction de la concentration de carbone pour les aciers au carbone ordinaire d'microstructures constituées de perlite fine [16-17].

---

Les aciers d'usage général tels que les aciers au carbone contiennent d'autres éléments :

### **I.2.3.2. Le cuivre**

Il prend part au durcissement par effet de solution solide et diminue les sensibilités des aciers non alliés à la corrosion atmosphérique – probablement en neutralisant les effets nocifs du soufre [18].

### **I.2.3.3. Le manganèse**

Participe à la désoxydation, il fixe en outre le soufre sous forme de sulfures et permet le forgeage et le laminage du métal à chaud. La proportion de manganèse qui subsiste en solution solide joue le rôle d'élément durcissement, et compense la diminution de la teneur en carbone, et permet en outre d'augmenter la trempabilité, d'affiner la structure ferrito-perlitique et d'accroître la proportion de perlite.

### **I.2.3.4. Le soufre**

Impureté résiduelle, cet élément est fixé sous forme de sulfure de manganèse. Les progrès des procédés sidérurgiques ont permis d'abaisser très sensiblement les proportions présentes dans les aciers.

### **I.2.3.5. Le phosphore**

Impureté résiduelle, cet élément est présent en solution solide de substitution. Il durcit la ferrite et dégrade sa résistance à la rupture fragile.

### **I.2.3.6. Le silicium**

Il est nécessaire à la désoxydation en cours d'élaboration. De ce fait, une certaine proportion est fixée sous forme d'oxydes dans les inclusions ; la part non oxydée, et donc en solution solide, participe au durcissement de la ferrite.

### **I.2.3.7. Nickel**

Le nickel peut être présent pour affiner la structure, en augmentant la trempabilité, et pour améliorer la résistance à la rupture fragile.

### I.2.3.8. Chrome et molybdène

Ils participent à la formation de la cémentite de la perlite, voire de carbures spécifiques, ils augmentent la trempabilité. Ils améliorent les caractéristiques de résistance à la température ambiante et à chaud.

### I.2.3.9. Niobium et vanadium

Ils participent à la formation de carbures et carbonitrides. Ces précipités très fins, bien dispersés dans la ferrite et stable à des températures ambiantes, engendrent un durcissement important qui est utilisé pour la fabrication des aciers à haute limite d'élasticité. A teneur en carbone identique, le durcissement obtenu est important ; à caractéristiques de résistance identique, on peut diminuer la teneur en carbone [19].

L'augmentation des propriétés mécaniques, en particulier la limite élastique sous l'effet des éléments présents dans l'acier, est illustrée sur les figures II.4 et II.5. L'effet de la taille du grain sur les propriétés mécanique est représenté sur la figures II.6.

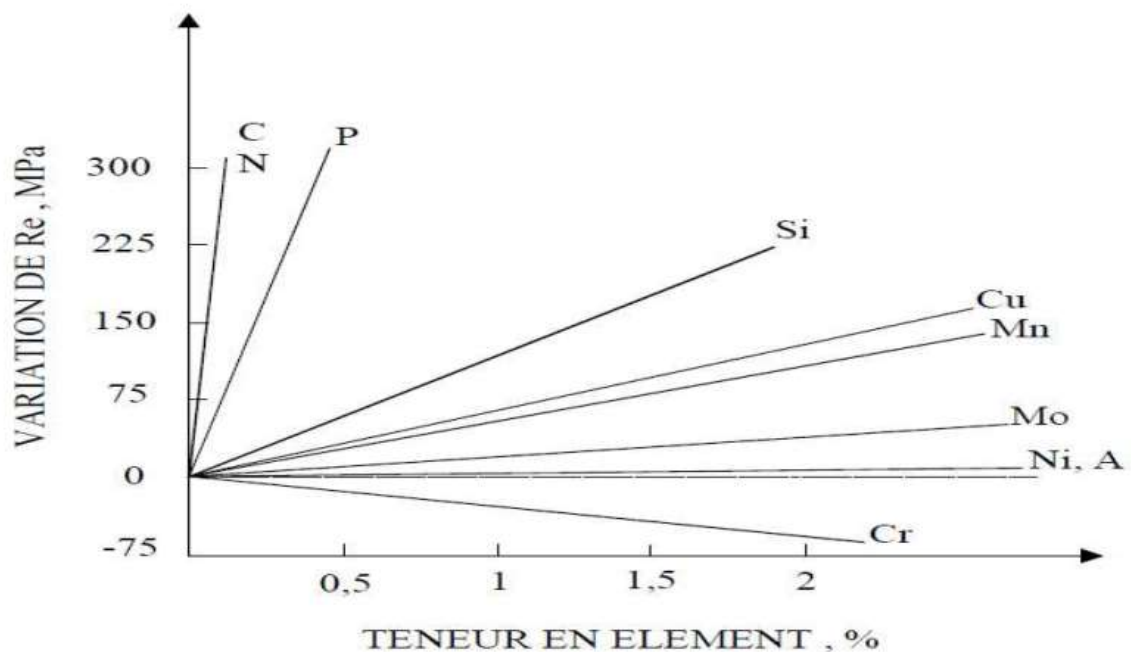
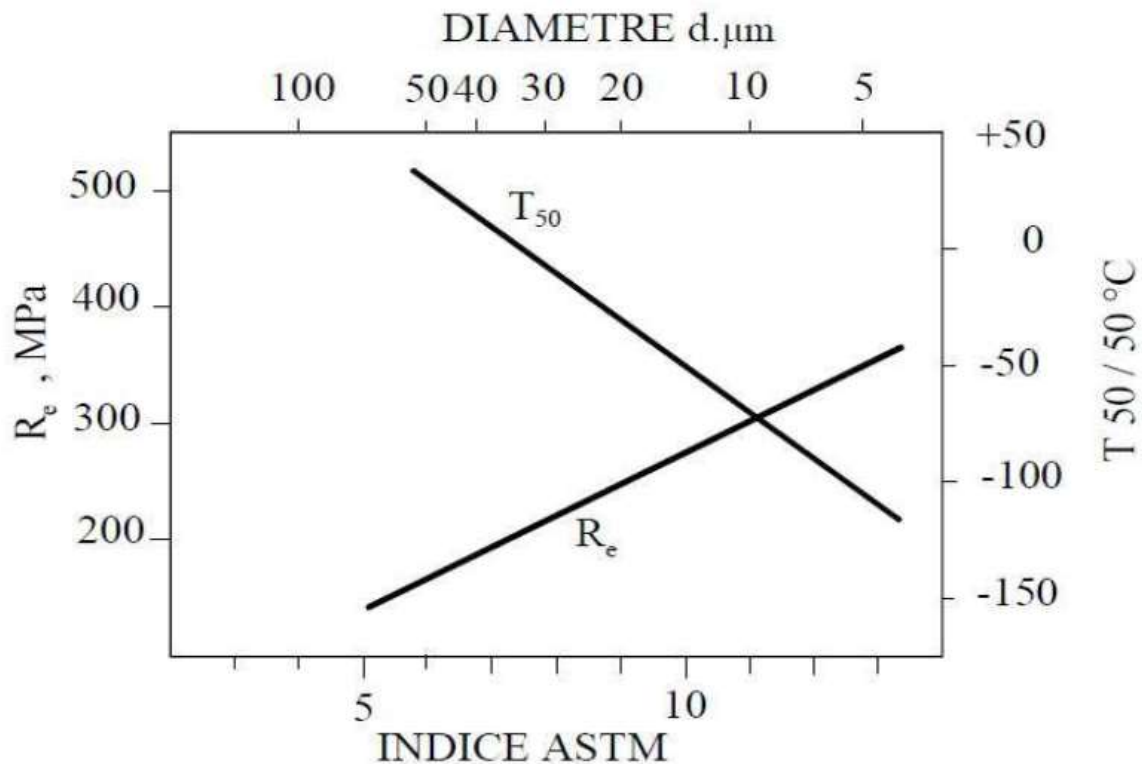


Figure I.5 : Effet des éléments chimiques sur le durcissement par solution solide [16].



**Figure I.6 :** Influence de la taille des grains ferritique sur  $R_e$  et  $T_{50/50}$ , cas d'un acier  $0,1\%C - 0,5\%Mn - 0,2\%Si - 0,006\%N$  [17].

### I.3. Influence des éléments chimiques dans l'acier sur la soudabilité

La connaissance de tous les éléments qui caractérisent la composition chimique de l'acier de base ou du joint soudé est nécessaire pour l'obtention de certaines caractéristiques. Ces éléments peuvent avoir un effet positif ou négatif sur la soudabilité.

#### I.3.1. Le carbone

Le carbone est un élément d'insertion et fait accroître la teneur en perlite. S'il fait augmenter la résistance des aciers, fait diminuer sa ductilité et dégrade leur soudabilité.

#### I.3.2. Le manganèse

Le manganèse agit à la fois par durcissement de solution, augmentation de la quantité de perlite, affinement du grain ferritique, par conséquent, il améliore la ductilité de l'acier dans les limites déterminées. Ses effets positifs sont amplifiés par l'insertion dans l'acier des éléments comme le titane ou le niobium qui dans des concentrations déterminées améliorent

la résistance et la ductilité. Comme élément de substitution le phosphore provoque un durcissement de solution accompagné d'une très forte fragilisation.

### I.3.3. L'azote

L'azote est un élément d'insertion, exerçant une influence néfaste sur la température de transition. Cet effet est neutralisé par la présence d'aluminium, qui en se combinant avec l'azote forme un nitrure. Mais d'autre part la précipitation sous forme de nitrures fins, qui se produit au cours du laminage, ou bien au cours du chauffage avant normalisation dans le domaine des températures allant de 600°C à 700°C, affine par la suite les grains qui en sont issus. La réduction de la teneur en soufre dans les aciers de laminage contrôlé de 0,05 à 0,004% fait augmenter la résilience selon Charpy pratiquement de deux fois.

### I.3.4. Le Niobium, le Vanadium et le Titane

Le Niobium, le Vanadium et le Titane forment des précipités durcissant mais affinent également le grain. Ces deux effets s'ajoutent pour améliorer les propriétés de résistance de l'acier, mais ils ont des effets antagonistes en ce qui concerne la température de transition TK.

L'utilisation du Vanadium fait augmenter la résistance des aciers faiblement alliés et améliore leur soudabilité. Par contre le Niobium est un modificateur d'acier qui améliore le travail de l'acier durant la production et améliore la soudabilité. Les effets les plus favorables du Niobium apparaissent à de faibles teneurs (0,02 à 0,03%), particulièrement lorsqu'il est combiné à l'Aluminium (au voisinage de 0,02%). Dans ce cas il fait augmenter les caractéristiques de résistance de l'acier sans dégrader sa ductilité. L'Aluminium à la différence des modificateurs comme le Titane, le Niobium et le Vanadium, ne forment pas de carbides.

