

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

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



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم علوم وتكنولوجيا

Département des Sciences et Technologie

**Master**

**Domaine:** Sciences et Technologies

**Filière:** électromécanique (maintenance industrielle)

**Spécialité :** Sciences et Technologies

**Thème**

**Effet des traitements thermique sur les propriétés mécanique des assemblages soudés**

**Présenté par :** DJEBRIT Houdaifa

**Prénom et nom** Charef Lotfi

**Prénom et nom** Oulad Naimi Selimane

**Soutenue publiquement le:** 11/06/2022

**Devant le jury composé de :**

**Abderrahmane Bellaouar**

**Pr.**

**Univ.de Ghardaïa**

**Président**

**Aissaoui Faris**

**MCB.**

**Univ.de Ghardaïa**

**Examinateur**

**Oulad Saad Sofiane**

**Grade**

**Université de Laghouat**

**Encadrant**

**Année universitaire : 2021/2022**



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

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



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم علوم وتكنولوجيا

Département des Sciences et Technologie

**Mémoire**

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

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : électromécanique (maintenance industrielle)

Spécialité : Sciences et Technologies

**Thème**

**Effet des traitements thermique sur les propriétés mécanique des assemblages soudés**

**Présenté par : DJEBRIT Houdaifa**

**Prénom et nom Charef Lotfi**

**Prénom et nom Oulad Naimi Selimane**

**Soutenu publiquement le : 11/06/2022**

**Devant le jury composé de :**

<b>Abderrahmane Bellaouar</b>	<b>Pr.</b>	<b>Univ.de Ghardaïa</b>	<b>Président</b>
<b>Aissaoui Faris</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ.de Ghardaïa</b>	<b>Examineur</b>
<b>Oulad Saad Sofiane</b>	<b>Grade</b>	<b>Université de Laghouat</b>	<b>Encadrant</b>

**Année universitaire : 2021/2022**

# *Dédicace*

*Ce travail ne l'aurait pas éclairé sans l'aide de Dieu qui est capable de me donner la santé, le courage, la patience, la volonté et la force pour affronter toutes les difficultés et les obstacles de mon cheminement d'études.*

*Je remercie ma chère mère qui m'a donné tant de courage pour ma réussite. Mon cher père, qui a été un modèle pour moi dans ma vie,*

*Je remercie tous les membres de ma famille (frères, sœurs, oncle et grands-parents)*

*Je tiens également à remercier mes amis, collègues de l'université pour leur patience et leur soutien tout au long des périodes d'études.*

*DJEBRIT Houdaifa*

# *Dédicace*

*Ma Mère, Mon Père*

*Vous représentez pour moi Le symbole de la beauté par excellence,  
La source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé  
de m'encourager et de prier pour moi.*

*Soyez sûrs que je continuerai mon chemin.*

*Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.*

*Puisse ALLAH, le tout puissant, vous préserver et vous accorder  
santé, longue vie et bonheur.*

*A ma sœur*

*A mon frère*

*En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je  
porte pour vous.*

*A tous les membres de ma famille CHAREF, petits et grands*

*A tous mes amis de proches*

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon*

*Affection*

*Charef Lotfi*

# *Dédicace*

*Je dédie mon travail à ceux qui ont sacrifié leur vie pour mon bonheur et ma réussite*

*À ma mère, ' ma raison d'être, ma raison de vivre la lanterne qui éclaire mon chemin et m'illumine de douceur et d'amour.*

*À mon père, source d'affection, d'amour, de générosité et de sacrifice. C'est grâce à toi que je dois toute ma réussite. J'espère que mon travail sera le témoignage de ma gratitude et mon respect le plus profond.*

*Que ce travail a pu voir le jour*

*Oulad Naimi Selimane*

# Remerciement

*Je remercie Dieu le tout Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide et les conseils de ma directrice de recherche*

*Mr. Oulad Saad Sofiane*

*nous le remercie pour son encadrement, son soutien et sa confiance tout au long de cette entreprise qui ont permis la poursuite et la finalisation de ce travail. nous le remercie également pour ses conseils et sa disponibilité pendant la préparation de ce mémoire. nous tiens à exprimer mes profonds remerciements aux membres de jury à l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'évaluer ce travail.*

*Ma reconnaissance et mes sincères remerciements vont à tous les enseignants de Sciences et Technologies à l'université de GHARDAIA .Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.*

## **Résumé**

Les systèmes de pipelines sont utilisés comme la solution la plus économique pour le transport des fluides utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière. Le processus de fabrication majeur représentant la période écoulée depuis la production des tuyaux jusqu'à l'installation de service est le soudage. La zone de soudure représente la zone la plus critique en termes de propriétés des matériaux dans les composants de pipeline respectifs. En plus de la méthode de soudage choisie, la sélection du matériau en acier et des consommables de soudage appropriés pour le matériau sélectionné revêt une importance significative. Aujourd'hui, la plupart des conduites sont fabriquées selon les normes API. Des économies de coûts ont été réalisées grâce à la réduction de l'épaisseur des parois, du transport et des procédés de soudage. Dans cette étude, les propriétés mécaniques d'acier soudé X60 après et avant la réalisation de traitement thermique de recuit qui est généralement utilisé dans l'industrie pétrolière et gazière selon les normes API, ont été examinées. Ensuite, ces aciers ont été assemblés en utilisant le soudage à l'arc électrique. Les zones de soudure et les modifications des propriétés mécaniques ont été étudiées., Les résultats ont montré que la valeur de dureté la plus élevée après avoir effectué un traitement thermique dans la zone de la ligne de soudage 216 HV, la résistance à la traction de l'acier a diminué à 609 MPa lors de la réalisation du traitement thermique par rapport à l'acier contenant des taux de carbone plus élevés 627 MPa. De l'autre côté, amélioration de la ténacité et de la résistance aux chocs pour les joints de soudures sur lesquels des traitements thermiques ont été effectués après le processus de soudage, où la valeur d'impact la plus élevée a été obtenue dans l'acier à haute teneur en carbone 138.7 J.

### **Mots clés :**

Traitements thermique- Essais mécanique –Soudage–Assemblages soudés- recuit.



## ملخص

تُستخدم أنظمة خطوط الأنابيب باعتبارها الحل الأكثر اقتصاداً لنقل السوائل المستخدمة في صناعة النفط والغاز عملية التصنيع الرئيسية التي تمثل الفترة من إنتاج الأنابيب إلى تركيب الخدمة هي اللحام. تمثل منطقة اللحام المنطقة الأكثر أهمية من حيث خصائص المواد في مكونات خط الأنابيب المعنية. بالإضافة إلى طريقة اللحام المختارة، فإن اختيار المواد الفولاذية المناسبة ومستهلكات اللحام للمواد المختارة له أهمية كبيرة. اليوم، يتم تصنيع معظم الأنابيب وفقاً لمعايير API. تم تحقيق وفورات في التكاليف من خلال تقليل سمك الجدار وعمليات النقل واللحام. في هذه الدراسة، تم فحص الخواص الميكانيكية للفولاذ الملحوم X60 بعد وقيل إجراء المعالجة الحرارية للتليين والتي تستخدم بشكل عام في صناعة النفط والغاز وفقاً لمعايير API. ثم ربط هذه الفولاذ باستخدام اللحام بالقوس الكهربائي. تم فحص مناطق اللحام والتغيرات في الخواص الميكانيكية. وأظهرت النتائج أن أعلى قيمة صلابة بعد إجراء المعالجة الحرارية في منطقة 216 خط لحام عالي الجهد، انخفضت مقاومة الشد للفولاذ عند 609 ميغا باسكال عند إجراء المعالجة الحرارية مقارنة بالفولاذ الذي يحتوي على مستويات عالية من الكربون 627 ميغا باسكال. على الجانب الآخر، تم تحسين المتانة ومقاومة الصدمات لمفاصل اللحامات التي أجريت عليها المعالجات الحرارية بعد عملية اللحام، حيث تم الحصول على أعلى قيمة تأثير في الفولاذ J138.7 عالي الكربون

### الكلمات الدالة:

المعالجات الحرارية - الاختبارات الميكانيكية - اللحام - التركيبات الملحومة-التلدين.

## ***Abstract***

Pipeline systems are used as the most economical solution for transporting fluids used in the oil and gas industry. The major manufacturing process representing the period from pipe production to service installation is welding. The weld zone represents the most critical area in terms of material properties in the respective pipeline components. In addition to the chosen welding method, the selection of the appropriate steel material and welding consumables for the selected material is of significant importance. Today, most pipes are manufactured to API standards. Cost savings have been achieved by reducing wall thickness, transportation and welding processes. In this study, the mechanical properties of welded steel X60 after and before carrying out annealing heat treatment which is generally used in oil and gas industry according to API standards, were investigated. Then these steels were joined using electric arc welding. Weld areas and changes in mechanical properties were investigated. The results showed that the highest hardness value after performing heat treatment in the 216 HV welding line area, the tensile strength of steel decreased to 609 MPa when performing the heat treatment compared to steel containing higher carbon levels 627 MPa. On the other side, improved toughness and impact resistance for the joints of welds on which heat treatments were performed after the welding process, where the highest impact value was obtained in the 138.7 J high carbon steel.

### **Key words:**

Heat treatments - Mechanical tests - Welding - Welded assemblies – Annealing.

## Table des matières

*Dédicace*

*Dédicace*

*Dédicace*

*Remerciement*

*Résumé*

Table des matières .....	I
Liste de Tableaux .....	III
Liste de Figures .....	IV
Liste des abréviations .....	VI
Introduction Générale .....	1

### *Chapitre I : Généralités sur la soudure*

---

<b>I.1.Introduction :</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2.Assemblage des matériaux par soudage:</b> .....	<b>4</b>
<b>I..2.1.Définition :</b> .....	<b>4</b>
I.2.3 classifications des procédés de soudage : .....	5
I.2.4 Techniques de soudage: .....	7
<b>I.2.4.1 Soudage à l'arc électrique:</b> .....	<b>7</b>
<b>I.2.4.2 soudage aux gaz :</b> .....	<b>8</b>
<b>I.2.4.3 Le soudage au laser :</b> .....	<b>9</b>
<b>I.2.4.4 Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) :</b> .....	<b>10</b>
<b>I.2.4.5 Le Soudage MIG-MAG:</b> .....	<b>10</b>
<b>I.2.4.6 Le Soudage au plasma :</b> .....	<b>11</b>
<b>I.3 techniques de caractérisation des assemblages soudé :</b> .....	<b>12</b>
<b>I.3.1 introduction :</b> .....	<b>12</b>
<b>I.3.2. Techniques de caractérisation non destructives :</b> .....	<b>13</b>
<b>I.3.3. Caractérisation interne nécessitant des procédures destructives :</b> .....	<b>14</b>
<b>I.3.4. Tests mécaniques :</b> .....	<b>14</b>
I.4. Les principaux défauts liés au soudage: .....	15
I.5. Traitement Thermique des Soudures : .....	16
I.5.1. Traitement Thermique De Relaxation (recuit) : .....	17
<b>I.5.1.1 définition :</b> .....	<b>17</b>
<b>I.5.1.2 Différents types de recuit :</b> .....	<b>18</b>
I.5.2. Traitement Thermique Revenu : .....	20
<b>I.5.2.1 difinition :</b> .....	<b>20</b>

<b>I.5.2.2 Types de Revenu :</b> .....	<b>21</b>
<b>I.6.Conclusion :</b> .....	<b>23</b>

*Chapitre II : Matériaux utilisés et procédures expérimentales*

---

<b>II.1 Introduction :</b> .....	<b>25</b>
<b>II.2 Matériau de l'étude :</b> .....	<b>25</b>
<b>II.3 préparations des éprouvettes :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.4 Traitements thermiques :</b> .....	<b>29</b>
<b>II.6 Essais mécanique :</b> .....	<b>33</b>
II.6.1 Essais de traction :.....	33
II.6.1.1 Principe de l'essai :.....	35
II.6.2 essais de résilience : .....	37
II.6.2.1 Principe d'essai mécanique : .....	39
II.6.3 Essais de dureté :.....	40
II.6.3.1 Principe de l'essai mécanique :.....	42
<b>II.6.Conclusion :</b> .....	<b>43</b>

*Chapitre III : Résultats expérimentaux*

---

<b>III.1 Introduction :</b> .....	<b>45</b>
<b>III.2 Essai de Traction :</b> .....	<b>45</b>
<b>III.3. Essai de Résilience :</b> .....	<b>47</b>
<b>III.4. Essai de dureté :</b> .....	<b>49</b>
<b>III .5. Conclusion :</b> .....	<b>52</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>54</b>
<b>Références</b> .....	<b>56</b>

### Liste de Tableaux

N°	Titre de Tableaux	page
<b>II.1</b>	l'équivalent de l'acier xc60	27
<b>II.2</b>	Composition chimique de l'acier X60	27
<b>II.3</b>	Propriétés mécaniques a à température ambiante à l'état normalisé (+ N)	27
<b>III.1</b>	Résultats essai de traction	47
<b>III.2</b>	Les résultats de la résilience	49
<b>III.3</b>	Résultat de l'essai La dureté	50
<b>III.4</b>	Résultat de l'essai La dureté	52