Les nitrites d'Aluminium contribuent à l'accroissement du grain austénitique et conduit à la formation d'une structure secondaire à grains fins. La désoxydation par l'Aluminium abaisse la température de transition à l'état fragile, augmente la résistance et améliore la soudabilité des aciers. L'avantage principal de la désoxydation est que dans ce cas le coût de l'acier n'augmente pratiquement pas. Dans la composition chimique des aciers des tubes, on trouve aussi les métaux rares ; leur influence est positive sur la forme des inclusions non métalliques, sur la soudabilité des aciers.

### **I.3.5. Le Nickel**

Le Nickel affine le grain et améliore la température de transition TK de la résilience. Le Chrome a une action bénéfique sur la résistance à la corrosion et c'est aussi un élément de substitution qui adoucit la ferrite dans laquelle il entre en solution, mais augmente la quantité de perlite.

### **I.3.5. Le Molybdène**

Le Molybdène a une influence favorable après revenu à basses températures ( $\leq 600^{\circ}\text{C}$ ), il améliore la limite d'élasticité et la température de transition. L'un des problèmes les plus importants pour l'intégrité des gazoducs, est la résistance à la fissuration par hydrogène. C'est pourquoi les efforts doivent être penchés vers la réduction de la teneur en soufre dans les aciers des tubes et au contrôle de la morphologie des inclusions [18].

### **I.3.6. Le soufre et le phosphore**

Le soufre et le phosphore sont très défavorables aux joints soudés. En tant qu'impuretés, on peut considérer que leur action est identique : augmentation de la fragilité de l'acier, risque de soufflures ou de criques. En principe, leur teneur doit être inférieure à 0.04% dans les aciers destinés au soudage [19].

**II.4. Conclusion du chapitre**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue bibliographique décrivant un bref survol des généralités sur les aciers à haute limite élastique (HLE).



*Chapitre III*

**Procédure expérimentale**

# Chapitre III

## Procédure expérimentale

### Introduction

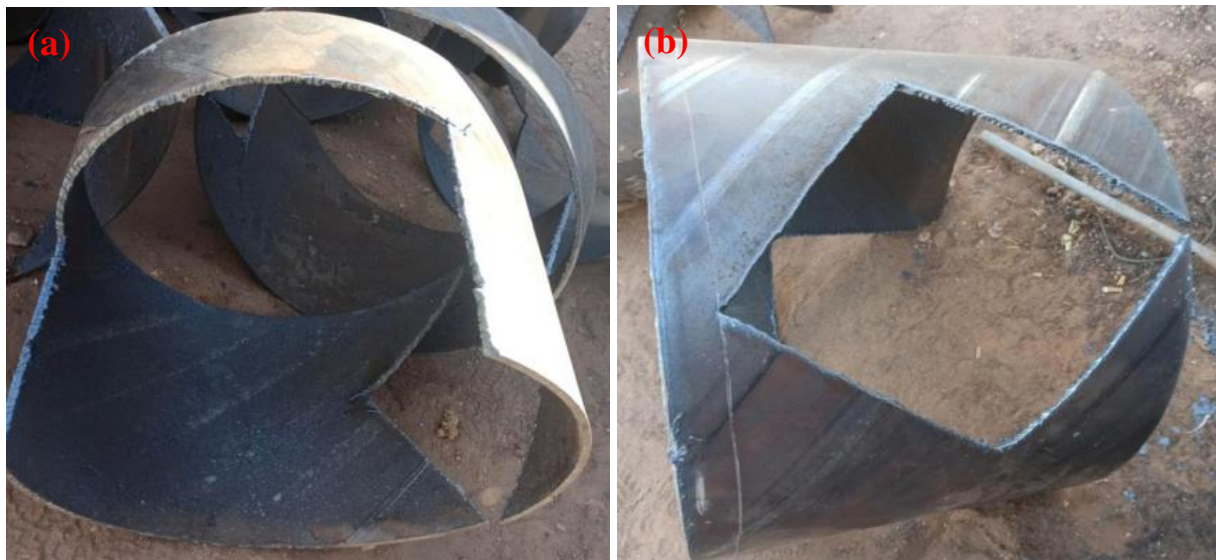
Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure. Les méthodes expérimentales sont axées sur une caractérisation du comportement mécanique de l'acier API 5L X70 utilisé dans le transport du gaz. Pour cela on procède d'abord à une analyse chimique de l'échantillon à l'état reçu, et à ses caractérisations microstructurales grâce à un examen métallographique, suivie une étude générale des propriétés mécaniques et de cet acier tel que la résistance à la traction, la dureté et la résilience et les techniques de caractérisation utilisées.

### III.1. Contrôles destructifs

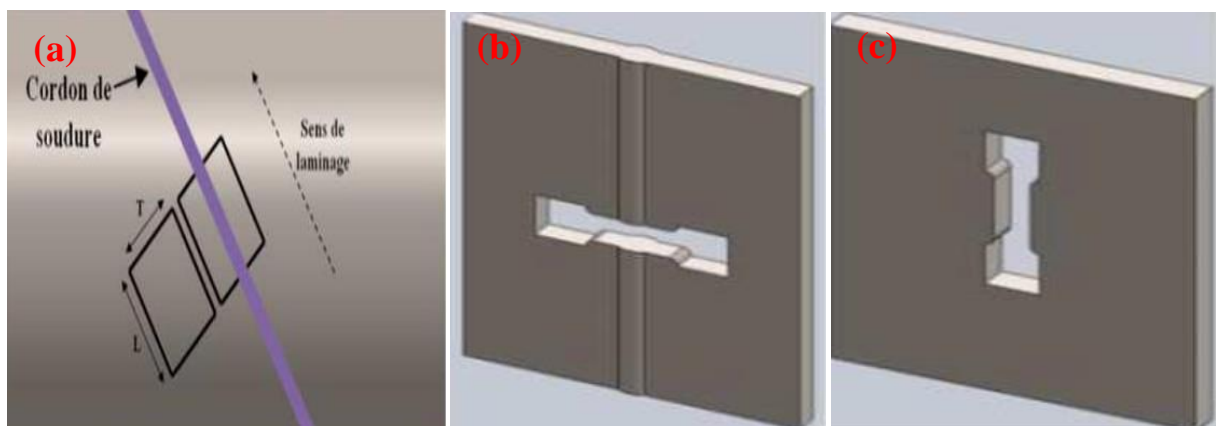
Les contrôles destructifs de tubes soudés en spirale viennent consolider la qualité du produit fabriqué par ALFAPIPE. Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement. Les différents essais destructifs réalisés sur un anneau de tube sont des essais mécaniques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

#### III.1.1. Prélèvement des échantillons

Les échantillons pour les essais destructifs sont prélevés d'un anneau du tube obturé à l'une des extrémités, désigné pour le test (lot ou coulée). La paire de plaques (métal de base, métal de base soudé) sont prélevés transversalement à l'axe du tube (figure III.1(a) et (b)). Les échantillons sont prélevés et découpés dans le sens du laminage (L) de tube (figure III.2(a), (b) et (c)).



**Figure III.1** : Prélèvement des plaques : (a) en métal de base transversale par rapport au virole et (b) transversales au cordon de soudure



**Figure III.2** : (a) Emplacement des prélèvements des éprouvettes dans le tube (b) Eprouvette de traction de la soudure (c) Eprouvette de traction MB

Les plaques découpé pour les essais de caractérisation (figure III.3) ont prélevé à partir d'un tube en acier de type API X70 SAW destiné pour la canalisation du gaz naturel pour le projet GR7. Les significations de ces dernières désignations sont comme suit :

- API : American Pétroleur Institute ;
- X : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance ;
- SAW : Submerged Arc Wilding.



*Figure III.3 : (a) Plaque "1" totalement en métal de base (b) Plaque "2" contenant le cordon de soudure.*

### III.1.2. Préparation des éprouvettes

#### III.1.2.1. Aplatissement

Les plaques en métal de base et contenant le cordon de soudure, prélevées à partir d'un tube ont aplaties par pression en utilisant une presse hydraulique (figure III.4).



*Figure III.4 : Presse hydraulique*

#### III.1.2.2. Découpage

Pour le découpage les plaques aplaties on a utilisé une scie mécanique à ruban semi automatique pour préparer les échantillons (figure III.5) ; le découpage se fait à la présence de l'eau pour éviter l'augmentation de la température (à cause du frottement entre la scie et l'échantillon) donc par conséquence on évite le changement de la structure.



*Figure III.5 : Scie mécanique à ruban semi automatique*

### **III.1.2.3. Usinage**

La fraiseuse qui a servie à nos essais est une fraiseuse universelle de la Société Nationale de Production des Machines-Outils Industrielles (PMO), modèle almo de puissance 5 KW (figure III.6).



*Figure III.6 : Fraiseuse universelle almo*

Les éprouvettes usinées par la fraiseuse pour nos essais (traction, dureté, pliage, résilience) sont illustrés dans la figure III.7.



*Figure III.7 : Les éprouvettes usinées par la fraiseuse*

## III.2. Essais utilisés pour la caractérisation

Ce sont des tests destructifs 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 e (dureté, résilience, traction) et une analyse chimique.

### III.2.1. Analyse chimique par spectromètre à étincelle

Dans le but de vérifier la composition chimique de notre nuance, on a effectué une analyse chimique sur les trois zones de notre étude, cette analyse a été réalisé dans le laboratoire de l'entreprise ALFAPIPE Annaba à l'aide d'un spectromètre à émission optique à source étincelle de marque « SECTROLAB » (figure III.8). Dans cette méthode d'analyse, les atomes d'un échantillon sont excités par l'énergie fournie par un arc électrique, produit entre l'électrode de la sonde et la pièce. Cela chauffe les atomes à très haute température (température d'environ 3000°C), et les atomes ainsi excités émettent de la lumière à une longueur d'onde caractéristique. L'analyse de cette lumière permet d'obtenir une information qualitative et quantitative de l'échantillon.



*Figure III.8 : Spectromètre à étincelle de type SECTROLAB*

### III.2.2. Essais de traction

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement à la rupture et le coefficient de striction. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts « F » de tension de sens opposés et de même valeurs absolues.

#### III.2.2.1. Principe

L'essai consiste à soumettre une éprouvette bien normalisée à une déformation dû à une force de traction jusqu'à la rupture. Ces essais ont été effectués à température ambiante avec une vitesse de déformation constante.