**Liste de Figures**

<b>N°</b>	<b>Titre de figure</b>	<b>page</b>
<b>I.01</b>	Zones de la soudure	05
<b>I.02</b>	Classification des procédés du soudage [Perry 2000]	06
<b>I.03</b>	Soudure homogène	06
<b>I.04</b>	Soudure hétérogène	06
<b>I.05</b>	Soudage à l'arc électrique	07
<b>I.06</b>	Équipements de soudage au gaz	09
<b>I.07</b>	Le soudage TIG	11
<b>I.08</b>	Le Soudage MIG-MAG	11
<b>I.09</b>	Schéma de principe du soudage au plasma	12
<b>I.10</b>	Cycle Thermique d'un Recuit	18
<b>I.11</b>	Cycle de Revenu	18
<b>I.12</b>	Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu sur les aciers	23
<b>II. 1</b>	Une plaque découpée et soudé	28
<b>II.2</b>	une bobine d'acier xc60	29
<b>II.3</b>	scies à ruban	29
<b>II.4</b>	Les 4 pièces ne sont pas traitées.	30
<b>II.5</b>	Pièces coupées et la pièce après le finicement.	31
<b>II.6</b>	machines à cisailer	31
<b>II.7</b>	four électrique	32
<b>II.8</b>	les Pièces avant traitement	33
<b>II.9</b>	une pince	33
<b>II.10</b>	Des échantillons traités.	34
<b>II.11</b>	une machine de traction.	35
<b>II.12</b>	une machine de traction	36
<b>II.13</b>	éprouvette de traction normalisé. [20]	37

<b>II.14</b>	Les échantillons après la traction	38
<b>II.15</b>	Machine d'essai de résilience.	39
<b>II.16</b>	Principe de l'essai de résilience utilisant un mouton-Charpy.	40
<b>II.17</b>	les échantillons après résilience.	41
<b>II.18</b>	Machine d'essai de dureté	42
<b>III.1</b>	la courbe de traction	47
<b>III.2</b>	Résultats de l'histogramme de résilience.	49
<b>III.3</b>	La courbe dureté sur un échantillon sans traitement.	51
<b>III.4</b>	La courbe dureté sur un échantillon avec traitement	52

## Liste des abréviations

**MB : Métal de base.**

**ZAT : Zone affectée thermiquement.**

**ZL : Zone de liaison.**

**ZF : Zone fondue.**

**API : interface de programmation d'application**

**GPL : Le gaz de pétrole liquéfié**

**CVC :de chauffage de ventilation et de climatisation**

**TIG: Tungstène Inerte Gas**

**MIG: Metal Inert Gas**

**MAG : Metal Active Gas**

**DHT : Le traitement thermique de déshydrogénation**

**Tr : Température de recuit.**

**Tc : Temps de chauffage**

**Tm : Temps de maintien**

**Tr : Temps de refroidissement**

**K : La résilience dal/cm<sup>2</sup>**

**A : L'allongement %**

**Z : Nombre atomique**

**Rm : La contrainte maximale à la rupture.**

**Re : La contrainte élastique.**

**Hv : dureté Vickers.**

**T : Température.**

**°C : degré celsius**



**C : Carbon**

**Mn : Manganèse**

**Si : Silicone**

**P : PHOSPHOREUX**

**S : SOUFRE**

**Cr : Chrome**

**Mo : Molybdène**

**Ni : Nickel**

**d : Diamètre**

**t : Epaisseur**

**ISO : International Organization for Standardization**

**F : la force.**

**S0 : la section**

**L0 : la longure**

**Wo : énergie absorbée par la rupture**

**P : la charge.**

**E : module de Young**



**Introduction**  
**Générale**

## Introduction Générale

---

Le monde a connu un développement industriel très rapide grâce à l'industrie mécanique et les choix judicieux des matériaux. Parmi les matériaux utilisés dans plusieurs domaines, tel que l'industrie naval, ferroviaire, automobile, construction bâtiment et industrie pétrolières, les aciers, qui occupent la part du lion, environ 95%.

Les installations et les structures à base d'acier ont connu une galop de développement grâce à la mise en forme et l'assemblage par boulonnage, rivetage et soudage, etc. Le soudage des aciers a beaucoup d'avantage dans l'industrie et la mise en forme des installations ; mais il a aussi des inconvénients et des points faibles, qui rendent l'assemblage vulnérable ; car la zone fondue de la soudure ZF et la zone affectée thermiquement ZAT, n'ont pas les mêmes caractéristiques structurales et mécaniques comme le métal de base. Du point de vue électrochimique ce sont des zones très corrodables et du point de vue mécanique ce sont des zones fragilisées par la modification structurelle et l'introduction des contraintes mécaniques, suite au refroidissement plus en moins rapide.

Le traitement thermique sont des processus de chauffage et de refroidissement des métaux, en utilisant des méthodes spécifiques prédéterminées pour obtenir les propriétés souhaitées. Les métaux ferreux et non ferreux subissent un traitement thermique avant d'être utilisés, ces thermiques ont un effet sur la formation et la dissolution des différents carbures et Nitrure dans la zone de cordon de soudure des aciers. L'apport énergétique sous forme de traitements thermiques contrôlés conduit à des systèmes thermodynamiquement stables le long de la formation ou la dissolution des phases qui s'accompagne avec la dissipation des contraintes internes initialement introduites par l'effet du refroidissement rapide à l'air du cordon de soudure.

Dans notre thèse nous allons étudier l'effet de traitement thermique de recuit sur les propriétés mécanique des assemblages soudé en acier X 60.

Cette thèse se compose de trois chapitres. Le premier chapitre est un rappel des notions générales sur les assemblages soudés ainsi que traitements thermiques effectuée après soudage.

Le deuxième chapitre présente le matériau d'étude et sa caractéristique ainsi que les méthodes expérimentales qui ils sont utilisés pour effectuer les traitements ciblés, cela était comme suit : la préparation des matériaux, la procédure expérimentale, les essais mécaniques.

Le troisième chapitre résume les résultats de l'expérience et les objectifs atteints, Les résultats de l'expérience et leur analyse sont discutés dans ce chapitre.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur la soudure**

# Chapitre I

## Généralités sur la soudure

---

### I.1.Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. [1]

Le soudage est un processus qui consiste à assembler deux pièces métalliques pour les rendre solidaires l'une à l'autre, et cela en les rapprochant et en réchauffant l'endroit de leur contact jusqu'à l'état de fusion avec ou sans métal d'apport, cette opération est caractérisée par trois aspects ; thermique, chimique, et thermomécanique.

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires [2].

### I.2.Assemblage des matériaux par soudage

#### I.2.1. Définition

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, par intervention de pression, ou par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, le joint de soudure se décompose en plusieurs zones voir la (Figure I.01).

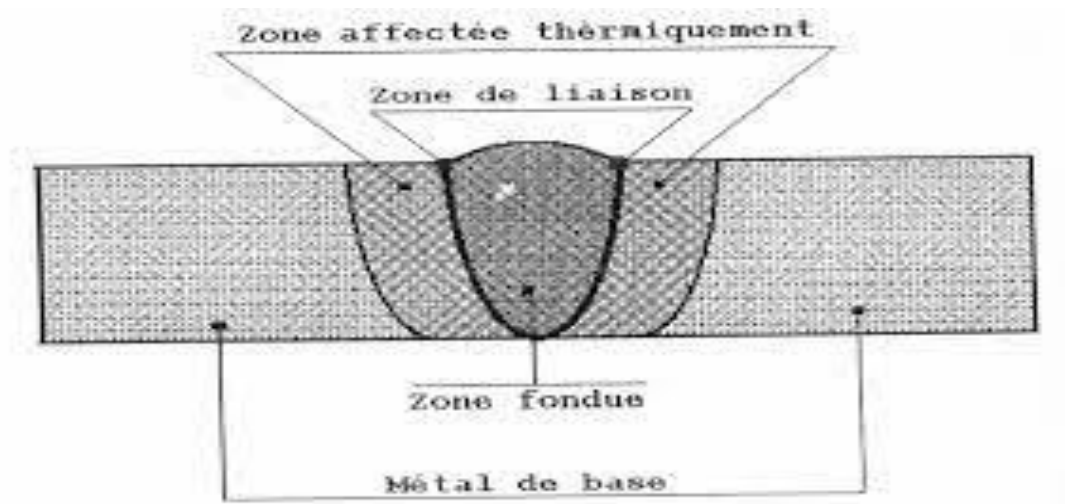


Figure I .01 : les zones de la soudure. [2]

- **Métal de base (MB)** : Le métal de base, est la partie l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
- **Zone affectée thermiquement (ZAT)** : La zone affectée thermiquement est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.
- **Zone de liaison (ZL)** : Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.
- **Zone fondue (ZF)** : Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification. [2].

### I.2.3 classifications des procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques, telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur).
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser [2].

La Figure I.02 présenté Classification des procédés du soudage [Perry 2000].

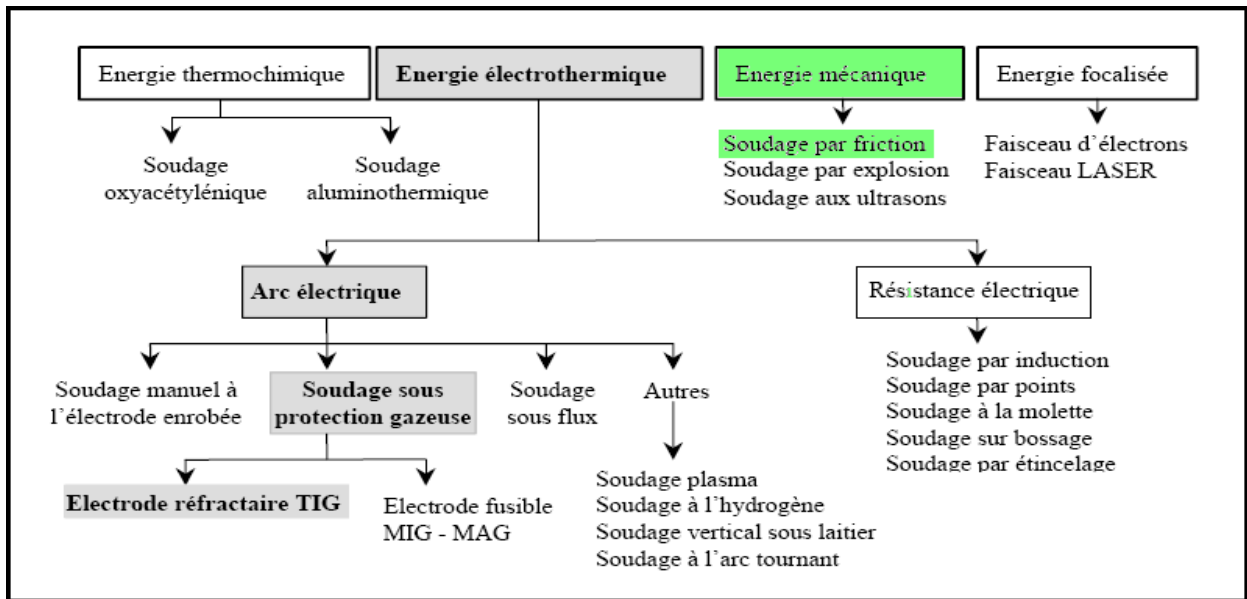


Figure I.02 : Classification des procédés du soudage [9].

En revanche, Il existe 3 types de soudures :

- **La soudure homogène** : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.

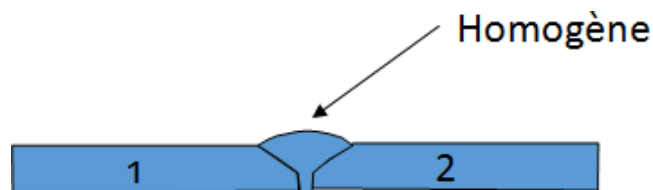


Figure I.03 : Soudure homogène.[4]

- **La soudure hétérogène de type A** : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.

Type « A »: 1=2 # métal d'apport.

- **La soudure hétérogène de type B** : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différente.

Type « B »: 1# 2 # métal d'apport.

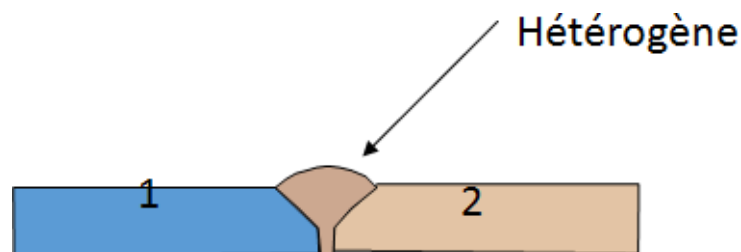


Figure I.04: Soudure hétérogène.[4]



Selon les caractéristiques des matériaux à souder, l'énergie du soudage sera différente [4].

## I.2.4 Techniques de soudage

Il existe différentes techniques de soudage parmi elles on peut citer les suivants :

### I.2.4.1 Soudage à l'arc électrique :

La technique d'assemblage moderne, rapide et économique résout la plupart des problèmes d'assemblage, et on retrouve cela dans le soudage à l'arc est un soudage autogène qui permet à une très haute température fournie par l'arc électrique (au moins 3000 ° C) de souder avec un métal d'apport métal par fusion de métaux de même nature .

L'arc résulte du passage d'un courant électrique entre les pièces à souder et une électrode.

La Figure I.05 présenté le principe du soudage à l'arc électrique.

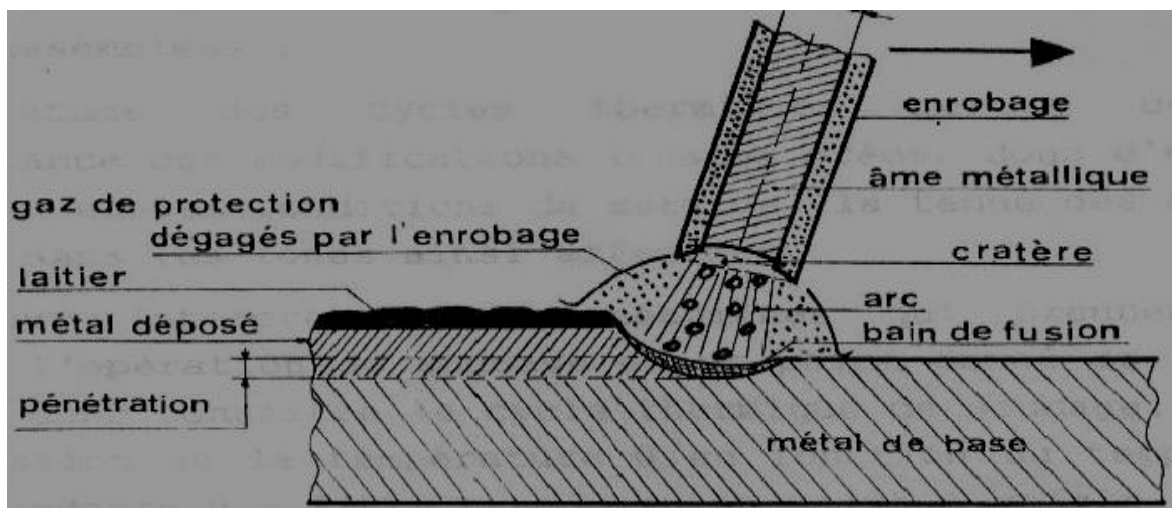


Figure I.05: Soudage à l'arc électrique.[10]

Les équipements dans le soudage à l'arc électrique :

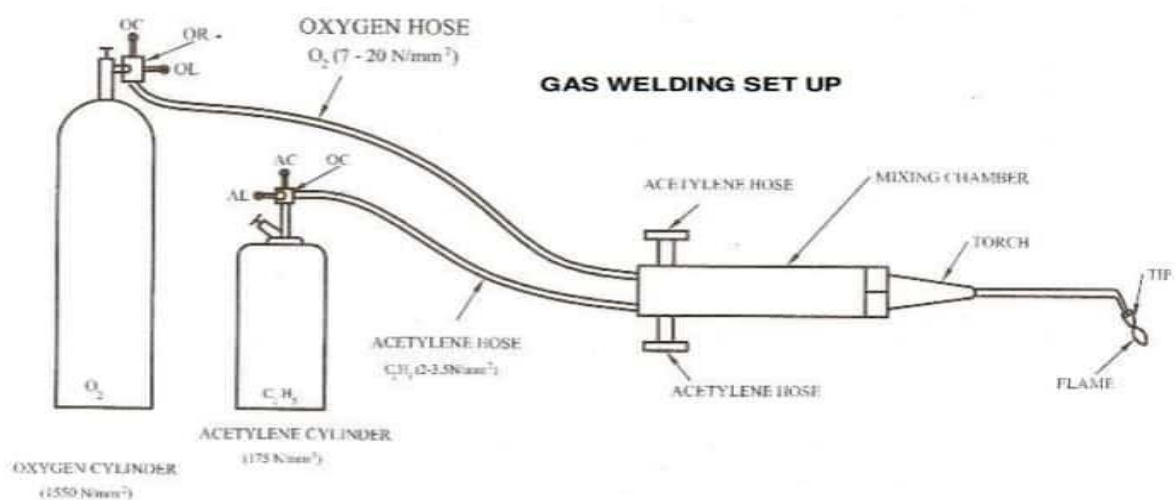
1. Un générateur de courant (poste de soudage).
2. Une pince de masse avec câble conducteur.
3. Une pince porte-électrode avec câble conducteur.
4. Une étuve portative pour les électrodes basiques.
5. Un masque avec verres teintés spéciaux de 11 à 13.
6. Une combinaison de soudeur et gants en cuir souple.

7. Un marteau à piquer et une brosse métallique.
8. Une meuleuse d'angle électrique.
9. Des écrans ou rideaux de protection.
10. Une ventilation dans les endroits confinés.[8]

Ceci est principalement utilisé comme processus entièrement automatique et parfois comme processus semi-automatique. Dans le soudage entièrement automatique, la tête de soudage est montée sur un chariot qui se déplace le long du joint. Alternativement, la tête de soudage est fixe et le joint se déplace en dessous. Ce procédé donne une productivité très élevée et une excellente qualité de soudure. Il est généralement appliqué sur l'acier doux, les aciers à haute résistance et les aciers inoxydables. Il est idéal pour les fortes épaisseurs. Pour les sections minces, un support de soudure est nécessaire pour éviter le brûlage. Il est couramment utilisé pour la fabrication de poutres à plaques, de réservoirs sous pression, de tuyaux et de conduites forcées, pour le surfacage et le revêtement en bandes.

#### I.2.4.2 soudage aux gaz

Le soudage oxy-combustible, communément appelé soudage oxy ou soudage au gaz, est un processus d'assemblage de métaux par application de chaleur créée par une flamme de gaz. Le gaz combustible couramment acétylène, lorsqu'il est mélangé avec une proportion appropriée d'oxygène dans une chambre de mélange de torche de soudage, produit une flamme très chaude d'environ 3150 à 3300 °C.



Figur

e I.06: équipements de soudage au gaz.[11]

Les équipements de base utilisés pour effectuer le soudage au gaz sont :

- 1 .Bouteille d'oxygène gazeux (colorée en noir) avec valve en laiton à filetage à droite
- 2 .Bouteille de gaz acétylène (de couleur marron/rouge) avec valve à filetage à gauche
- 3 .Régulateur de pression d'oxygène
- 4 .Régulateur de pression d'acétylène
- 5 .Tuyau de gaz oxygène (noir)
- 6 .Tuyau de gaz acétylène (rouge/marron)
- 7 .Chalumeau de soudage ou chalumeau avec jeu de buses et briquet à gaz
- 8 .Chariots pour le transport des bouteilles d'oxygène et d'acétylène
- 9 .Jeu de clés et clés
- 10 .Baguettes de remplissage et flux
11. Vêtements de protection pour le soudeur (ex. : tablier en amiante, gants, lunettes, etc.)

Les différents gaz adaptés au soudage et au coupage sont l'acétylène, l'hydrogène, le GPL, le méthane, etc. Le soudage au gaz convient parfaitement au soudage de tuyaux et de tubes. Il est à la fois efficace et économique pour des applications telles que la construction et la réparation de systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). D'autres applications du soudage au gaz comprennent le soudage de conduites d'eau chaude, de bouteilles de gaz.

#### **I.2.4.3 soudage au laser**

C'est une technique d'assemblage largement utilisée pour assembler des matériaux en utilisant un laser comme source de chaleur. Le laser est focalisé sur le matériau du substrat, créant une source de chaleur concentrée afin de faire fondre et fusionner le matériau, l'objectif est de créer le bain de fusion liquide, de lui permettre de croître jusqu'à la taille souhaitée, puis de propager ce bain de fusion à travers l'interface solide en éliminant le joint d'origine entre les composants à assembler. L'énergie nécessaire pour faire fondre la surface est d'environ 106 W/cm<sup>2</sup>, ce qui est l'une des plus élevées parmi les différents procédés de soudage disponibles. Grâce à d'excellentes capacités de focalisation, les lasers de forte puissance adaptés au soudage atteignent aujourd'hui des densités de puissance en continu de l'ordre de 107-108 W/cm<sup>2</sup>. Cette concentration d'énergie élevée produit une soudure avec un rapport profondeur/largeur élevé avec une distorsion thermique minimale. Les

deux modes fondamentaux de soudage au laser sont le soudage par conduction et le soudage par pénétration (ou trou de serrure)

Le soudage laser est utilisé dans de nombreux secteurs :

- Industrie automobile (ébauches sur mesure).
- Chantiers navals.
- Aviation (Airframe Al- et Ti-structures).
- Applications en microélectronique.
- Équipement médical.

#### I.2.4.4 Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

C'est une technique de soudure utilisant un arc électrique, une électrode en tungstène et un gaz inerte (ou neutre). L'arc électrique est établi entre une électrode en tungstène et les pièces à souder. Un gaz neutre est projeté dans la zone de soudage pour protéger l'arc électrique, l'électrode, le métal d'apport et le bain de fusion de l'oxydation de l'air. Ce gaz neutre est généralement de l'argon car il peut protéger tous les métaux en fusion. Ce type de soudage est destiné à la réalisation de travaux fins requérant une qualité de soudure parfaite.

La Figure I.07 présente le principe du soudage TIG

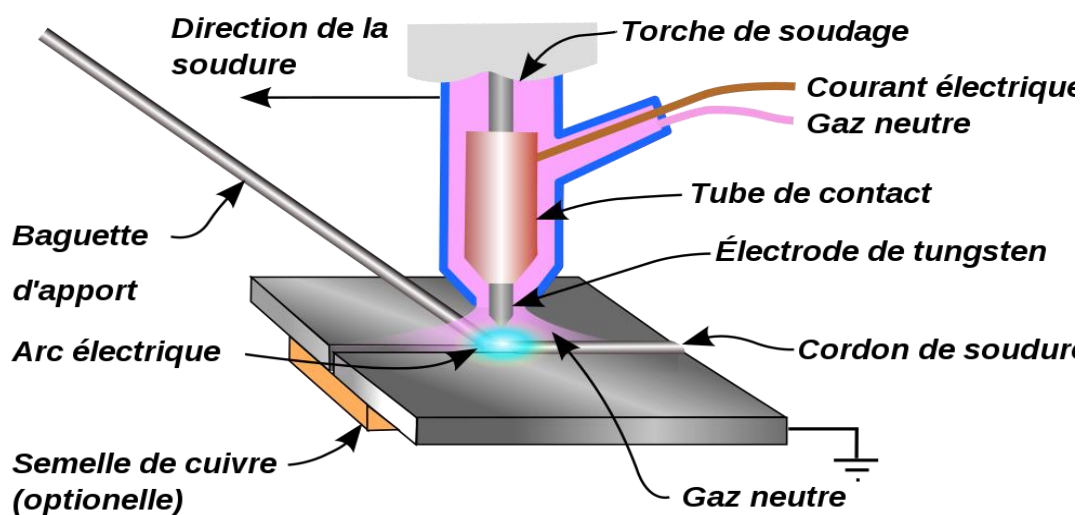


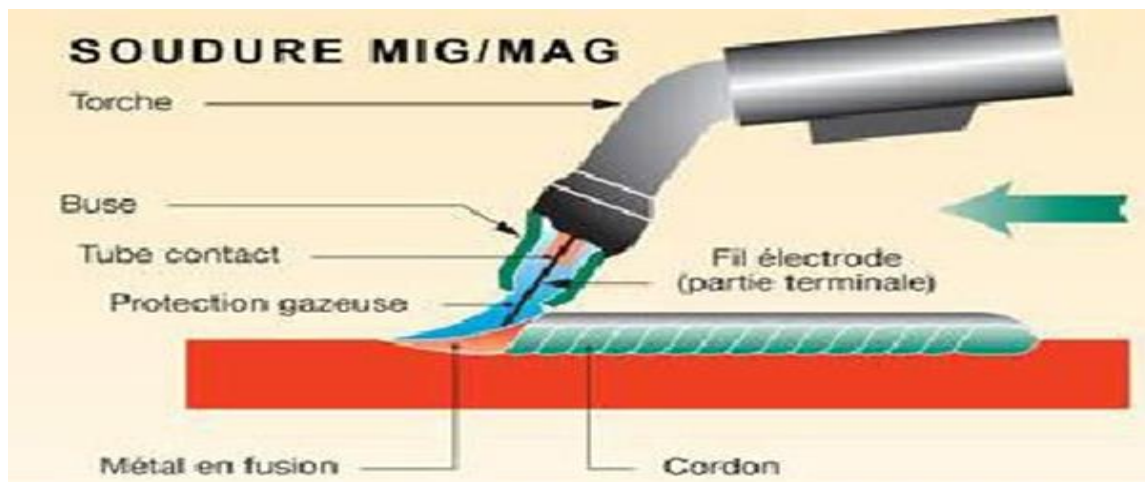
Figure I.07: Le soudage TIG.[12]

#### I.2.4.5 Soudage MIG-MAG

Le soudage MIG-MAG est une technique de soudure qui crée un arc électrique et qui mélange deux procédés : le procédé MIG (Metal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection inerte et le

procédé MAG (Metal Active Gas) qui utilise un gaz de protection actif. Avec cette technique, l'électrode sert de métal d'apport. Le gaz inerte (Argon ou Hélium) dans le procédé MIG et le gaz actif (Argon/CO<sub>2</sub> ou Argon/Oxygène) dans le procédé MAG permettent de protéger l'électrode, l'arc électrique et le bain de fusion. Cette technique de soudage est utilisée pour les soudures par points, épaisses ou rapides pour les matières suivantes : acier, inox, aluminium.

La Figure I.08 présente le principe Le Soudage MIG-MAG.



Figure

I.08: Le Soudage MIG-MAG.[13]

#### I.2.4.6 Soudage au plasma

Le soudage plasma est une technique utilisant un arc électrique et qui reprend les procédés du soudage TIG et du soudage MIG. Le jet plasma est obtenu après création d'un arc électrique entre une électrode non-fusible et la pièce à souder. Cette technique a besoin d'un gaz supplémentaire en plus du gaz principal (généralement de l'Argon), nommé gaz annulaire et qui est composé d'hydrogène ou d'hélium. L'électrode est protégée par une buse en cuivre qui est en permanence refroidie à l'eau pour éviter sa fusion [5].

La Figure I.09 présente le principe du soudage au plasma.