#### III.2.2.2. Diagramme de traction

L'essai de traction lié à l'essai mécanique des produits en acier soumet une éprouvette usinée ou de plein-section à l'examen à une charge mesurée suffisamment pour causer la rupture. Les propriétés en résultant recherchées sont définies dans la terminologie des normes. Elle consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale  $S_0$  et de longueur utile  $L_0$ . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante (Figure III.9) :

- La droite OA correspond à la déformation élastique réversible.
- La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène : si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.
- Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

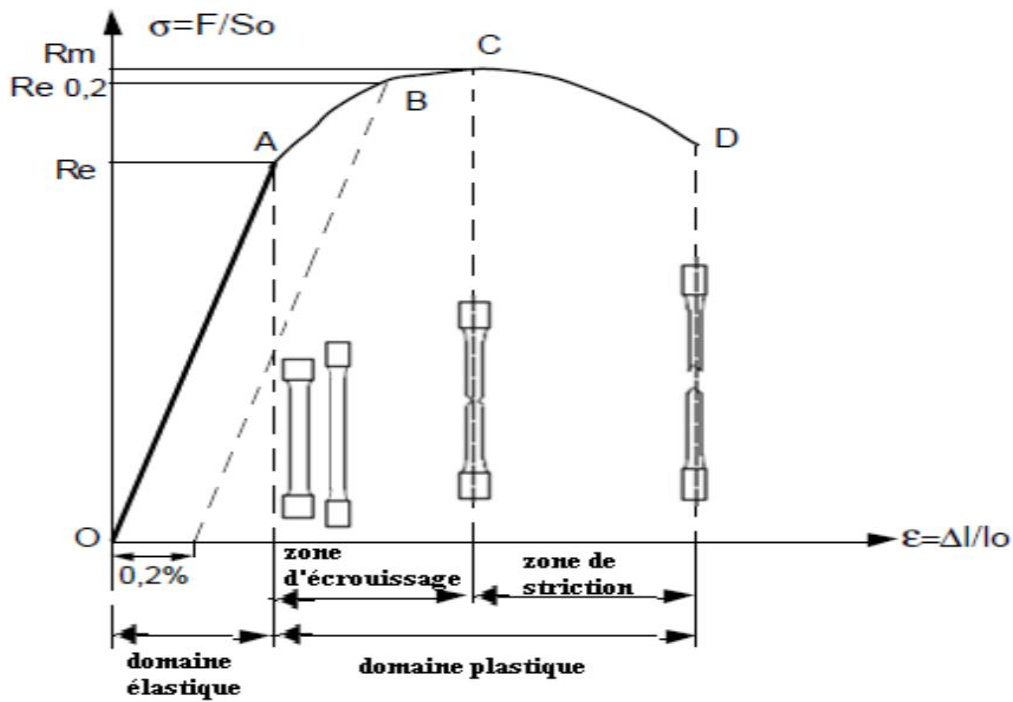


Figure III.9 : Schématisation du comportement d'un matériau élasto-plastique.

### III.2.2.3. Dimensionnement de l'éprouvette d'essai

La partie calibrée (partie utile) doit être raccordée par des congés aux têtes d'amarrage. Celles-ci pouvant être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine d'essai.

Les dimensions géométriques de l'éprouvette « plate » de traction sont montrées dans la figure III.10.

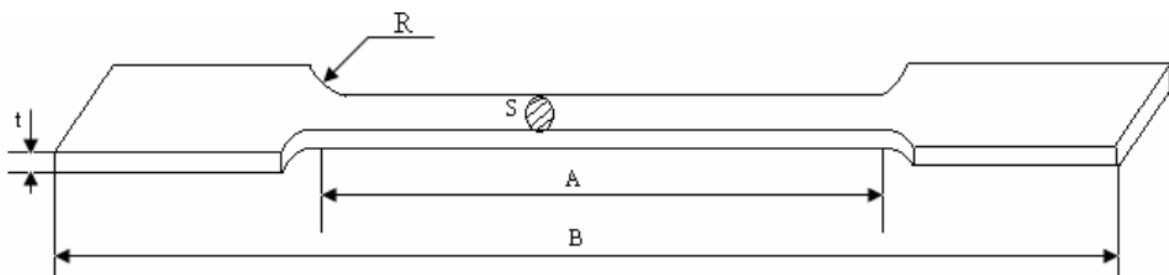


Figure III.10 : Description dimensionnelle d'une éprouvette de traction.

L'épaisseur de l'éprouvette est  $t = 14,3$  mm (la même épaisseur que le pipe), la section  $S = 544,83$  mm<sup>2</sup>,  $A = 57,2$  mm,  $R = 25,4$  mm.

### III.2.2.4. Machines d'essais

L'essai de traction ont été effectués au laboratoire de métallurgie de ALFAPIPE, sur une machine universelle de type Z1200 ZWICK/ROELL de capacité 1200KN, selon la norme API 5L .Voir la figure III.11.



*Figure III.11 : Machine de traction universelle de type Z1200 ZWICK/ROELL*

### III.2.3. Essais de pliage

#### III.2.3.1. Principe

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

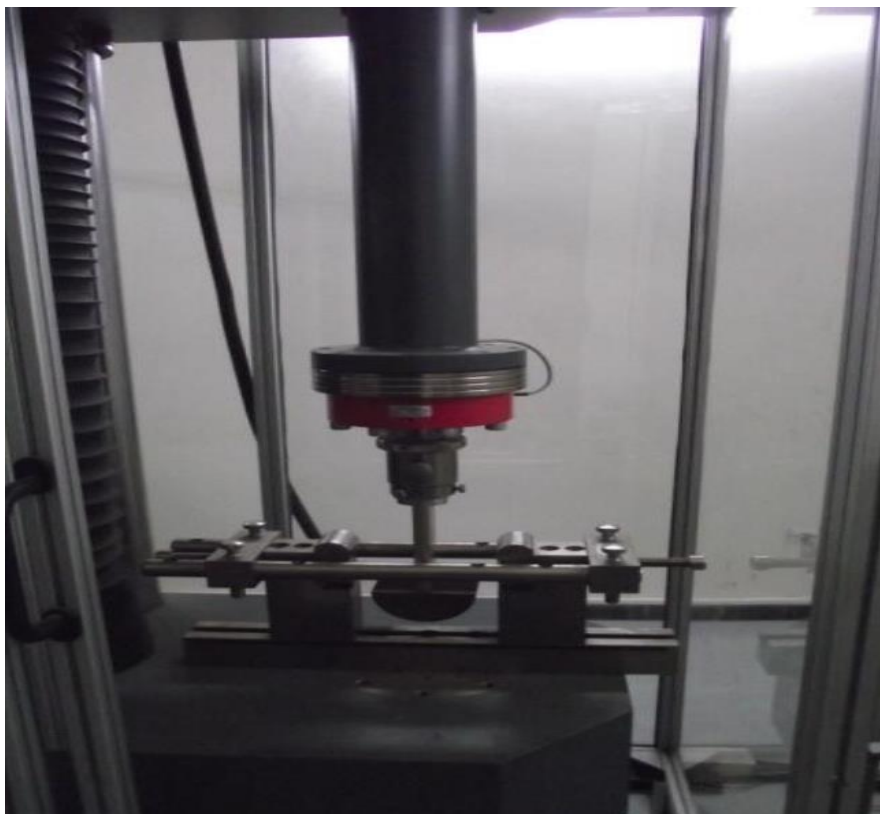
Pour but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc d'un vérifier la ductilité. Ses résultats sont :

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

### III.2.3.2. Machines d'essais

Afin d'apprécier la ductilité et l'homogénéité du cordon de soudure ainsi que sa tendance à se fissurer, on a effectué deux essais de pliage ; l'un à l'endroit et l'autre à l'envers pour bien vérifier qu'il ne se produit aucune fissuration dans la soudure et dans la ZAT, pour cela, l'éprouvette aux dimensions de (152,4x38,1)mm doit être redressée à froid, arasée sur les deux faces, et leurs arrêtes arrondis selon un rayon de 1/10 de l'épaisseur de l'éprouvette (figure III.7).

Les essais ont été effectués au laboratoire d'essais mécaniques d'ALFAPIPE Annaba, avec la machine universelle Z1200 ZWICK/ROELL (figure III.12), où les deux éprouvettes sont pliées à 180° à froid, dans un gabarit à poinçonnage entre deux rouleaux par un élément mâle (poinçon), la soudure étant placée dans la zone maximale.



*Figure III.12 : Machine de pliage universelle de type Z1200 ZWICK/ROELL*

### III.2.4. Essais de résilience

L'essai de résilience est un complément à l'essai de traction. Il s'agit de rompre en un seul coup une éprouvette entaillée afin de mesurer l'énergie nécessaire pour effectuer cette rupture. Cet essai est réalisé sur un mouton-pendule.

#### III.2.4.1. L'éprouvette de résilience

L'essai est fait sur une éprouvette de l'entaille V, les dimensions géométriques de cette éprouvette est illustré dans la figure III.13.

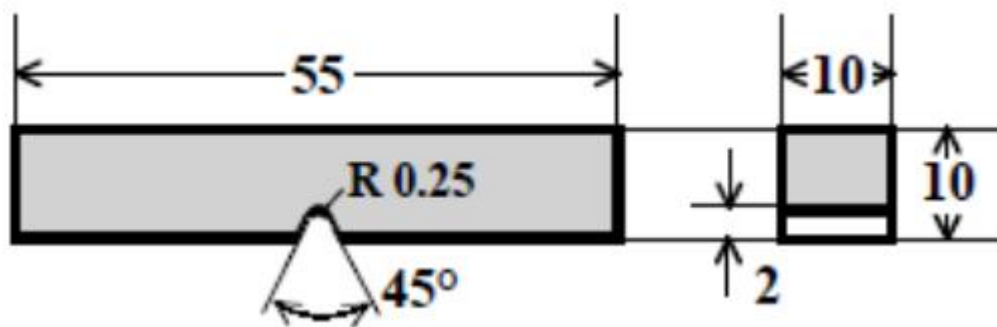


Figure III.13 : Description dimensionnelle d'une éprouvette de résilience de l'entaille V

#### III.2.4.2. Principe de l'essai

L'essai de flexion par choc sur éprouvette entaillée a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale. Il est fréquemment appelé essai de résilience Charpy ou même essai Charpy (figure III.12). Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. On utilise un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. Les nouvelles machines sont munies d'un afficheur numérique Permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette. Pour le calcul de résilience en utilise l'équation suivant :

$$K = \frac{\text{énergie observée (W)}}{\text{section à la droite de l'entaille}} \text{ en } (J/cm^2)$$

$$\text{Énergie observée (W)} W = mg (h_0 - h_1)$$

$m$  : masse du mouton-pendule

$g$  : accélération de la pesanteur (environ  $9.81 \text{ m s}^{-2}$ )

$h_0$  : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ

$h_1$  : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée

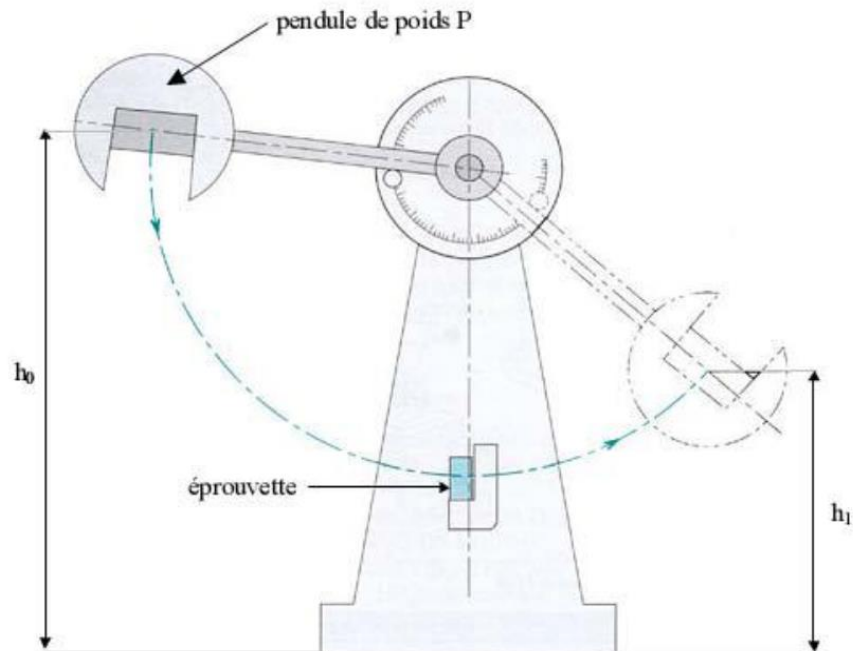


Figure III.14 : Mouton de Charpy.