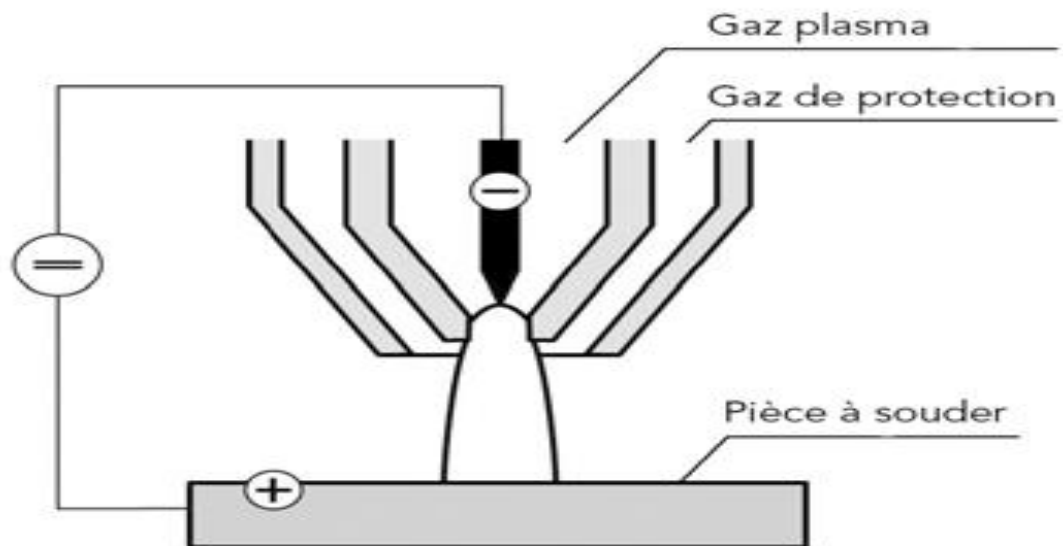


Figure I.09 : Schéma de principe du soudage au plasma.[14]

### I.3 techniques de caractérisation des assemblages soudés

#### I.3.1 introduction

Il existe un certain nombre de critères, notamment le procédé de soudage utilisé, la taille, la forme, les propriétés mécaniques, la composition chimique et un certain nombre d'autres pour caractériser les soudures. Les méthodes de caractérisation appropriées dépendent de la fonction de la soudure et de l'ensemble particulier de propriétés requises pour l'application. Dans certains cas, la capacité d'une soudure à fonctionner correctement peut être déterminée en caractérisant la taille ou la forme de la soudure. Un exemple de ceci est lorsque des facteurs liés à la procédure de soudage, tels qu'une taille de soudure inadéquate, la convexité du cordon ou le manque de pénétration, peuvent entraîner l'échec d'une soudure. Dans d'autres cas, il est important de caractériser les facteurs métallurgiques tels que la composition et la microstructure du métal fondu. Les exemples peuvent inclure des soudures dont l'objectif est d'éviter les défaillances dues à une résistance, une ductilité, une ténacité ou une résistance à la corrosion inadéquates. En général, les objectifs de la caractérisation des soudures sont d'évaluer la capacité d'une soudure à remplir sa fonction avec succès, de documenter minutieusement une soudure et une procédure de soudage qui se sont avérées adéquates ou de déterminer pourquoi une soudure a échoué. Souder est de créer une structure capable de répondre à toutes les exigences de son environnement de service. Dans de nombreux cas, la meilleure façon d'évaluer les performances d'une soudure est d'établir ses propriétés mécaniques. En plus d'un certain nombre d'essais de matériaux standard, de nombreux essais mécaniques visent spécifiquement à déterminer les capacités d'une soudure. Des exemples de

propriétés mécaniques généralement caractérisées pour les soudures comprennent le rendement et la résistance à la traction résistance, ductilité, dureté et résistance aux chocs ou à la rupture. Les tests de corrosion sont souvent utilisés dans des situations où une opération de soudage est effectuée sur un matériau résistant à la corrosion, ou dans une structure exposée à un environnement hostile. Bien que les performances absolues de corrosion soient importantes, une préoccupation majeure est de s'assurer qu'une soudure et sa zone affectée thermiquement (ZAT) sont cathodiques par rapport au métal environnant.

### **I.3.2. Techniques de caractérisation non destructives**

Caractéristiques macroscopiques observées de l'extérieur. Plusieurs facteurs associés à la production et aux performances des soudures sont macroscopiques et facilement observables. Les plus évidents d'entre eux sont la taille, la forme et l'apparence générale de la soudure. Dans une large mesure, ces paramètres dépendent de la géométrie du joint de soudure et du procédé de soudage sélectionné.

Méthodes de caractérisation. Les principaux outils utilisés dans la macro-caractérisation externe d'une soudure sont l'œil nu et une loupe. Un certain nombre de paramètres de macro-caractérisation (par exemple, l'emplacement de la soudure, la taille, la forme et l'uniformité générale) peuvent être évalués par inspection visuelle. Dans de nombreux cas, la présence de défauts grossiers tels que la fissuration à chaud ou la porosité peut également être détectée par une inspection visuelle et une photographie vue de dessus. D'autres exemples de facteurs inclus dans l'apparence globale du cordon de soudure comprennent la distorsion, la décoloration due à un blindage ou à une chaleur inadéquate, une contre-dépouille, une taille de cratère excessive et une largeur de cordon inégale.

Dans les soudures d'angle, un certain nombre d'aspects de performance peuvent être affectés par la géométrie relative du joint. Les jauges d'angle peuvent être utilisées pour déterminer la taille d'une soudure, la courbure de la face et la longueur des pattes de soudure.

La forme concave de la surface libre offre une transition plus douce entre les pièces connectées et provoque donc moins de concentration de contraintes qu'une surface convexe. Mais il est plus vulnérable au retrait et à la fissuration que la surface convexe et a une zone de gorge beaucoup plus réduite pour transférer les contraintes. D'autre part, les formes convexes fournissent un métal de soudure supplémentaire ou un renforcement pour la gorge. Pour les structures chargées statiquement, une forme légèrement convexe est préférable, tandis que pour les structures sujettes à la fatigue, une surface concave est souhaitable.

Défauts. La présence de défauts de surface ou internes peut dégrader les performances d'une soudure qui peut sembler saine au premier coup d'œil.

Les défauts typiques trouvés dans les soudures comprennent :

- Porosité
- Saper
- Chevauchement
- Manque de pénétration
- Manque de fusion
- Vides de rétrécissement
- Fissuration de cratère
- Brûlure par fusion
- Fissuration à chaud
- Inclusions dues à des scories piégées, des morceaux d'électrodes en tungstène ou défauts présents dans le matériau de départ

### **I.3.3. Caractérisation interne nécessitant des procédures destructives**

Cette section couvre la caractérisation macrostructurale et microstructurale et l'analyse compositionnelle. Ces procédures sont généralement basées sur une section transversale de la soudure. La coupe transversale peut être complétée par la photographie vue de dessus, la coupe longitudinale et la coupe normale. En particulier, la photographie vue de dessus décrira l'aspect général de la soudure, illustrant les irrégularités de surface, les éclaboussures ou les défauts macroscopiques tels que la fissuration à chaud ou la porosité.

Dans de nombreux cas, il est important d'examiner et de caractériser la microstructure de la soudure et de comprendre sa formation et ses effets sur les propriétés. C'est le cas lorsque les matériaux et les processus impliqués ne sont pas bien caractérisés, donc les spécifications n'ont pas été établies.

De plus, la composition d'une soudure aura un effet significatif sur ses performances, contribuant à la fois aux propriétés mécaniques et à la corrosion de la soudure.

### **I.3.4. Tests mécaniques**

Un certain nombre de propriétés mécaniques sont utilisées pour caractériser les soudures, notamment la résistance, la ductilité, la dureté et la ténacité.



En général, les mêmes échantillons et procédures sont utilisés dans d'autres domaines de la métallurgie. Cependant, une préoccupation importante concernant les performances mécaniques des soudures est la comparaison directe avec le matériau de base. L'objectif est de s'assurer que la soudure n'est pas la composante la plus faible d'une structure, ou si elle est, pour compenser cela dans la conception.

**Essais de Traction :** Le but de ce test est de vérifier que la défaillance de la surcharge se produira dans le métal de base plutôt que dans le métal de soudure ou le danger.

Des tests supplémentaires sont parfois effectués pour comparer les résistances en métal de base et en métal de soudure. Un exemple de ce type de test est le test de traction transversal, dans lequel l'échantillon est retiré de la soudure de sorte que l'axe de chargement est perpendiculaire à la bille de soudure et que l'armature de la soudure est laissée intacte.

**Essais de dureté :** Une utilisation courante des valeurs de dureté dans les spécifications de soudure est le contrôle de la formation de microstructures. Cela pourrait avoir une faible ductilité et de la ténacité et sont donc sujets à la fissuration. Par exemple, dans les aciers à pipeline. Les valeurs de dureté sont également utilisées comme un indicateur de sensibilité à certaines formes de fissuration de corrosion stressante.

**Essais Charpy :** Pour tester la ténacité à l'impact, un échantillon de géométrie spécifiée est soumis à une charge d'impact et la quantité d'énergie absorbée pendant la fracture est enregistrée. Habituellement, l'échantillon est orienté de sorte que l'encoche et le plan attendu de fracture passent longitudinalement à travers le métal de soudure. Les tests Charpy ne mesurent pas une propriété de matériaux inhérente, mais elles se traduisent par une mesure relative de la ténacité à l'impact entre les matériaux. Une utilisation très courante du test Charpy consiste à déterminer la température de transition ductile à brut d'un matériau en effectuant des tests à plusieurs températures différentes.

#### **I.4. Les principaux défauts liés au soudage**

La technologie de soudage présente les avantages d'une grande adaptabilité et d'une économie de coûts, est largement utilisée dans la construction de composants clés d'unités de puissance thermique telles que le tuyau de vapeur, le surchauffeur, le réchauffeur, etc.

Cependant, en raison des imperfections de soudage, des contraintes résiduelles de soudage, des performances locales inégales et des structures fragiles dans la zone affectée par la chaleur, les joints soudés sont généralement considérés comme des maillons faibles sur le composant [x]. Grâce à l'amélioration continue de la technologie de soudage et des méthodes de test non destructif, les

imperfections de soudage ont été efficacement contrôlées dans le processus de fabrication. Dans le processus de conception, la microstructure locale non uniforme et la propriété mécanique non concordante du joint soudé peuvent également être prises en compte efficacement en introduisant le coefficient de soudure.

Cependant, il existe encore des controverses et des incertitudes dans la compréhension de la contrainte résiduelle de soudage et l'évaluation de son effet. La contrainte résiduelle de soudage est l'une des principales causes de fissuration par corrosion sous contrainte des assemblages soudés [6]. La contrainte résiduelle de traction est considérée être le facteur critique dans l'augmentation de la sensibilité à l'endommagement par fatigue des joints soudés [7]. Une défaillance prématurée et une fracture des joints soudés causées par la contrainte résiduelle de soudage se produisaient généralement.

Par conséquent, il est nécessaire de réduire les contraintes résiduelles de soudage. Jusqu'à présent, il existe de nombreuses méthodes pour réduire les contraintes résiduelles de soudage, notamment le préchauffage, le soudage par cordon de trempe, le traitement thermique après soudage, le martelage, le vieillissement par vibration, l'impact ultrasonique, etc. Comparé à d'autres méthodes, le traitement thermique post-soudage peut non seulement réduire efficacement la contrainte résiduelle de soudage, mais également améliorer les performances mécaniques du joint soudé.

Par conséquent, le traitement thermique post-soudage est la principale méthode pour éliminer les contraintes résiduelles de soudage dans les applications d'ingénierie.

Il existe plusieurs procédés de traitement thermique après soudage, tels que

- Le traitement thermique de déshydrogénation (DHT)
- Le traitement thermique de normalisation,
- Le traitement thermique de revenu, etc.,

Dans la production industrielle réelle. Comment choisir les procédés de traitement thermique appropriés en fonction du matériau.

## **I.5.Traitement Thermique des Soudures**

Ce un processus consiste à élever la température d'un ou plusieurs matériaux après un processus de soudage. Ce traitement thermique est effectué pour atténuer les contraintes résiduelles, augmenter la résistance, augmenter ou diminuer la dureté et réduire le risque de fissuration. Malgré

qu'il s'agit d'une opération à la fois longue et coûteuse. Il peut affecter la résistance et la ténacité d'un joint soudé, sa résistance à la corrosion et le niveau de contrainte résiduelle, mais il s'agit également d'une opération obligatoire spécifiée dans de nombreux codes et normes d'application. De plus, c'est une variable essentielle dans les spécifications de qualification d'un mode opératoire de soudage.

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différente de celles de métal de base. D'autre part, l'opération de soudage établit un état de contraintes résiduelles dont la répartition et l'amplitude sont, elles aussi, fonctions de procédés et des modes opératoires.

Qu'elles soient à caractère métallurgique et thermomécanique, ces modifications sont souvent tolérables vis-à-vis du comportement de service et les ensembles soudés sont utilisés à l'état brut de soudage. Dans certains cas, cependant, il est jugé préférable ou nécessaire, ou bien encore il est obligatoire d'intervenir par un traitement thermique après soudage, dont l'objet principal peut être d'améliorer ou d'obtenir les propriétés jugées importantes vis-à-vis des conditions de service, ou d'éliminer ou simplement de réduire les contraintes résiduelles.

## **I.5.1. Traitement Thermique De Relaxation (recuit)**

### **I.5.1.1 définition**

Ce traitement Consiste à porter un métal à haute température, où se produit une recristallisation et/ou une transformation de phase puis un refroidissement lent, souvent dans un four de traitement thermique. Ce processus est effectué pour ramollir le métal après qu'il ait été durci, en utilisant par exemple le travail à froid, un recuit complet donnant la plus douce des microstructures. On note souvent une diminution du rendement et de la résistance à la traction, et dans le cas des aciers ferritiques, généralement une diminution de la ténacité.

Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (Résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de:

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements 3 mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé
- Homogénéiser les textures hétérogènes

- Réduire les contraintes internes [2]

Le cycle thermique de recuit comprend les étapes suivantes :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (Figure I.10).

La Figure I.10 présente le principe Cycle Thermique d'un Recuit, Temps en fonction de Température.