### III.2.4.3. Caractéristique obtenue lors d'un essai de résilience

La résilience caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (épreuve sur deux appuis, voir figure II.15).

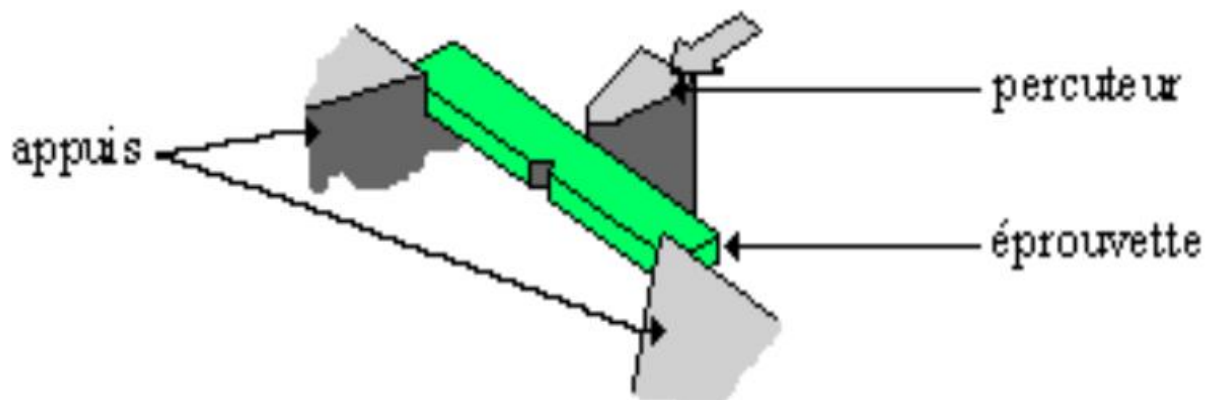


Figure III.15 : principe du choc Charpy.

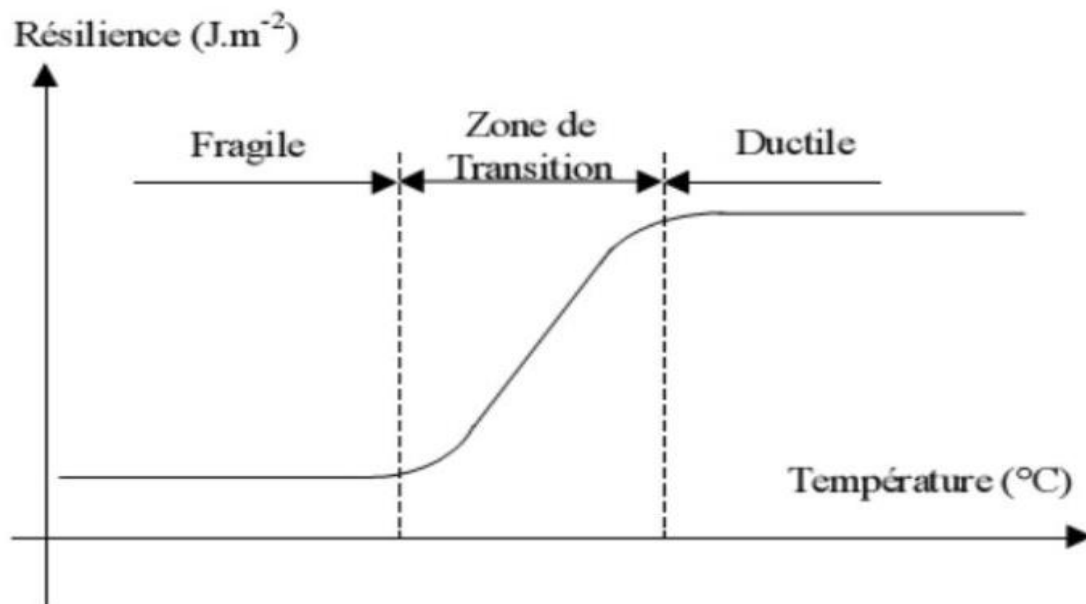
La résistance au choc Charpy d'une éprouvette représente l'énergie de choc absorbée par la rupture de l'éprouvette, rapportée à la section droite initiale de l'éprouvette, et s'exprime en  $J/cm^2$ .

#### III.2.4.4. Effet de la température d'essai

Lorsque l'on fait varier la température d'essai, on constate que :

La limite d'élasticité et la résistance à rupture évoluent en sens inverse de la température

Les caractéristiques de ductilité (allongement à rupture et coefficient de striction) varient dans le même sens que la température. Si l'on représente sur un graphique les variations de l'énergie de rupture mesurée en fonction de la température d'essai, on obtient la courbe de transition suivant (figureII.16)



*Figure III.16 : Exemple de courbe de résilience*

Cette courbe permet de distinguer trois zones de température :

- La zone à basse température est celle où la rupture est fragile,
- La zone à température plus élevée est celle où la rupture est ductile,
- Enfin la zone de transition est celle où la rupture est mixte.

Au-dessus de la température de transition, on dira que la rupture est de type ductile, en dessous, qu'elle est de type fragile.

Si l'on regarde l'aspect de la surface de rupture des éprouvettes essayées aux diverses températures (appelée aussi « faciès de rupture »), on constate que le faciès change avec la température :

- Quand la rupture est ductile, on observe un faciès strié (nerfs) et l'on constate qu'il y a eu striction (rétrécissement de section) avant la rupture.
- Quand la rupture est fragile, on observe un faciès à grains et l'on ne décele pas de déformation plastique généralisée de l'éprouvette.
- Pour une rupture mixte (fragile/ductile), on peut définir un « pourcentage de cristallinité » comme le rapport : surface à grain / surface totale.

### III.2.4.5. Les équipements d'essai

Ces essais ont été effectués sur un mouton Charpy V (figure II.17) dont la capacité maximale est de 750J de type PSW750 ZWICK/ROELL. Nous avons effectué des essais à différentes température (20°C, 10°C, 0°C, -10°C, -20°C) au laboratoire d'ALFAPIPE ANNABA.



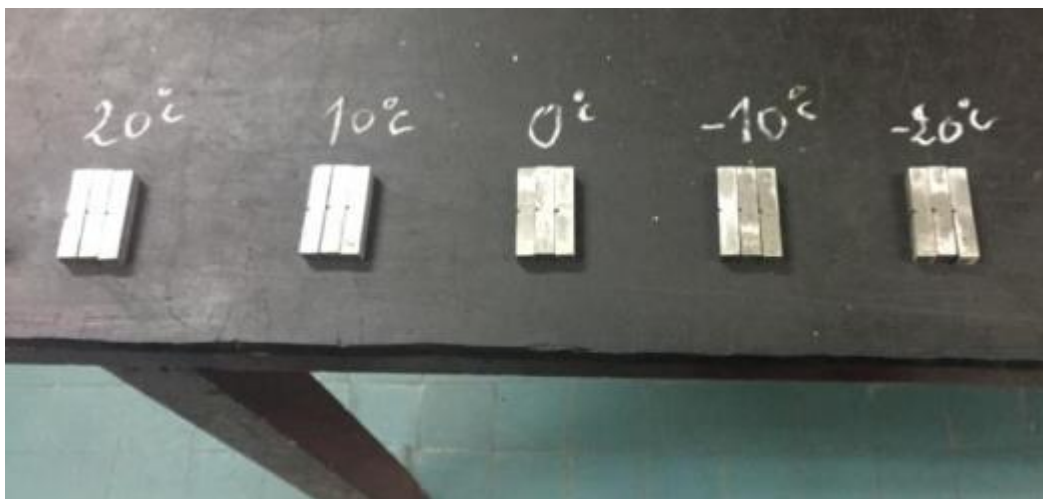
*Figure III.17 : Machine de résilience universelle de type PSW750 ZWICK/ROELL*

Le laboratoire dispose aussi d'un Cryostat qui est utilisé pour obtenir les températures voulues pour la réalisation des essais (figure II.18).

Dix-huit (18) éprouvettes ont été préparées : six éprouvettes usinés à partir du métal de base (MB), six autres prisent au niveau du cordant de soudure (MD) et les six dernières éprouvettes prélevées dans la zone affectée thermiquement (ZAT) (figure II.19).



**Figure III.18** : Cryostat (ALFAPIPE, ANNABA)



**Figure III.19** : Configuration des éprouvettes de résiliences

### III.2.5. Essais de dureté Vickers

L'essai de dureté est un essai qui caractérise la surface du matériau. C'est un essai simple et rapide à mettre en œuvre, y compris dans des conditions de production. Il ne permet pas de déterminer des caractéristiques fondamentales du matériau, mais il permet de comparer plusieurs matériaux entre eux, et de suivre l'évolution d'un matériau en cours de traitement. L'essai consiste à créer une empreinte avec un objet sous une certaine charge. Le degré de dureté obtenu est corrélé avec la limite élastique  $R_e$  et la limite à la rupture  $R_m$ .

Il existe plusieurs essais normalisés. Dans tous les cas :

- L'objet doit être stable, la direction de pénétration doit être perpendiculaire à la surface
- La surface doit être plane sur la partie mesurée, et débarrassée de matériaux étrangers, comme par exemple les oxydes.