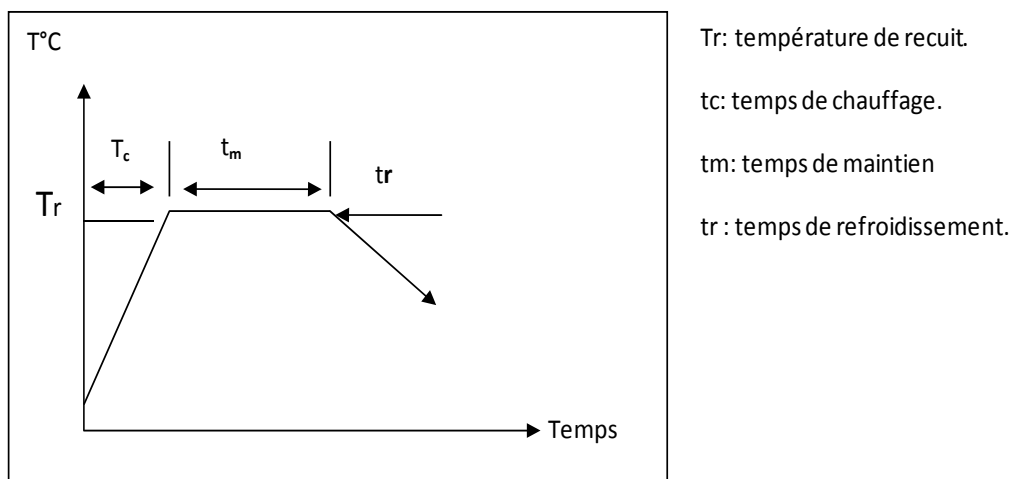


Figure I.10 : Cycle Thermique d'un Recuit

### I.5.1.2 Différents types de recuit

En pratique, il existe quatre types élémentaires de recuits ceux-ci sont déterminés en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre [2].

**a) Recuit d'adoucissement :** ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à  $A1+80$ ) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine. Une deuxième variante de ce recuit se nomme « recuit de coalescence » conduisant à la structure globulaire des carbures dans une matrice ferritique [2].

**b) Recuit de normalisation :** le recuit de normalisation a pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes. Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes:

- 1- Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit  $AC3+50^\circ$  pour les aciers hypoeutectoïdes et  $AcCm+50^\circ$  pour les aciers hypereutectoïdes. Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.
- 2- Refroidissement en général à l'air calme.

Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de  $A3$  suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Appelé également perlitisation a pour objectif de produire une structure perlitique à grains fins régulièrement repartis, ce qui, pour un acier perlitique, correspond aux propriétés mécaniques optimales. Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage [2].

**c) Recuit de détente :** on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à  $A1$ . Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques.

Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier. Les températures sont très variables selon la nature de l'état d'origine de même que les temps de maintien. Les contraintes sont décroissantes du temps et de la température et ne disparaissent entièrement qu'au moment où la pièce atteint la température de recristallisation de la ferrite.

Cette opération visant à supprimer les contraintes résiduelles est également nommée relaxation. Ce recuit peut être effectué en plusieurs phases alternées avec des opérations d'usinage [2].

**d) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :** les pièces coulées en acier sont soumises en général à une vitesse de refroidissement relativement rapide. Elle conduit en effet à une hétérogénéité chimique, où les éléments d'alliages ne sont pas répartis d'une façon régulière dans la structure. On est donc en présence du phénomène de ségrégation qui peut avoir une incidence

négligeable sur les propriétés des aciers. Le recuit d'homogénéisation est appliqué pour remédier à ce phénomène d'hétérogénéité. Il est caractérisé essentiellement par une diffusion accélérée des éléments dans la structure utilisant notamment une température élevée durant un temps prolongé. Il consiste en pratique aux opérations suivantes:

- 1- Chauffage de la pièce avec une vitesse qui doit respecter l'état de l'acier (sa composition chimique, sa conductibilité thermique, sa forme et ses dimensions). La température du traitement doit être de son côté suffisamment élevée du domaine austénitique pour accélérer le processus de diffusion des éléments dans la structure de l'austénite. Elle est fixée à  $(AC_3 + 200^\circ)$  et  $AcCm + 200^\circ$  respectivement pour les aciers hypoeutectoïdes et les aciers hypereutectoïdes.
- 2- Maintien prolongé à cette température. Le temps est calculé à l'aide des lois de la diffusion selon la nature des éléments d'alliages et les dimensions de la pièce.
- 3- Refroidissement à Vitesse Lente.

À la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains [2]

## **I.5.2. Traitement Thermique Revenu**

### **I.5.2.1 définition**

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à

$AC_1$ , (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante (Figure I.11).

La Figure I.11 présente le principe Cycle de Revenu, Temps en fonction de Température.

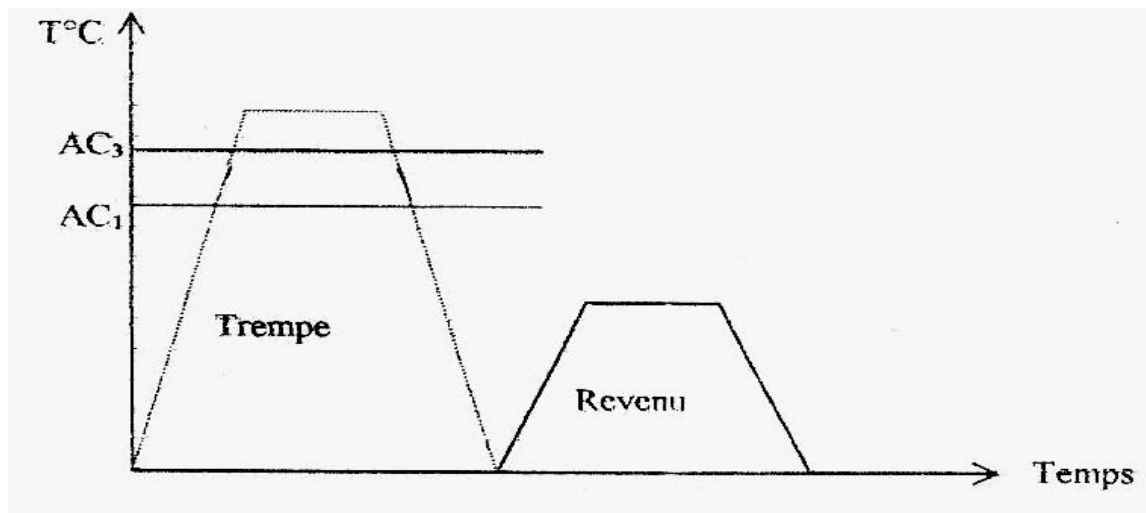


Figure I.11: Cycle de Revenu.[2]

Ce traitement est destiné à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable à froid, donc d'obtenir les propriétés mécaniques requises, c'est à dire la martensite se transforme en de nouveaux constituants (sorbite, bainite).

Donc le revenu permet de supprimer les contraintes internes provoquées par la trempe, de diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Cette suppression de contraintes est d'autant plus complète que la température du revenu est plus élevée, c'est à dire, l'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 min à 550°C.

La vitesse de refroidissement après revenu, a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600°C produit des contraintes thermiques nouvelles [2].

### I.5.2.2 Types de Revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

**a) Revenu de relaxation ou de détente :** il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [2].

**b) Revenu de structure ou classique :** dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et  $A_{c1}$ . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H,  $R_m$  et  $R_e$ . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [2].

**c) Revenu de durcissement :** des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).[2]

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (Figure I.12).[2].

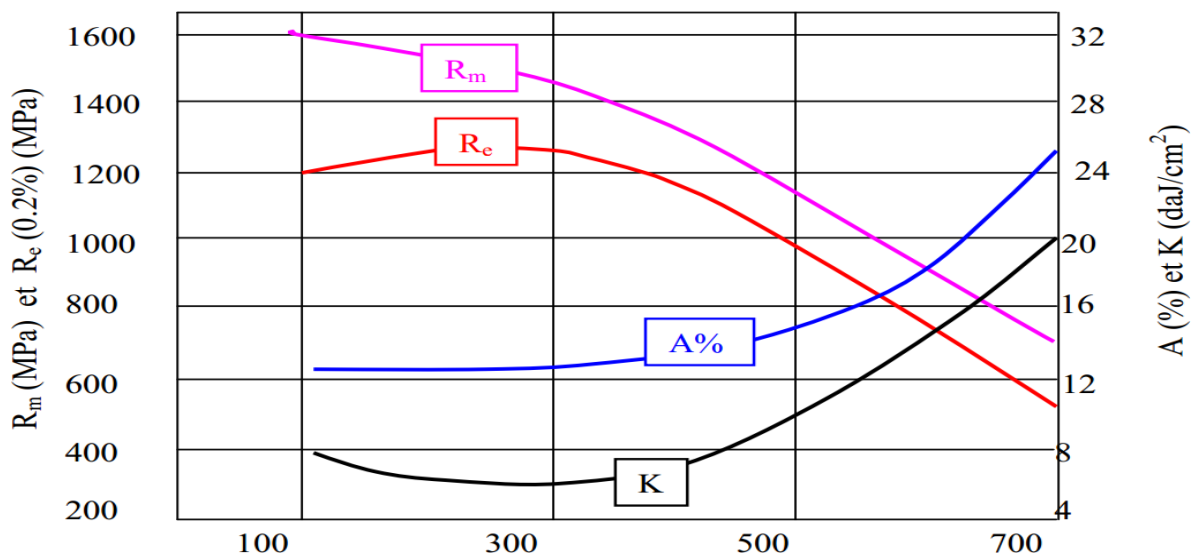


Figure I.12: Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu sur les aciers [2].

Le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 200° et 600°, puis d'un maintien à cette température pour permettre l'élimination des tensions dans toute la masse, suivi d'un refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes [2].



## **I.6.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions de base sur l'assemblage soudé, que ses avantages, et ses limites.

De plus, nous avons montré que le traitement thermique est une opération qui peut affecter la résistance et la ténacité d'un joint soudé, sa résistance à la corrosion et le niveau de contrainte résiduelle, mais il s'agit également d'une opération obligatoire spécifiée dans de nombreux codes et normes d'application. De plus, c'est une variable essentielle dans les spécifications de qualification d'un mode opératoire de soudage.

Dans le chapitre nous allons montrer les matériaux d'étude ainsi que les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser les joints de soudure ainsi que les traitements thermiques réalisés.

# **Chapitre II**

## **Matériaux utilisés et procédures expérimentales**

# *Chapitre II*

## **Matériaux utilisés et procédures expérimentales**

---

### **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre, les matériaux, équipements, théories et procédures qui ont été utilisés ou suivis dans ce travail sont présentés.

Premièrement, nous allons présenter avec détail le matériau de l'étude, sa composition chimique et ces propriétés mécaniques, ensuite, nous allons montrer la procédure de la préparation des échantillons avant d'effectuer les différents essais mécaniques.

De plus, les conditions de traitement thermique effectuée qui compris la température, le temps du maintien et refroidissement seront présentés.

Enfin, les équipements ainsi que le principe des tests destructifs (la traction, la résilience et la dureté) utilisés dans la caractérisation des échantillons seront présentés.

### **II.2 Matériau de l'étude**

Dans cette recherche, un acier X60 a été sélectionné pour être soudés au moyen du soudage à l'arc. Le matériau de notre étude est un acier non allié à moyenne teneur en carbone qui contient du carbone 0.57%-0.65% selon la norme EN10083. Leur composition chimique standard est présentée dans le Tableau II.1 ainsi que leur composition chimique typique telle qu'analysée par l'analyseur Spark Spectromax.

Ce matériau est souvent utilisé pour différentes applications d'ingénierie dans l'industrie, telles que l'automobile, les structures simples composants, gabarits, montages, équipements pharmaceutiques, récipients chimiques, récipients à vide, centrale électrique, etc., et ce à cause de sa dureté élevée et sa résistance élevée après durcissement. Cet acier est généralement fourni dans un état non traité ou normalisé.[15]

Le tableau II.1 ci-dessous afficher l'équivalent de l'acier xc60.

**Tableau II.1** : l'équivalent de l'acier xc60. [16]

Nuance	Ancienne Norme Nuances
C10	XC10
C22	XC18
C35	XC38
C45	XC48
C55	XC60
C60	XC60
C65	XC65
C80	XC80

Le tableau II.2 ci-dessous afficher Composition chimique de l'acier X60.

**Tableau II.2** : Composition chimique de l'acier X60. [17]

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
<b>MN</b>	0.57	0.60						
<b>MX</b>	0.65	0.90	0.40	0.045	0.045	0.40	0.10	0.40

Le tableau II.3 ci-dessous afficher Propriétés mécaniques de l'acier X60.

**Tableau II.3**: Propriétés mécaniques a à température ambiante à l'état normalisé (+ N). [18]

Diamètre d mm	$\leq 16$	16-100	100-250
Epaisseur t mm	$\leq 16$	16-100	100-160
Limite d'élasticité MPA	$\geq 380$	$\geq 340$	$\geq 310$
Résistance a la traction MPA	$\geq 710$	$\geq 670$	$\geq 650$
Allongement %	$\geq 10$	$\geq 11$	$\geq 11$

En revanche, ce type d'acier est adapté au traitement thermique afin d'être utilisé dans l'ingénierie mécanique et automobile telles que : roues, jantes, arbres dentés, cylindres, arbres, axes, goupilles, tournevis, pinces et articles similaires, cette nuance est également utilisée pour la fabrication des pipes line dans des entreprises industrielle (ALPHAPIPE), [19]

### II.3 préparations des éprouvettes

La composition chimique de l'échantillon selon les propriétés standard a été présentée dans le Tableau II.3. Des plaques d'acier prélevée à partir des bobines ont été découpées à l'aide d'une scie à ruban (Figure II.3). En pièces de dimensions (30×35) cm et l'Épaisseur nominal est 7.92mm.