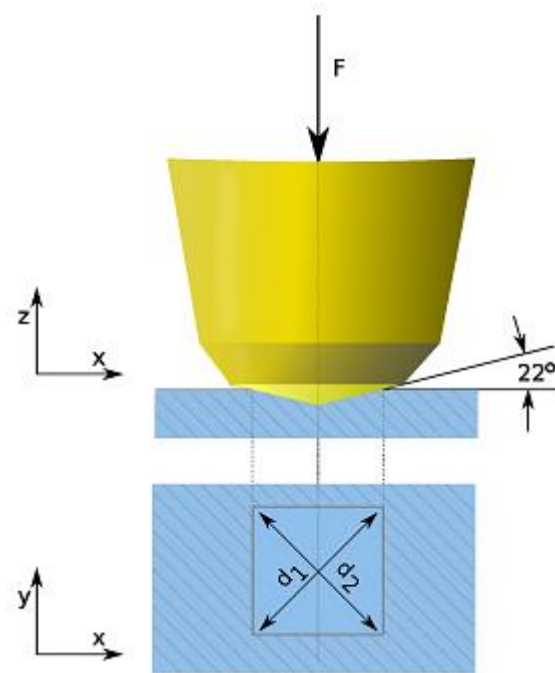
#### III.2.5.1. Principe de l'essai

Le principe de mesure de la dureté Vickers (figure II. 20) se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre face égal à  $136^\circ$ . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur  $d$  en effectuant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ . C'est ( $d$ ) qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

La dureté Vickers HV est le quotient de la charge d'essai  $F$  par l'aire de l'empreinte de diagonale moyenne  $d$ , c'est-à-dire :

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

- $H_V$  : dureté Vickers
- $d_1$  et  $d_2$  : mesure de l'empreinte réalisée à  $90^\circ$  (2 diagonales du carré de l'empreinte) (mm)
- $F$  : charge d'essai (N)
- $g$  : accélération de la pesanteur



*Figure II. 20 : Principe de la mesure de dureté par la méthode Vickers*

### III.2.5.2. Machine d'essai

L'essai de dureté, Vickers, a été effectué conformément aux normes API 5L, à l'aide d'un duromètre de type : ZWICK B3212003HV à chargement manuel et assistée par ordinateur (figure II. 21).

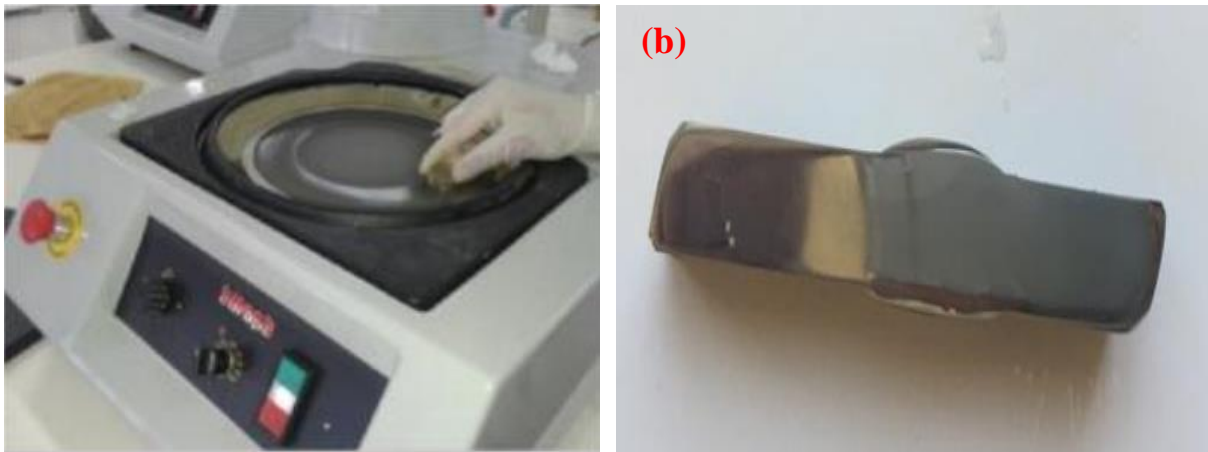


*Figure II. 21 : Principe de la mesure de dureté par la méthode Vickers*

### III.2.5.3. Mesures et filiations de dureté et micro dureté

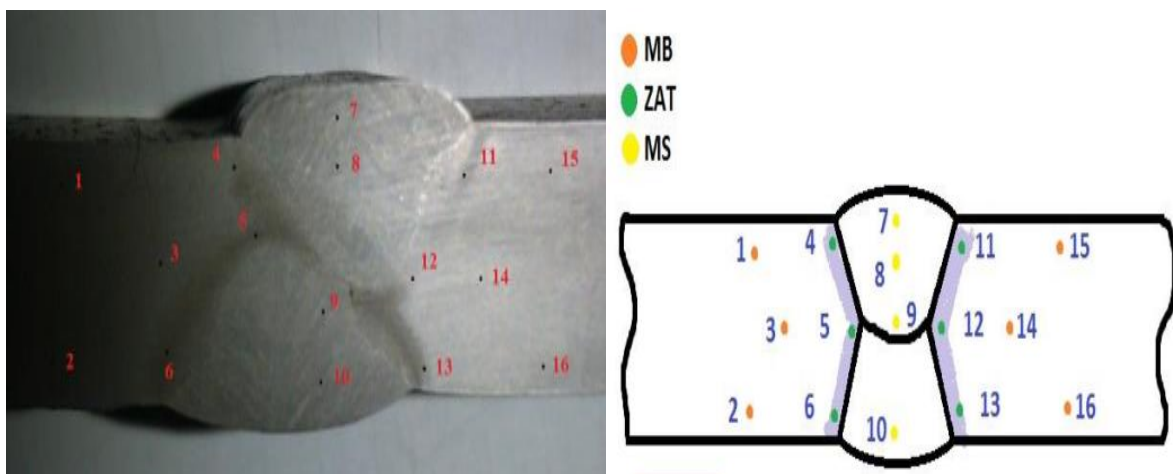
Les éprouvettes destinées aux mesures de dureté sont prélevées après les éprouvettes de traction et de pliage sur le reste du tube soudé de la même manière que celles-ci.

Le profil de dureté nécessite la préparation l'éprouvette de dimension 50mm × 30mm par des polissages par meulage à l'eau à l'aide de papiers abrasifs à indice de granulation croissante jusqu'à 600, on prépare uniquement la face qui permette une mesure précise des dimensions des empreintes de dureté (figure III. 22 (a), (b)).



**Figure III. 22 :** (a) L'opération de polissage (b) L'échantillon après l'opération de polissage

Les mesures et filiations de dureté sont prises sous une charge de HV10 (appliquant une masse de 10 Kg) dans les 16 points (Norme API 5L) comme l'indique la figure III. 23, elles permettent de suivre l'évolution de la dureté.



**Figure III. 23 :** Variation de dureté Vickers dans les trois zones.

- Les points (1, 2, 3, 14, 15,16) sont appliqués sur le métal de base (MB).

- Les points (7, 8, 9,10) sont appliqués sur la soudure ou bien sur la zone fondue (ZF).
- Les points (4, 5, 6, 11, 12,13) sont appliqués sur la zone de transition ou bien sur la zone affectée thermiquement (ZAT) [20].

### **II.3. Conclusion du chapitre**

La qualité des tubes en spirale fabriqué par ALFAPIPE est basée sur le respect des exigences de la norme Américaine API 5L (Américaine pétroleur Institut), qui passe par plusieurs étapes de contrôle, de la fiabilité du processus de fabrication et de bonne formation d'équipes de service maintenance et production.

La qualité des tubes soudés en spirale fabriqué par ALFAPIPE est basée sur le contrôle dès la réception de la matière première (bobine) jusqu'au produit fini (tube).

Le respect des procédures de contrôles, des normes, des références et des spécifications du client a permis à ALFAPIPE 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 IV*

*Résultats et Discussions*

# Chapitre IV

## Résultats et Discussions

### Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons et discuterons des différents résultats obtenus après l'étude expérimentale de l'acier X70 au laboratoire des essais mécaniques de l'entreprise ALFAPIPE Annaba, ces essais sont effectués durant la chaîne de fabrication des tubes métalliques (pipeline).

### IV.1. Essais de contrôle destructif

#### IV.1.1. Analyse chimique de l'acier X70

La composition chimique de l'acier X70 utilisé dans la fabrication du tube fourni selon cette spécification doit être conforme aux exigences de l'API 5L. La composition chimique de l'acier étudié X70 est donnée dans le tableau IV.1.

**Tableau IV.1 :** Résultats de l'analyse chimique sur métal de base

<b>Fe : 97.9 %</b>	<b>C : 0.071%</b>	<b>Si : 0.221 %</b>	<b>Mn :1.64 %</b>	<b>P : 0.012 %</b>	<b>S : 0.002%</b>
<b>Cr : 0.02 %</b>	Mo :0.003%	Ni : 0.014%	Al : 0.029%	B: 0.000 %	Cu : 0.011%
<b>V : 0.002 %</b>	Nb : 0.070%	Ti : 0.010 %	Sn : 0.002%	W : 0.004%	Co : 0.003%
<b>C eq % : 0,164</b>					

La formule pour calculer le carbone équivalent est donné dans API 5L par :

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

Le C.E.P<sub>cm</sub> est une formule métallurgique qui permet d'évaluer le risque de fissuration après soudage, dans la zone affectée par la chaleur (ZAT). Le C.E.P<sub>cm</sub> est le « facteur de

susceptibilité aux fissures », après le soudage l'acier X 70 s'y prête bien à la soudabilité sans risque de fissuration du fait que  $C.E.P_{cm} < 0.25\%$ . L'analyse chimique a révélé que cette valeur est de 0.164, ce qui lui donne la réputation de « acier totalement soudable ».

D'après les résultats donnés dans le tableau IV.1 nous pouvons constater que :

- a) La faible teneur en carbone ( $\%C \leq 0.10$ ) est nécessaire pour améliorer la soudabilité et la résilience d'acier.
- b) Les éléments de micro-alliage sont le niobium, le titane et le vanadium ( $Nb + Ti + V \leq 0.15\%$ ), mais l'élément qui a un grand effet est le niobium. Ces éléments contribuent à l'amélioration de la limite d'élasticité, la dureté, la résilience et la soudabilité.
- c) Le niobium et le vanadium participent à la formation de carbures et carbonitrides. Ces précipités très fins, bien dispersés dans la ferrite, engendrent un durcissement important qui est utilisé pour la fabrication des aciers à haute limite d'élasticité. À teneur en carbone identique, le durcissement obtenu est plus important ; à caractéristiques de résistance identiques, on peut diminuer la teneur en carbone [21]. Le Nb améliore les propriétés structurales et mécaniques de l'acier par trois mécanismes. D'abord, il affine les grains austénitiques et ferritiques pendant le laminage en empêchant la recristallisation et la croissance de grain. En second lieu, il supprime la nucléation de la ferrite polygonale par son effet fort de trempabilité. Troisièmement, le niobium augmente la dureté par la précipitation des particules ultra fines de Nb (C, N) pendant le refroidissement à la température de laminage de finition ou pendant un traitement suivi d'un revenu.
- d) Le manganèse remplit la fonction d'augmenter la température de transformation pour favoriser la formation de la ferrite aciculaire et de diminuer la tendance de précipitation de Nb (C, N) dans l'austénite en augmentant le produit de solubilité. Le manganèse semble également avoir un effet en soi bénéfique sur la dureté. La teneur de manganèse a été limitée par 1.52 % dans la norme pour empêcher la formation des phases dures comme la bainite et le composé (M-A) susceptible de former des zones fragiles.
- e) Le nickel est un élément gamma-gène, donc il diminue la température de la transformation

$\alpha \rightarrow \gamma$  et favorise la formation de la ferrite aciculaire.

- f) Le cuivre ayant aussi plusieurs effets :

- Il augmente la quantité de la ferrite aciculaire aux dépens d'autres constituants, et affine la microstructure dans toutes les zones du métal de soudure.
- g) Le silicium favorise la formation de la ferrite polygonale par l'augmentation de la température de la transformation :  
 $\alpha \rightarrow \gamma$  parce qu'il est un élément alpha-gène.
- h) Le rôle principal du molybdène est celui d'un agent de trempabilité, favorisant la formation de la ferrite aciculaire et empêchant la formation de la ferrite polygonale et de la perlite [22].

### IV.1.2. Essai de traction

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques (la résistance ultime à la traction, la limite apparente d'élasticité à 0.5% et l'allongement caractéristiques pour le métal de base et la résistance à la traction du cordon de soudure).

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

L'essai s'effectue sur la machine MOHR d'une capacité maximale 600 kN à une température ambiante.

On utilise deux types éprouvettes normalisées selon la norme API 5L : Une éprouvette pour le métal de base (TN) et l'autre pour le cordon de soudure(TS).

Les résultats obtenus sont dans le tableau IV.2 :

**Tableau IV.2:** Résultats d'essais de traction

Légende	Sous_serie1 N°	Désignation éprouvette	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	R <sub>e0.5</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>e0.5</sub> / R <sub>m</sub>	A (%)
	max			635	760	0.90	100
	min			485	570	00	22
	1.1	TN	548	544	660	0.82	37
	1.2	TS	545	464	707	0.91	24

Les propriétés essentielles obtenues sont conformes aux caractéristiques mécaniques fournies par le fournisseur et à la norme API.

Le diagramme de la figure IV.2 montre la courbe de l'essai de traction sur le métal de base X52M et de l'éprouvette extraite d'un tube soudé automatiquement (SAW).

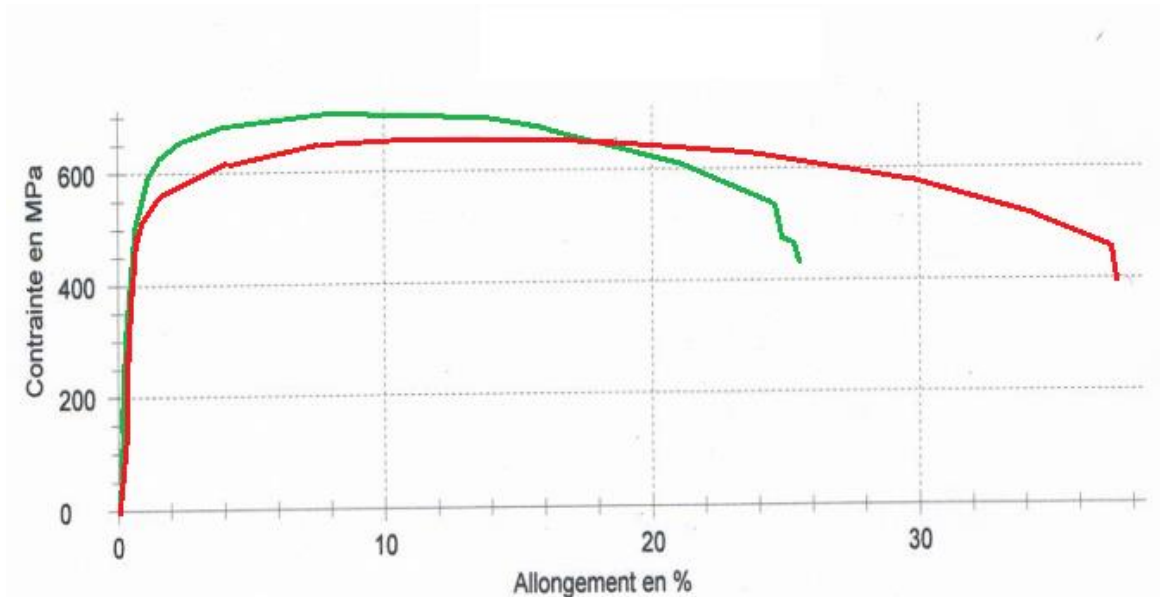


Figure IV.2: Evolution de la Contrainte en fonction de la déformation

Pour le cas de traction du métal de base (couleur rouge) soit une traction normale ; la courbe représentée dans la figure IV.2 présente la même allure qu'une courbe de traction conventionnelle, la transition élasto-plastique se fait de manière progressive. La limite d'élasticité est alors définie de façon conventionnelle  $Re_{0,5}$ . Elle est mesurée pour une valeur de 0,5% d'allongement.

La courbe de traction représentée sur la figure IV.2 montre trois domaines :

- Un domaine linéaire où l'éprouvette s'allonge de manière élastique et réversible en deçà d'une valeur critique c'est-à-dire la limite élastique  $Re_{0,5}$ .
- Un domaine parabolique caractéristique d'une déformation plastique et irréversible, au-delà de cette valeur critique. La déformation est uniformément répartie et conduit à un allongement de l'éprouvette.
- Un domaine de décroissance de la charge, lorsque la déformation se localise au-delà du point de striction.
- Le point de rupture, pour lequel l'allongement de l'éprouvette est ultime.

- Les caractéristiques mécaniques statiques c'est-à-dire les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance maximale à la traction pour l'éprouvette de métal de base est supérieures aux valeurs minimales indiquées par la norme API 5L (tableau IV.2).
- Le rapport de la limite élastique à la charge de rupture pour l'éprouvette d'essai ne dépasse pas 0,90.

Donc nous pouvons conclure que notre matériau est conforme aux normes API 5L, ce qui nous permet de dire que cet acier est ductile, rigide et résistant à la rupture.

On teste sur la machine de traction l'éprouvette représentée sur la figure IV.3.



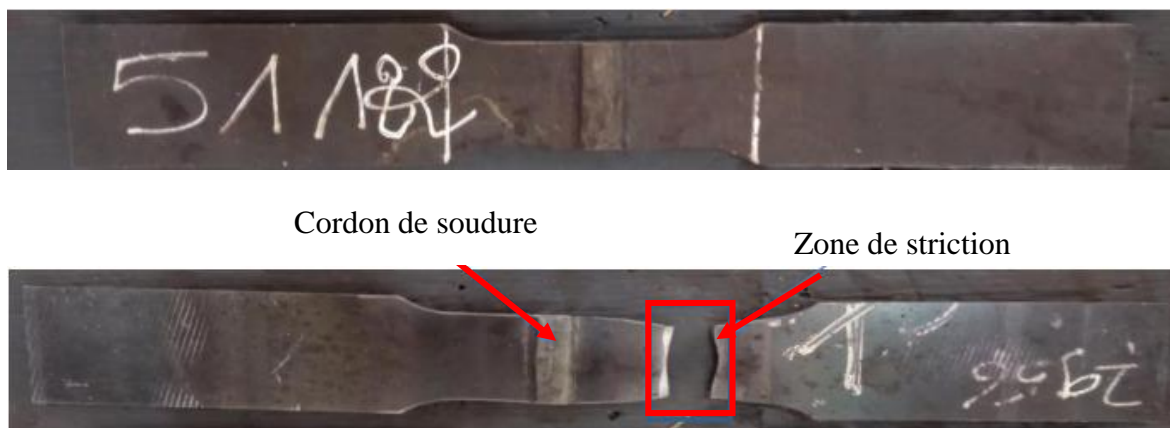
**Figure IV.3:** Traction de métal de base

Par mesure de sécurité et conformément aux normes exigées, un essai de traction sur éprouvette contenant le cordon est réalisé avec le même protocole avec l'essai précédent, le but est de vérifier que la rupture se fait à l'extérieur du cordon. On mesure dans ce cas aussi la limite d'élasticité et la résistance à la rupture.

Les valeurs de  $R_e$  et  $R_m$  obtenues de cet essai sont supérieures à celles obtenus dans l'essai de traction sur les éprouvettes du métal de base ce qui montre que la rupture se fait effectivement hors cordon de soudure, Cependant, l'allongement est moins important que celui du métal de base. Cela est dû probablement aux défauts existants dans la soudure et aux traitements locaux.

En générale, les résultats sont en adéquation avec ceux exigés par la norme. De ce fait, on dira que l'énergie de soudage adoptée est favorable pour ce procédé (SAW).

Ce résultat est confirmé par la visualisation des éprouvettes du cordon de soudure après rupture (figure IV.4).



**Figure IV.4:** Eprouvette avec cordon de soudure avant et après rupture

### IV.1.3. Essai de pliage

Un protocole d'essais de pliage sur une éprouvette qui contient un cordon de soudure a été réalisé selon la norme API 5L.

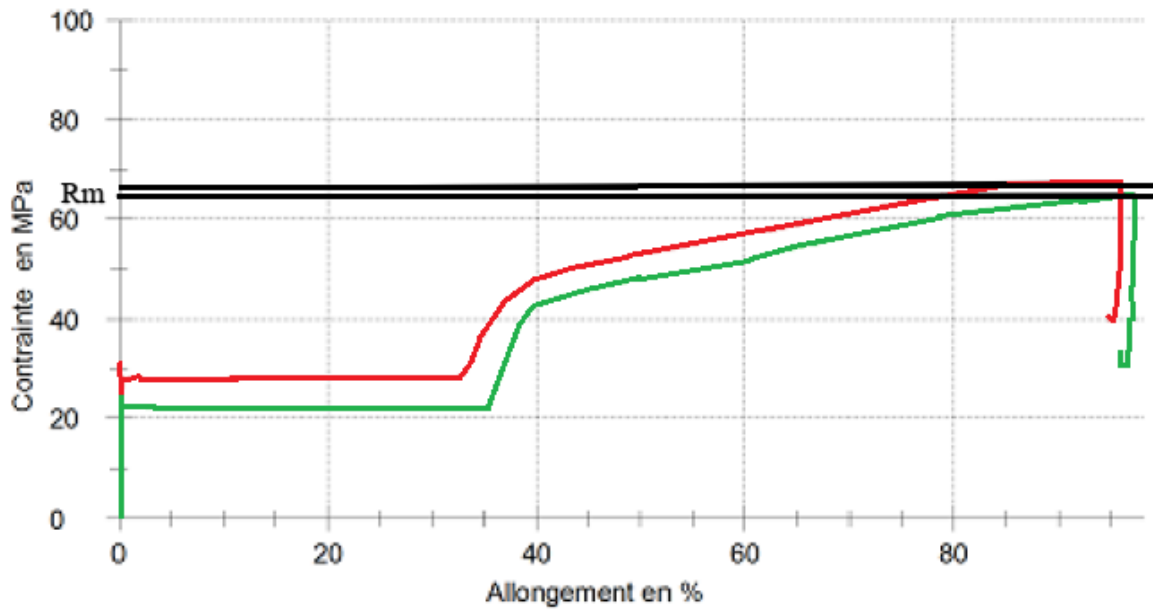
Cet essai a pour le but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc de vérifier la ductilité. Le pliage se fait endroit (ED) et envers (EV), et les résultats sont un jugement visuel sur l'aspect de la surface pliée. Le cordon de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts.