Le soudage de joints bout à bout a été réalisé à l'intérieur du laboratoire mécanique de la société ALPHAPIPE. Les pièces ont été correctement positionnées pour faire un bord bout à bout rincé avec un seul côté (single-V). Le processus de soudage a été réalisé par soudage à l'arc. L'électrode de diamètre entre 4mm et 6 mm a été utilisée avec des constantes de courant entre 750-850 A de tension de 31-33 volts respectivement.

Le processus de nettoyage a été effectué sur toutes les plaques pour éliminer les poussières et les graisses. Ensuite, la préparation des bords de soudure de ces pièces est faite à l'aide de l'opération mécanique sur fraiseuse.

La première étape dans notre procédure expérimentale est à la préparation des échantillons, où nous avons découpé une plaque (Figure II. 1) (Figure II.2) qui sont utilisés pour former des tubes.

La Figure II.1 Présente une plaque découpée et soudé.



Figure II.1 une plaque découpée et soudé

La Figure II.2 Présente une bobine d'acier X 60.



Figure II.2 une bobine d'acier x60.

La Figure II.3 Présente scies à ruban.



Figure II.3. Scies à ruban

## II.4 Traitements thermiques

Dans ce travail, le traitement thermique « recuit de normalisation » a été appliqué aux différents échantillons soudés afin d'évaluer leur influence sur les propriétés mécaniques du joint, ce traitement a été effectué à une température de 600 °C pendant 2 heures avec une vitesse lente de refroidissement à l'air. Cela est fait dans un four électrique à température maximale de 1200 °C et à l'atmosphère ambiante .

Après avoir fini de préparer les échantillons et de les collecter, les échantillons sont divisés en deux catégories :

- 4 échantillons à l'état initiale.
- 4 échantillons destinés au traitement thermique.

La Figure II.4 Présente les 4 pièces ne sont pas traitées.



Figure II.4 les 4 pièces ne sont pas traitées.

Les échantillons sont dimensionnés selon les dimensions interne du four électrique (Figure II.7) qui ne dépasse pas 28 cm de longueur, et sa Lorsque nous avons terminé le processus de coupe, nous avons fait quelques retouches légères (Figure II.5) afin de couvrir les traces de la coupe.

La Figure II.5 Présente les pièces coupées et la pièce après le finicement.

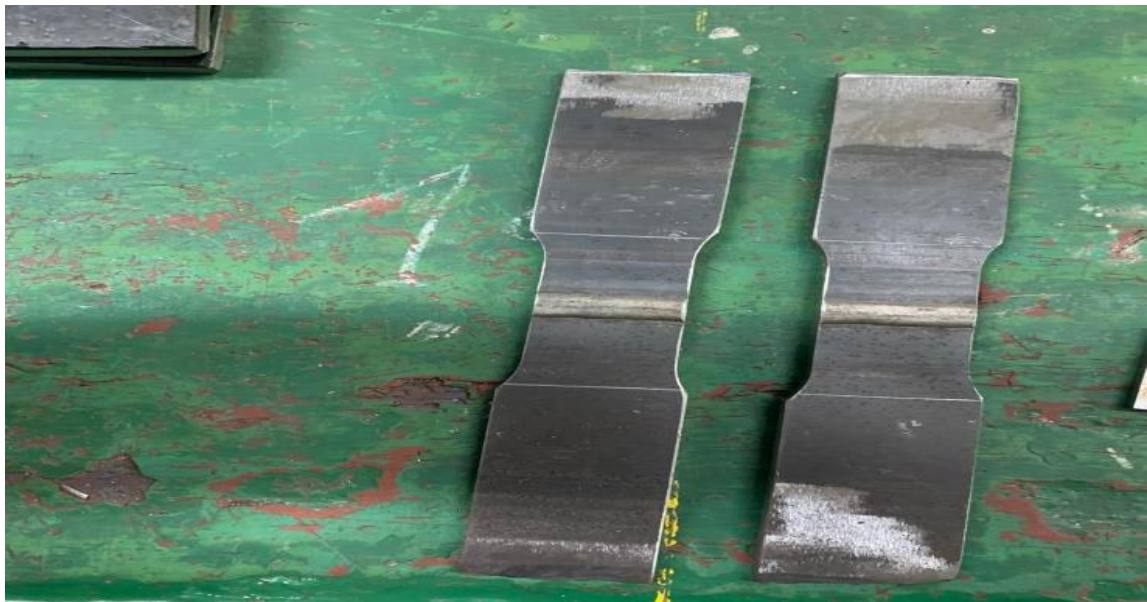


Figure II.5 pièces coupé et la pièce après le finicement.



La Figure II.6 Présente machines à cisailer.



Figure II.6 machines à cisailer

La Figure II.7 Présente four électrique.



Figure II.7 four électrique

Lorsque le four a été allumé, sa température a été réglée à 620 °C, on attende jusqu'à on atteindre la température requise. Immédiatement après cela, les pièces à traiter ont été inséré à l'intérieur du four à l'aide d'une pince (Figure II.9) (5 pièces de résilience, pièce de dureté, pièce de traction).

La Figure II.8 Présente les Pièces avant traitement.



Figure II.8 les Pièces avant traitement

La Figure II.9 Présente une pince.

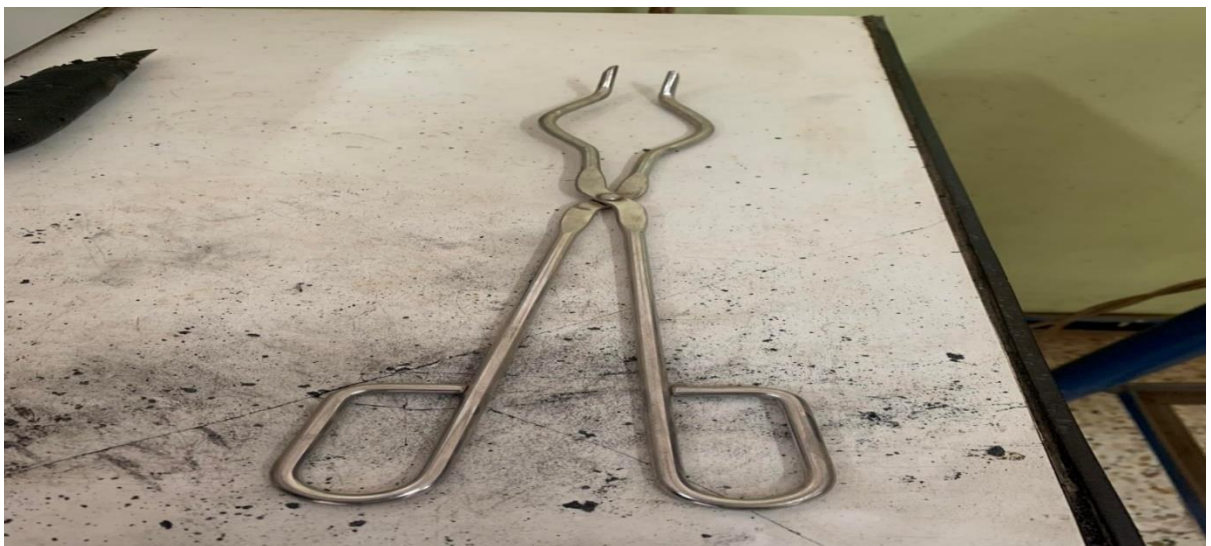


Figure II.9 une pince

Après les deux heures de chauffage des échantillons, nous avons retiré les échantillons de four (Figure II.10) pour les refroidir à l'air.

La Figure II.10 Présente Des échantillons traités.

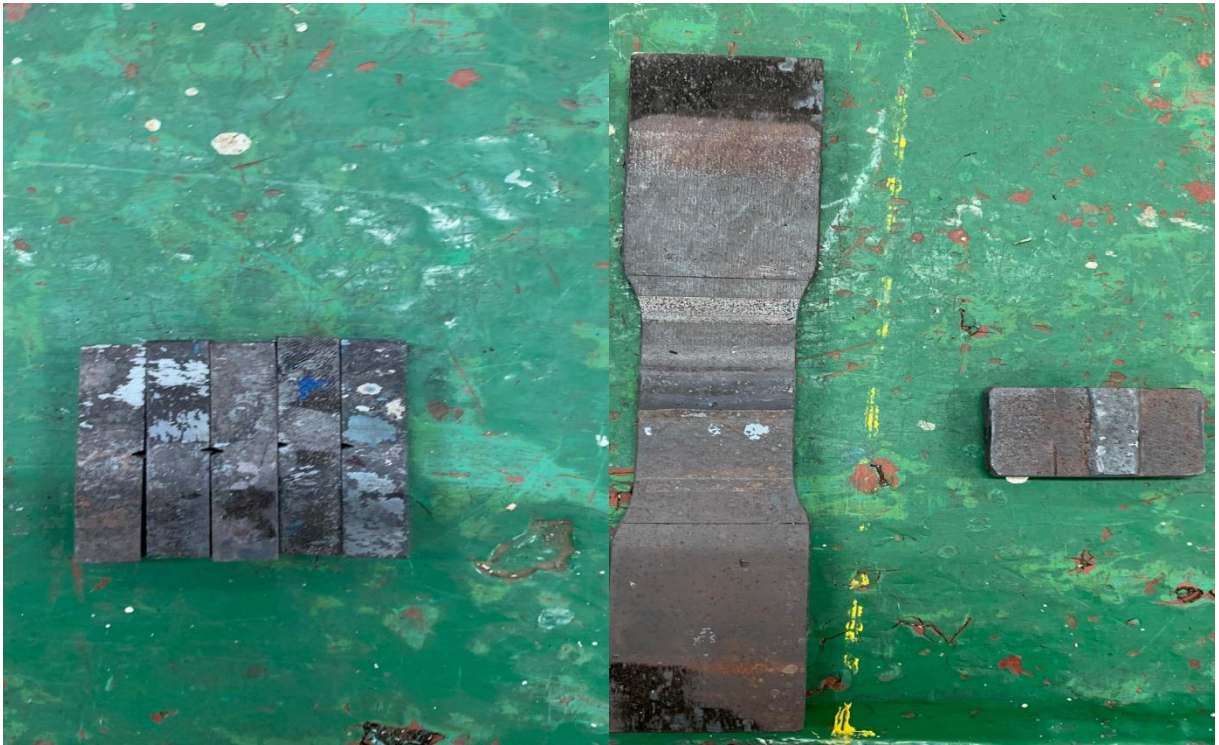


Figure II.10 Des échantillons traités.

Après refroidissement des échantillons à l'air, on remarque qu'il y a un changement de couleur des échantillons (les cinq échantillons du blanc au gris et un peu de noir, et les échantillons restants du noir au gris avec un peu de noir également) ce qui est montré dans la figure ci-dessus (Figure II.10)

## II.6 Essais mécanique

### II.6.1 Essais de traction

Les essais de traction ont été effectués, au laboratoire de mécanique d'Alfa pipe dans l'air à l'aide de la machine de traction universelle Z1200 de ZWICK ROELL à la Fig. (Figure II.11).

La vitesse de traverse : selon la norme iso 6892-1 la méthode A ont été appliquées pour tester la résistance à la traction de joints de soudure.

La moyenne d'au moins trois résultats pour chaque propriété mécanique ont été calculée pour chaque échantillon pour tous les matériaux. Les échantillons ont été produits en usinant les plaques soudées de leur côté inférieur à la taille requise de l'échantillon de traction.

La Figure II.14 est une photographie des différentes éprouvettes de traction utilisées dans ce travail, et la dimension de l'éprouvette de traction est  $(4.8 \times 27.5)$  cm avec un Epaisseur de 7.92mm voir la figure II.5.

Le dispositif de traction permet la mesure automatique des propriétés mécaniques de différents échantillons. Où nous avons inséré des informations sur l'échantillon (longueur, épaisseur) dans le programme (test x pert II).

La Figure II.11 et II.12 Présente machine de traction.



Figure II.11 une machine de traction.



Figure II.12 une machine de traction.

### II.6.1.1 Principe de l'essai

L'essai le plus couramment utilisé pour déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction, dans ce teste une force de traction est exercée sur une barre de taille standard, jusqu'à ce qu'elle se brise, après un processus de chargement à un taux de déformation constant. L'échantillon d'essai est prélevé dans le matériau à caractériser et façonné aux dimensions standard, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif on obtient un diagramme contrainte-déformation. [20]

L'échantillon standard du matériau à étudier doit être placé (Figure II.13) entre les mâchoires d'une machine de traction et l'essai est effectué à température ambiante, la force et l'allongement, qui peuvent être convertis en contrainte - souche.

La Figure II.13 Présente éprouvette de traction normalisée.