Les résultats obtenus sont dans le tableau IV.3 :

**Tableau IV.2:** Résultats d'essais de pliage

Légende	Désignation éprouvette	R <sub>m</sub> (MPa)	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>
	ED	67.8	7.1	38	269.80
	EV	65.1	7.1	38	269.80

Le diagramme de la figure IV.5 montre la courbe de l'essai de pliage un pli à l'endroit (ED) et l'autre à l'envers (EV).



*Figure IV.5: Graphe de pliage*

En générale les essais de pliages de deux cas (envers et endroit) sont des examens visuels, Dans notre contrôle, on observe qu'il n'y a aucune fissure dans les 3 zones des éprouvettes : métal de base, ZAT et la ZF comme indique dans la figure IV.6.



*Figure IV.6 : Eprouvettes de pliage ED et EV après l'essai*

#### IV.1.4. Essai de résilience

Le test de résilience consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie  $W$  absorbée exprimée en joule dont on déduit la résilience  $K$ .

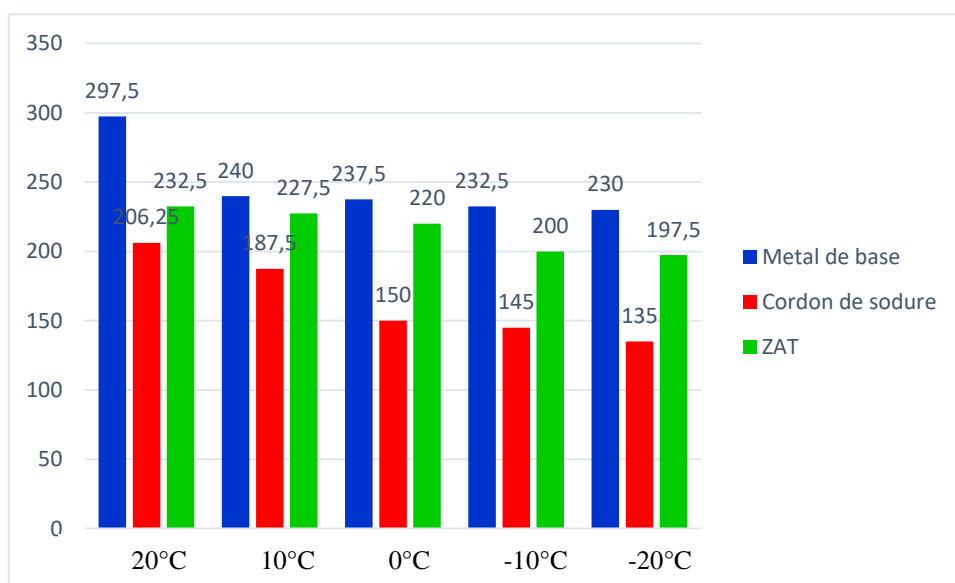
Ces essais sont effectués sur une machine Charpy dont la capacité maximale est de 300J, à différente température comprise entre  $[-20\text{ C}^\circ ; +20\text{ C}^\circ]$  au laboratoire de l'essai mécanique ALFAPIPE, conformité à la norme API 5 L X70.

Les résultats obtenus après l'essai de résilience de différentes zones de la soudure SAW sont représentés dans le tableau IV.4.

**Tableau IV.4 :** Les résultats des essais de résilience en  $J/cm^2$

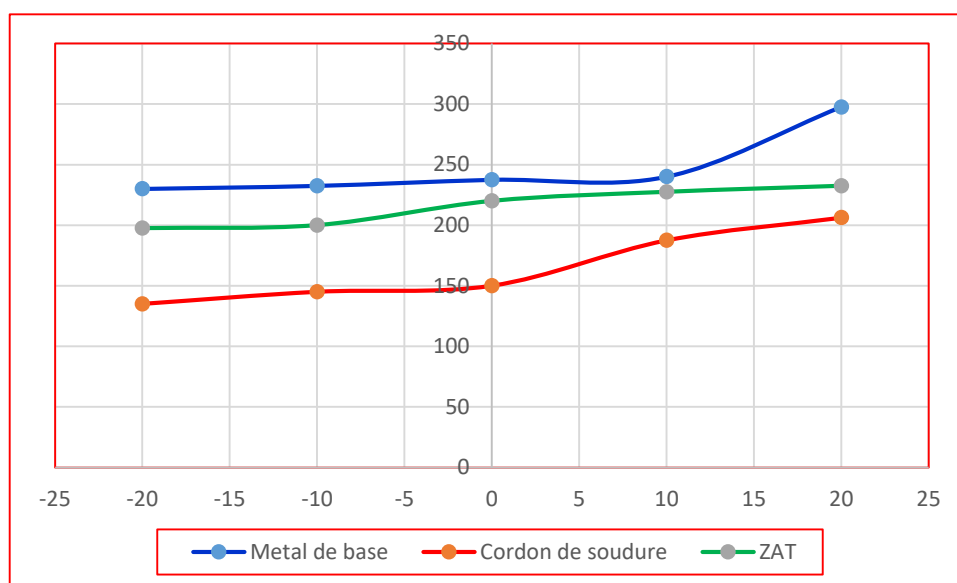
Température ( $^\circ\text{C}$ )	Métal de base ( $J/cm^2$ )	Cordon de soudure ( $J/cm^2$ )	ZAT ( $J/cm^2$ )
20	297,5	206,25	232,5
10	240	187,5	227,5
0	237,5	150	220
-10	232,5	145	200
-20	230	135	197,5

L'histogramme sur la figure III.6 représente les résultats des essais de résilience en Joule/cm<sup>2</sup>.



**Figure IV.6:** Résultats des essais de résilience en Joule/cm<sup>2</sup>

Le diagramme de la figure IV.7 montre la courbe des essais de résilience a différentes températures sur le métal de base, cordon de soudure et la ZAT.



**Figure IV.7:** Courbe des essais de résilience a différentes températures

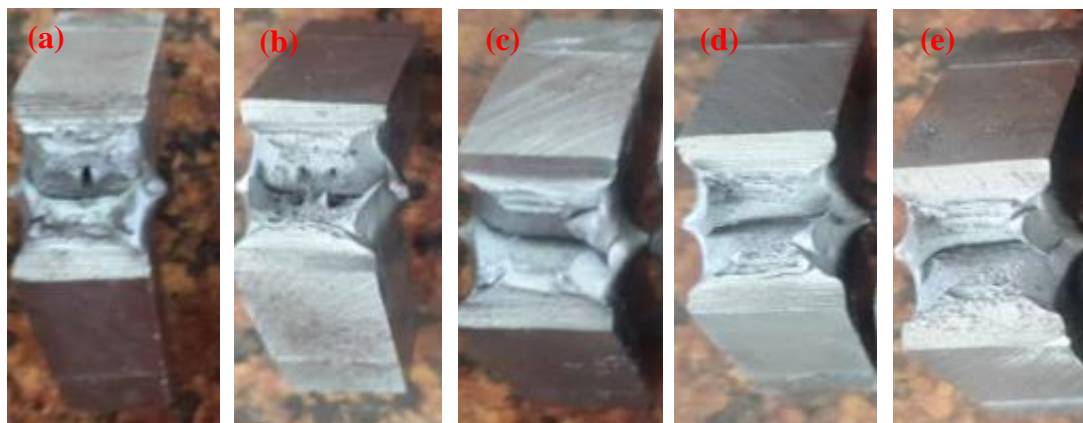
Les figure IV.6 et figure IV.7 présentent les résultats de l'énergie de rupture absorbée pour le métal de base, le métal fondu et la zone affectée thermiquement pour différentes températures (20°C, 10°C, 0°C, -10°C, -20°C).

D'après Les figure IV.6 et figure IV.7, le métal de base et la zone affectée thermiquement (ZAT) montre une excellente résilience par rapport à la zone fondue.

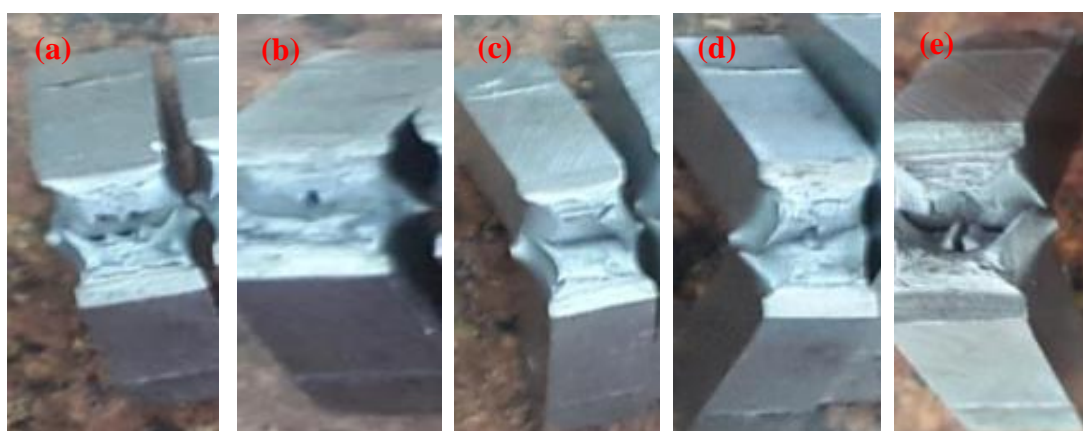
On observe quel que soit la température à laquelle l'essai a été réalisé que le métal de base absorbe une grande énergie, cette énergie élevée peut être attribuée par sa microstructure constituée de grains fins et irréguliers de ferrite aciculaire. Les basses valeurs d'énergie absorbée par la zone fondue comparée aux deux autres zones (MB et la ZAT) peuvent être liées à sa microstructure à caractère de solidification primaire : Grains assez gros avec une texture prononcée. Cette microstructure offre une faible résistance à la propagation des fissures .

En outre, on peut constater aussi quel an ductilité diminue en s'approchant du cordon de soudure du fait que la ZAT est plus ductile que le cordon de soudure et moins ductile que le métal de base.

Les figure IV.8 et figure IV.9 montrent des faciès de rupture pour différentes températures (20°C, 10°C, 0°C, -10°C, -20°C) de type ductile en raison de l'apparition des cupules sur les bords des éprouvettes ayant subi cet essai.



**Figure IV.8:** Éprouvette de résilience après la rupture à différentes températures pour le métal de base (a)-20°C (b)-10°C (c) 0°C (d)10°C (e)20°C.