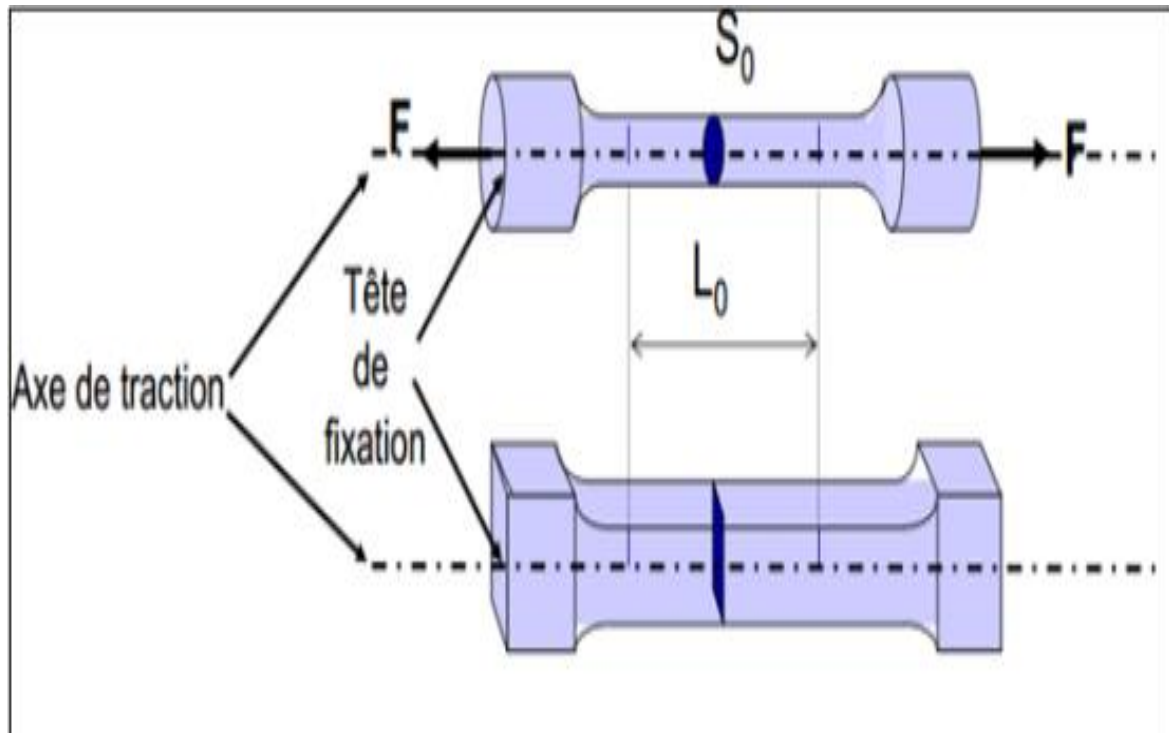


Figure II.13 éprouvettes de traction normalisée. [20]

Ce type de test est normalisé par les réglementations nationales et internationales :

- Géométrie des éprouvettes
- Machine d'essai et leur étalonnage
- Techniques expérimentales mises en œuvre, le dépouillement des résultats et leur présentation. [20]

La Figure II.14 Présente les échantillons après la traction.



Figure II.14 les échantillons après la traction

### II.6.2 Essais de résilience

Des éprouvettes sous-dimensionnés de résistance aux chocs Charpy ont été découpés à partir de chaque échantillon soudé. L'éprouvette d'impact a des sous-dimensions de (Longueur est 5.1cm et sa Largeur est 0.7cm) et a été produite par usinage. Les échantillons de résistance de résilience ont été testés à température ambiante à l'aide d'un testeur d'impact à pendule, illustré à la Figure II.15.

La moyenne d'au moins trois résultats de résistance aux chocs ont été calculée pour chaque échantillon où la résistance aux chocs a été considérée comme une réponse. Les moyennes expérimentales calculées ont été tabulées pour une analyse plus approfondie

Cet essai caractérise l'énergie absorbée par la rupture d'une éprouvette rainurée. L'essai le plus couramment utilisé pour évaluer la sensibilité à la rupture fragile au niveau des assemblages soudés est l'essai d'impact.

Il est souvent appelé test de l'effet Charpy ou encore test Charpy. Il porte le nom de l'ingénieur français Georges Sharpay (1865-1945) qui fut l'un des principaux théoriciens et promoteurs. [21]

Il a notamment mis au point la machine permettant de réaliser le test appelée Mouton Charpy (Figure II.15).

La Figure II.15 Présente Machine d'essai de résilience.



Figure II.15 Machine d'essai de résilience.



### II.6.2.1 Principe d'essai mécanique

C'est un essai de résistance au choc, qui consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour casser une éprouvette préalablement entaillée. On utilise en général un échantillon en forme de barreau de section carrée et de dimension standard (10mmx10mmx55mm).

L'entaille peut être soit en V (angle de 45° et de profondeur 2mm), soit en U de profondeur 5mm et de rayon en fond d'entaille de 1mm.

. La lecture de l'énergie d'impact consommé par l'éprouvette est effectuée directement sur le cadran en joule ; le poids du pendule est de 20 Kg. Le mouton pendule à une puissance de travail égale à 300 joules. Cette énergie dans notre machine est donnée directement sur un écran gradué. [22]

La Figure II.16 Présente le Principe de l'essai de résilience utilisant un mouton-Charpy.

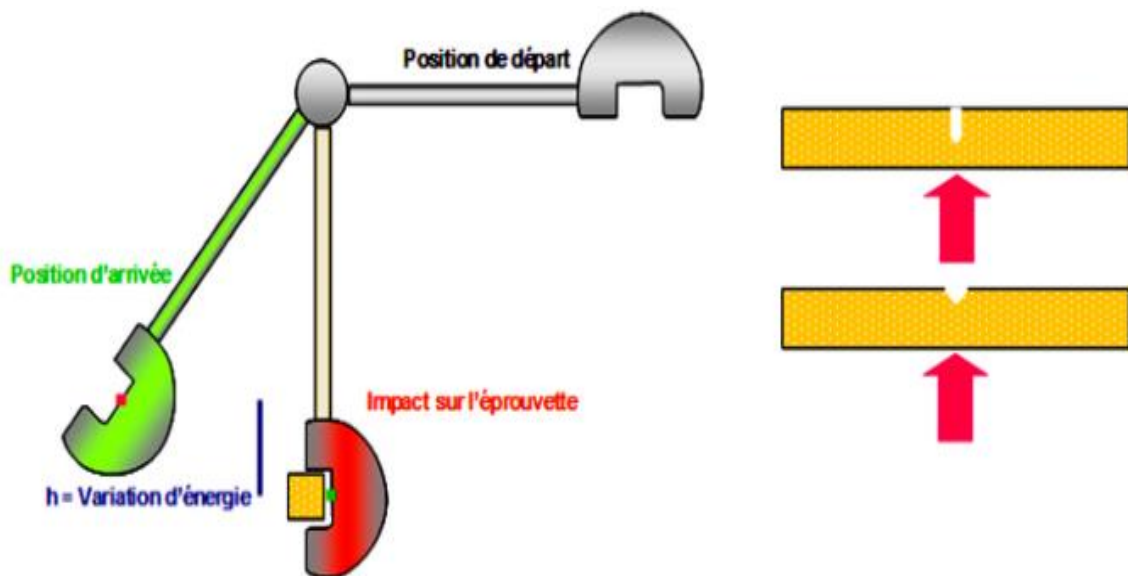


Figure II.16 Principe de l'essai de résilience utilisant un mouton-Charpy.[22]

On détermine l'énergie absorbée dont on déduit la résilience.

La résilience est l'énergie exprimée en Joules par cm<sup>2</sup>, nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, Un couteau fixé sur un marteau oscille dans un plan vertical autour d'un axe O.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (joules)}}{\text{section au niveau de l'entaille (cm}^2\text{)}}$$

Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ

$W_0 = 300$  joules. [22]

La Figure II.17 Présente les échantillons après résilience



Figure II.17 les échantillons après résilience.

### II.6.3 Essais de dureté

Les mesures de microdureté ont été effectuées à température ambiante avec un testeur de micro dureté Durometre Zwick/Roell, illustré à la Figure II.17 équipé d'un pénétrateur diamant Vickers. Une charge de 0,1 kg a été appliquée pendant quinze secondes et la taille de l'indentation a été mesurée à l'aide d'un microscope optique fourni avec le testeur de microdureté. Le nombre de dureté Vickers est basé sur la force divisée par la surface de l'indentation, comme on peut le voir dans l'équation.

$$HV = 1.8544 \times \frac{P}{d^2}$$

Cinq mesures ont été réalisées à différents endroits pour chaque éprouvette transversale de soudure à savoir : zone soudée, ZAT et métal de base, puis la moyenne de ces cinq mesures a été calculée pour chaque emplacement.

L'essai de dureté a été effectué sur l'échantillon, sur une machine nommée Zwick Roell Durometer Figure II.17.

Le duromètre Zwick Roell permet de tester avec exactitude la résistance à la flexion et de mesurer précisément le degré de dureté.

La dureté d'un métal est son aptitude à résister à la pénétration. La mesure de cette grandeur est très importante car elle nous permet de déterminer le comportement physico-chimique et mécanique d'un alliage. Il faut préciser qu'en grande partie, c'est le taux de carbone dans l'acier, qui gère ce comportement.

La Figure II.17 Présente Machine d'essai de dureté.



Figure II.17 Machine d'essai de dureté

### II.6.3.1 Principe de l'essai mécanique

La mesure de dureté par pénétration est la plus couramment pratiquée. Le principe est toujours identique un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté. [23]

Le principe de base du duromètre Vickers, comme pour toutes les mesures courantes de la dureté, consiste à observer la capacité du matériau à résister à la déformation plastique à partir d'une source standard. L'essai duromètre Vickers peut être utilisé pour tous les métaux et offre l'une des échelles les plus étendues parmi les essais de dureté. L'unité de dureté donnée par l'essai est connue sous le nom de Valeur de la pyramide Vickers (HV) ou Valeur de Dureté.[24]

Des précautions opératoires nécessaires de l'essai Vickers tel que :

- Les empreintes étant petites, les irrégularités de la surface prennent une importance plus grande encore que dans les essais précédents, particulièrement pour les fortes duretés et les faibles charges aussi parfait.
- La distance entre le centre d'une empreinte et le bord de la pièce ou les côtes d'une autre empreinte ne doit pas être inférieure à 2,5 fois la diagonale. L'épaisseur de la pièce doit être supérieure à 1,5 fois la diagonale de l'empreinte.
- La pièce doit reposer sur le support de façon régulière et uniforme.
- L'état du diamant doit être fréquemment vérifié. [25]

**II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes étapes liées à notre procédure expérimentales Méthodes de préparation des échantillons, conditions de traitement thermique appliqué et la démonstration de divers tests utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques de l'acier soudé X 60.

Les résultats obtenus dans ces études seront présentés dans le chapitre suivant

## **Chapitre III**

# **RESULTATS EXPERIMENTAUX**

# Chapitre III

## Résultats expérimentaux

---

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons analyser et discuter les résultats de tests mécaniques (test de traction, test de dureté, test d'élasticité) que nous avons effectués les échantillons d'acier X60 ,et ce en comparons entre les résultats sans et avec traitement thermique dans de l'objectif de découvrir l'effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques des échantillons testés et dans quelle mesure il affecte l'amélioration des propriétés des matériaux et les rend plus adaptés à une utilisation particulière, sur la base des changements suivants :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$  (résistance maximum),  $A\%$  (Allongement) ce qui donne une meilleure résistance de l'élément.
- Dureté accrue, permettant aux pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

### III.2 Essai de Traction

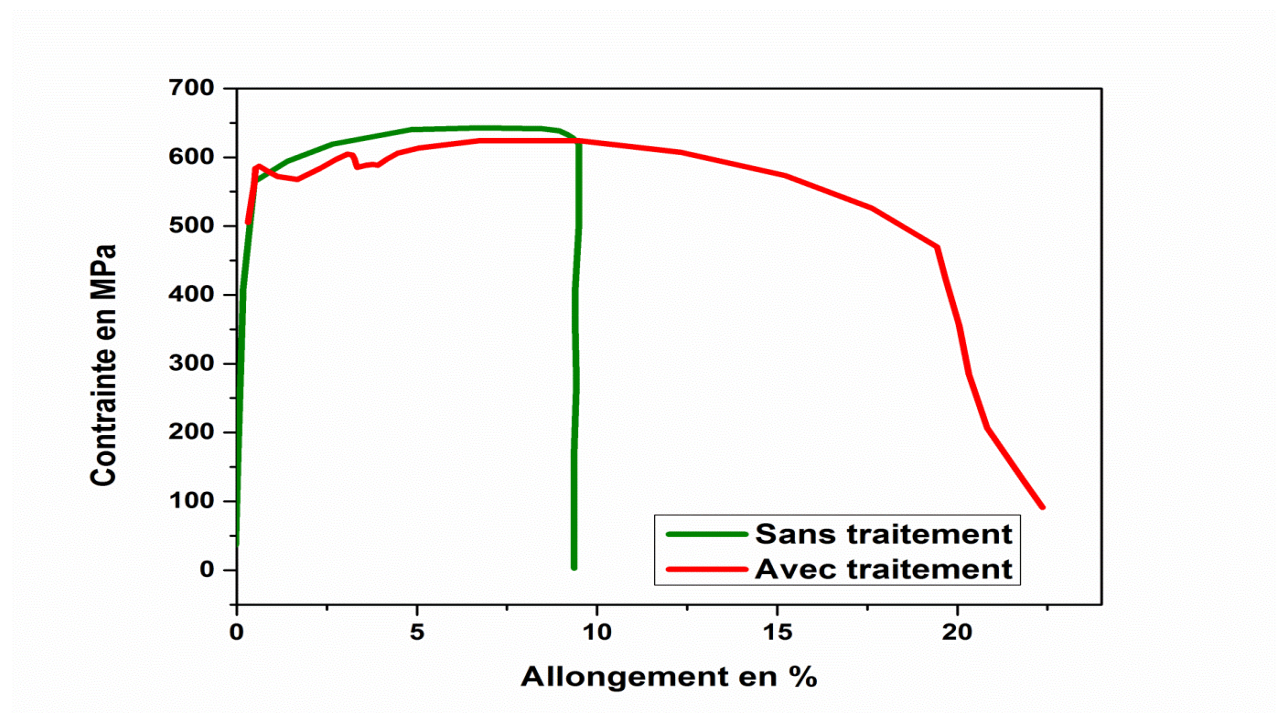
L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plupart des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique. [2]

Le tableau III.1 Le tableau ci-dessous présente les propriétés mécaniques après essai de traction.