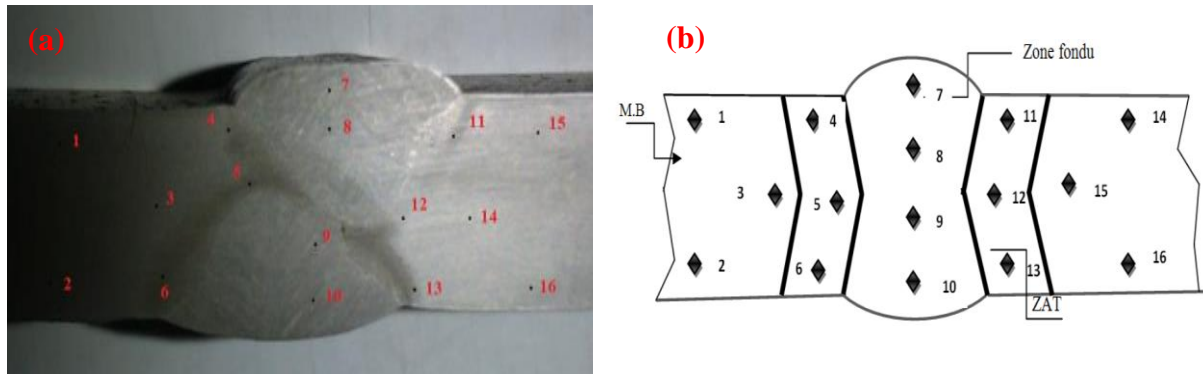


**Figure IV.9:** Éprouvette de résilience après la rupture à différentes températures pour le cordon de soudure (a)-20°C (b)-10°C (c) 0°C (d)10°C (e)20°C.

#### IV.1.5. Essai de dureté Vickers

Dans cette partie, la variation de la dureté dans les trois zones (MB, ZAT, MF) a été mesurée avec la machine (ZAWICK) Z HV10, étalonnée et certifiée, du laboratoire ALFAPIPE. La machine est assistée par ordinateur, et permet de tracer la filiation de la dureté. Les charges appliquées varient dans la plage : charge maximale 10 Kg et charge minimale 200g.

La figure IV.10 représente une éprouvette avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers et les points utilisés pour cet essai de sorte que les indentations (1, 2, 3, 14, 15, 16) sont appliquées dans le métal de base (MB). Les indentations (7, 8, 9, 10) sont appliquées sur la soudure ou dans le métal fondu (MF). Les indentations (4, 5, 6, 11, 12, 13) sont appliquées dans la zone de transition ou bien dans la zone affectée thermiquement (ZAT).



**Figure IV.10 :** (a) Eprouvette avec joint de soudure bout à bout pour la dureté Vickers (Acier X 70) (b) Points de mesures de la dureté

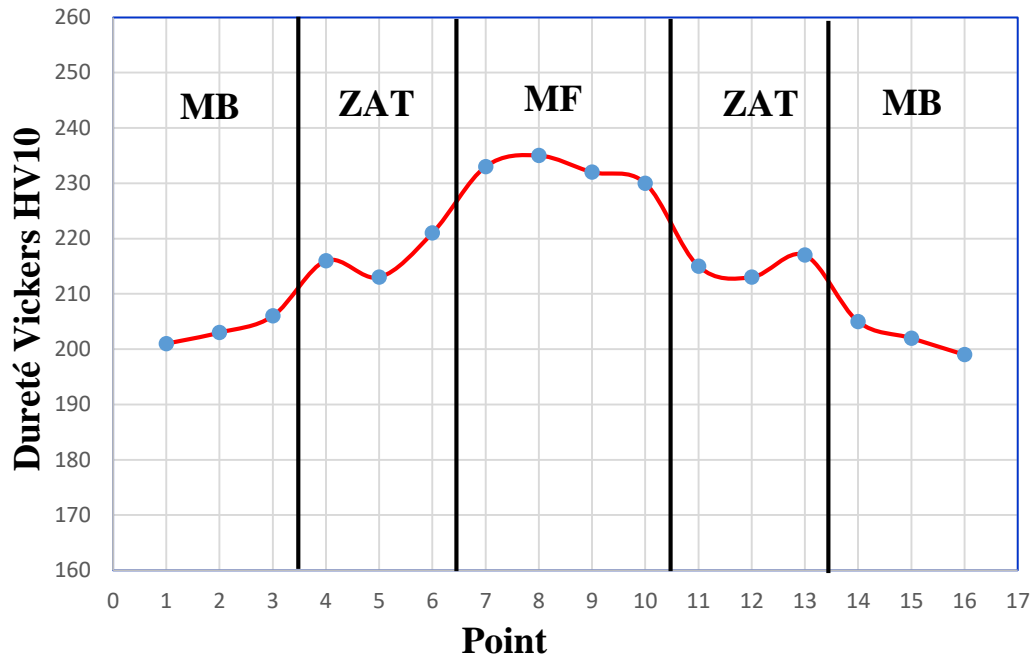
La charge utilisée est de 10 Kgf (la dureté Vickers est notée HV10) avec une pénétration de 20 secondes. Les résultats de l'essai sont représentés sur le tableau IV.6.

**Tableau IV.6 :** Résultats de dureté Vickers HV10.

Essai de la dureté Vickers (Acier X70) nuance : X70 HV10(N/mm <sup>2</sup> )	MB		ZAT		MF	
	N° Le point	Valeurs dureté	N° Le point	Valeurs dureté	N° Le point	Valeurs dureté
	1	201	4	216	7	233
	2	203	5	213	8	235
	3	206	6	221	9	232
	14	205	11	215	10	230
	15	202	12	213	/	
	16	199	13	217	/	

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

On trace à l'aide du logiciel Excel, la courbe décrivant l'évolution de la dureté en fonction de la position, on obtient le graphe de la figure IV.11.



**Figure IV.11:** Courbe décrivant l'évolution de la dureté en fonction de la zone

On constate à partir de la courbe, que les duretés sont différentes et varient en fonction des zones, on retrouve dans un premier temps une dureté plus ou moins basse du métal de base qui varie entre 199 et 206 HV pour croître une fois dans la ZAT jusqu'à 221 HV, elle reprend ensuite de l'élan dans la zone fondue avec un pic d'une valeur de 235 HV.

La dureté élevée au niveau de la zone fondue (235 HV) est dû d'une part à la différence de la composition chimique entre le métal d'apport et le métal de base, mais encore de la fusion du métal, ensuite sa solidification qui a permis de former des précipités de carbures de Niobium et carbures de Vanadium. Par le même effet, un affinement des grains est observé.

## **IV.2. Conclusion du chapitre**

Ce travail a été mené principalement à une étude des caractéristiques mécaniques le soudage de l'acier X70 au procédé SAW (traction, pliage, résilience et dureté).

A l'issue des résultats obtenus j'ai pu tirer les conclusions suivantes :

- Les analyses chimiques confirment la conformité du matériau par rapport aux normes.
- Le soudage de l'acier X70 au procédé SAW donne d'assez bonnes propriétés mécaniques.
- La traction des échantillons sans soudure permet de caractériser le matériau de base alors que les éprouvettes soudées permettent de confirmer que la rupture s'effectue dans le matériau de base loin des zones soudées.
- Le pliage confirme la non présence de fissures entre la soudure et le matériau de base.
- Les essais de résilience ont montré que le matériau a une bonne résilience à basse température.
- La dureté permet de révéler que le matériau de la zone soudée est plus dur que le matériau de base.



*Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

Le travail réalisé a été très bénéfique, il nous a permis d'acquérir et d'enrichir nos connaissances sur le soudage en général. Il a aussi été une occasion de découvrir les techniques et équipements expérimentaux utilisés tel que le spectromètre à émission optique à source étincelle (analyse chimique) et les essais mécaniques (essais de traction, pliage, résilience et dureté).

L'analyse chimique réalisé dans cette étude a montré que la composition chimique est conforme aux exigences de la norme API, et ne dépasse pas les maximums spécifiés. Le taux de carbone équivalent et la teneur en éléments d'inclusion est très faible, ce qui traduit une bonne soudabilité de l'acier X70.

Dans la partie des essais mécaniques nous avons utilisés quatre types des essais, cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Dans les essais de traction, nous avons analysé les paramètres fixés par la norme ( $R_{e0.5}$ ,  $R_m$ , et  $A$ ). Nous avons trouvé que ces propriétés répondaient à la norme pour les essais effectués sur le métal de base (TN) et le joint de soudure (TS). Bien que la rupture dans l'éprouvettes soudée confirme que la rupture s'effectue dans le matériau de base loin des zones soudées.
- Aucune fissuration notable n'est rencontrée après l'essai de pliage.
- L'essai de résilience permet de confirmer que l'acier X70 utilisé pour la fabrication des tubes soudés en spirale résistent bien aux chocs et aux basses températures, donc ils ont de bon comportement pour la canalisation enterrée.
- Pour la mesure dureté, nous avons exploité 3 essais comportant chacun 16 mesures normalisées. Les valeurs élevées sont enregistrées dans la soudure (S) et les plus faibles sont dans le métal de base (M). On remarque que les valeurs ont des écarts-types très petits ce qui veut dire que les mesures sont plutôt précises reproductibles.



*Références*

# Références

- [1] Documentaire présentation ALFAPIPE Annaba.
- [2] PDF Acier de construction présentation, ds.Arcelormittal.com.
- [3] Documentaire HLE ALFAPIPE Annaba.
- [4] Bouchellilga Hocine, identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 d'ALFAPIPE,2016.
- [5] Nouadria Fatima, étude les effets de la réparation de la soudure sur les propriétés mécaniques des pipelines, 2016.
- [6] Techniques de l'ingénieur, soudage
- [7] Défauts lors du soudage TIG, MIG/MAG et à l'arc submergé. Ir. R. Vennekens, IWE, CEWE, FWeldI, Ing. Tom Vandewijngaert, IWE Institut Belge de la Soudure, Service Guidance Technologique (Service subventionné par l'IWT-Vlaanderen et la Région Wallonne) (Traduction: M.C. Ritzen – I.B.S.).
- [8] Alain MICHEL, Pièces mécaniques soudées - Procédés, définitions et règles de qualité, Techniques de l'ingénieur, soudage, 2021.
- [9] G Murry, Aide-mémoire Métallurgie, Métaux • Alliages • Propriétés, 2e édition Dunod, 2010.
- [10] Marc Grumbach, Techniques de l'Ingénieur, Métallurgie M 305.
- [11] M. Durand-Charre, La microstructure des aciers et des fontes Genèse et interprétation, édition SIRPE 2003
- [12] Adapté du BinaryAlloy Phase Diagrams, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990.
- [13] William D. Callister Jr, Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2007
- [14] M. Colombié et all, Matériaux Métalliques, 2ème édition, DUNOD 2008
- [15] [Data prise de MetalsHandbook: traitement thermique, Vol. 4, 9e édition, V. Masseria (Rédacteurs en chef), American Society for Metals, 1981, p. 9.
- [16] F. B PICKERING, High strength, low alloy steels – A decade of progress, Microalloying 75, 1975.

- [17] F. B PICKERING, High strength, low alloy steels – A decade of progress, Microalloying 75, 1975
- [18] S. BELAKOWSKY. « Soudage et collage ». DUNOD. Paris. 1990.
- [19] D. SEFERIAN. « Métallurgie de la Soudure ». FUNOT. 1982.
- [20] UBS/ENSIBS année 2007/2008 Essai de dureté Vickers.
- [21] Michel Colombié, "Matériaux Métalliques", 2eme édition, Dunod, Paris, 2008.
- [22] N. Mustapha, "Evolution de la microstructure et des propriétés mécaniques de l'acier X70 lors des réparations par soudage", ENP Alger, 2009.