**Tableau III.1** Résultats essai de traction.

Nr	Désignation éprouvette	a0 mm	b0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Rm MPa	A50.8 %
1	TEST SANS TRAITEMENT	7.89	39.74	314.57	627	9.4
2	TEST AVEC TRAITEMENT	7.89	39.87	314.57	609	22.9

La courbe de FigureIII.1 représente l'allongement en fonction de la contrainte.



FigureIII.1.la courbe de traction.

Les essais de traction ont été réalisés sur les échantillons (échantillons avec réalisation de traitements thermiques sur lesquels et échantillons sans réalisation de traitements thermiques).



Les courbes de traction peuvent interpréter comme suite

- ❖ Sur les deux courbes, il existe une phase initiale linéaire qui reflète le comportement élastique du matériau.
- ❖ Dans la première courbe qui correspond aux échantillons sans traitement thermique, on constate une bonne résistance à la traction avec la limite d'élasticité de  $R_e = 560$  MPa, la résistance mécanique  $R_m$  qui dépasse 627 MPa et l'allongement pouvant se poursuivre jusqu'à 9,40.
- ❖ La deuxième courbe représente les échantillons traités thermiquement, on constate une bonne résistance à la traction est avec une limite élastique de 0,5 E pour  $R_E = 580$  MPa, une résistance mécanique  $R_m = 609$  MPa, et un allongement important pouvant continuer à 23 %.

Les résultats étaient bons et approximatifs, l'allongement est augmenté lors de l'exécution du traitement thermique après le processus de soudage comme indiqué sur la Figure III.1.

Cette augmentation de la résistance à la traction après traitement thermique pourrait être due au fait que les contraintes résiduelles stockées dans la soudure sont soulagées et on peut dire que le traitement thermique recuit de relaxation de l'air a augmenté la cohésion de l'échantillon (allongement) représentée par la zone de la courbe de traction, de sorte que la flexibilité des échantillons traités à l'air est efficace.

### III.3. Essai de Résilience

Cet essai détermine la quantité d'énergie absorbée par un matériau lors de la rupture. Nos essais ont pour but de déterminer la résistance des soudures traitées thermiquement et sans traitées à choc.

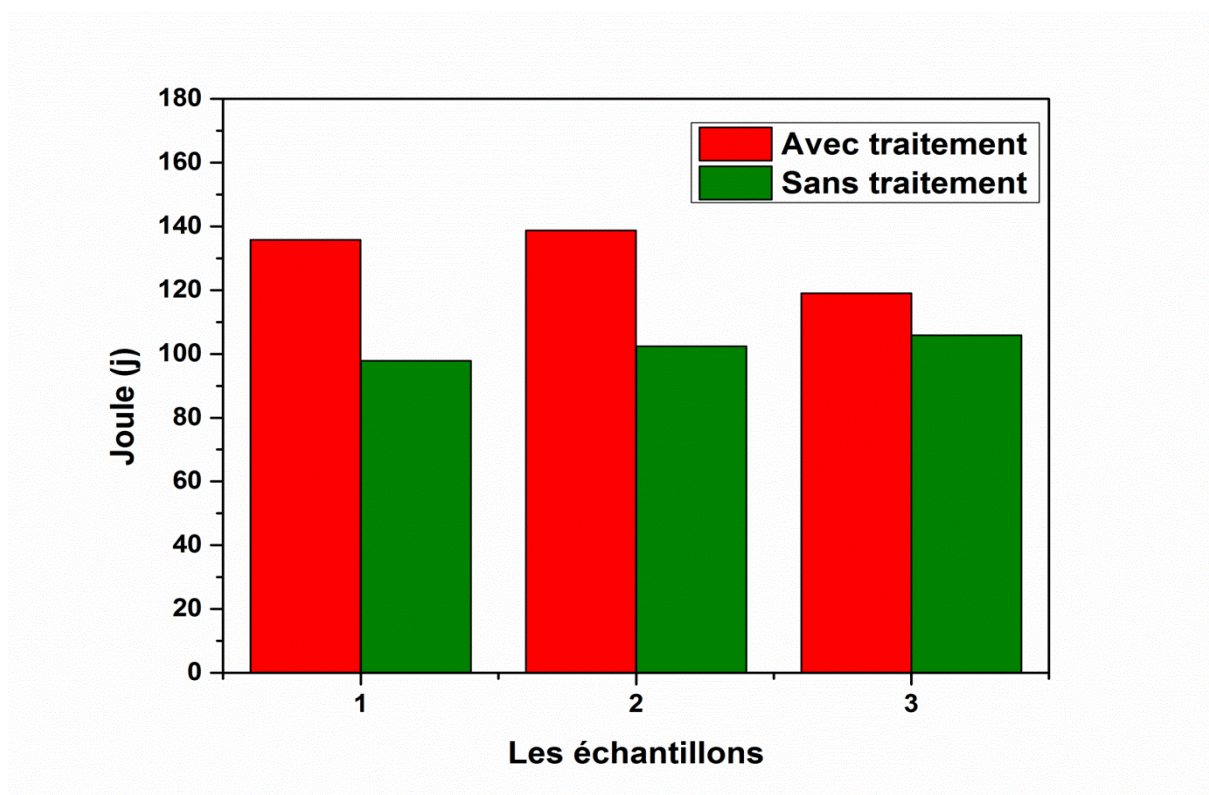
Les tests de ténacité ont été effectués sur les échantillons (échantillons avec traitement thermique et échantillons sans traitement thermique). Il en résulte une énergie d'impact minimale avant traitement thermique qui a été estimée à 105 joules comme valeur supérieure et une énergie d'impact maximale après traitement thermique qui est estimée à 138,7 joules.

Tableau III.02 Les résultats expérimentaux de la résilience sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III.2** : Les résultats de la résilience.

Les échantillons	Test avec traitement	Test sans traitement
1	135.8 j	97.9 j
2	138.7 j	102.4 j
3	119.1 j	105.9 j

La Figure III.3 présenter Résultats de l'histogramme de résilience.



FigureIII.2 : Résultats de l'histogramme de résilience.

On remarque sur le graphique 2.2 ci-dessus une différence dans la force des chocs traités thermiquement,

La résistance que nous cherchons à étudier ici est assez commune avec la résistance observée lors d'un essai de traction statique. Nous confirmons que le traitement thermique a pour rôle de modifier les propriétés physiques, ce qui se traduit par la dureté et la ductilité de l'acier.

### III.4. Essai de dureté

Les échantillons de soudure ont été examinés pour des lectures précises de l'ensemble du joint de soudure à partir du métal de soudure, de la zone affectée thermique, puis du métal de base, et des deux côtés de la soudure, à une distance de (1 mm) entre la lecture et une autre des trois joints soudés (échantillons avec réalisation de traitements thermiques sur lesquels et échantillons sans réalisation de traitements thermiques). Les essais de dureté sont réalisés sur la zone de fondu (ZF) et zone affective thermique (ZAT).

Nous avons effectué des tests de dureté sur la machine HV10 (ZWICK), qui a été étalonnée et certifiée, dans le laboratoire ALFAPIPE.

#### a) Test sans Traitement

- ✓ Les points (8.24.25.16.30.31) : sont appliqués sur la zone affectée thermiquement (ZAT).
- ✓ Les points (39.40.41.42.43.44.45) : sont appliqués sur zone fondue (ZF).

Tableau. III.3 présente Résultat de l'essai de dureté sur un échantillon sans traitement thermique sur une machine.

**Tableau III.3** Résultat de l'essai La dureté.

Nr	Zone de test	d <sub>h</sub> μm	d <sub>v</sub> μm	HV 10
8	ZAT	330.5	323.6	173
24		320.0	322.9	179
25		321.0	325.8	177
39	Zone fondue	290.7	293.1	218
40		288.4	288.7	223
41		291.9	288.2	220
42		289.4	289.0	222
43		291.1	289.4	220
44		289.0	291.7	220
45		291.8	296.7	214
16	ZAT	326.9	317.9	178
30		323.5	326.4	176
31		323.5	323.0	177

La Figure III.3 présenter Spécimen en fonction de la Force sans traitement.

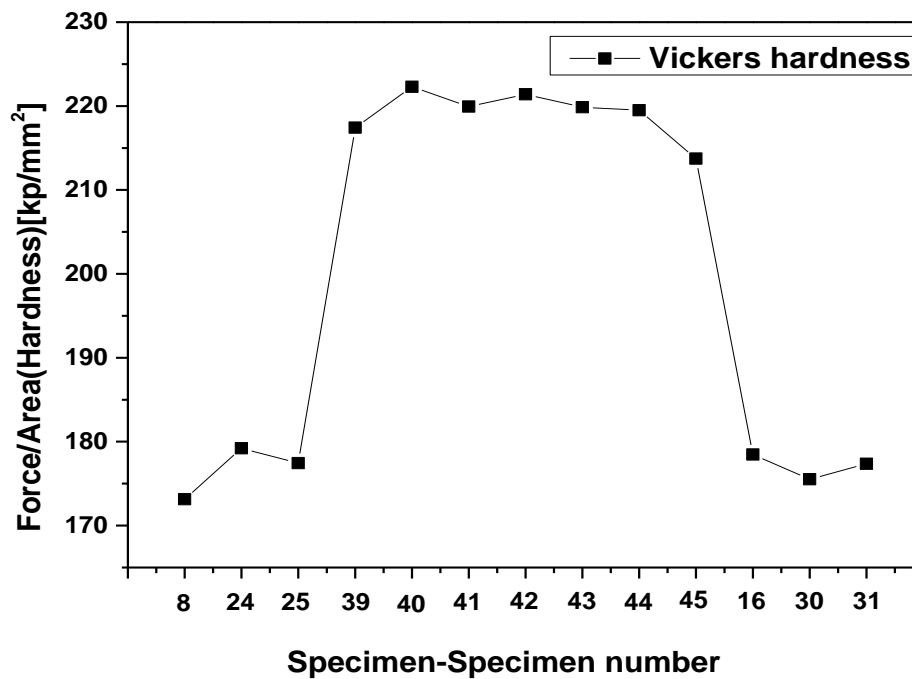


Figure III.3 la courbe dureté sur un échantillon sans traitement.

On constate qu'il existe une légère différence de dureté entre les différentes zones de l'échantillon qui ne dépasse pas 22% (dureté maximale égale à 223 et dureté minimale égale à 173)

#### b) Test avec Traitement Thermique

Les points (5.6.7.13.14.15) : sont appliqués sur la zone affectée thermiquement (ZAT).

Les points (10.11.12.27.28.29) : sont appliqués sur zone fondue (ZF).

Tableau. III.4 présente Résultat de l'essai de dureté sur un échantillon avec traitement thermique.

**Tableau III.4.** Résultat de l'essai La dureté.

Nr	Zone de test	$d_h$ $\mu\text{m}$	$d_v$ $\mu\text{m}$	HV 10
5	ZAT	303.7	312.2	196
6		312.3	315.1	188
7		315.9	308.3	190
9	ZF	294.2	294.2	214
10		297.7	299.7	208
11		296.2	293.4	213

12	Zone fondue	296.7	291.3	215
27		293.3	293.1	216
28		298.3	294.4	211
29		296.0	298.4	210
13	ZAT	308.6	306.2	196
14		308.5	309.0	194
15		312.3	309.6	192

La Figure III.4 présente la courbe dureté sur un échantillon avec traitement.

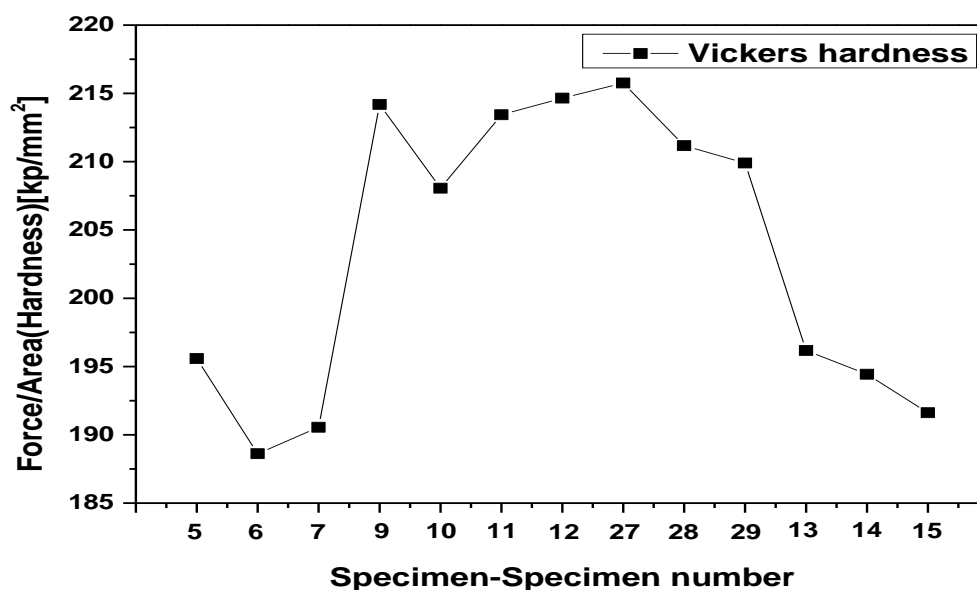


Figure III.4 la courbe dureté sur un échantillon avec traitement

Dans ce cas, on remarque une légère différence de dureté entre les différentes régions de l'échantillon qui ne dépasse pas 13% (la prière maximale est de 216 et la dureté minimale est de 188).

Les tableaux 3 et 4 donnent des duretés sur plusieurs points différents

Avant le traitement thermique, les valeurs de microdureté dans le ZF sont supérieures à celles du ZAT, après le traitement thermique, la microdureté dans les joints augmente de manière significative, il est devenu proche de celle de la ZF .

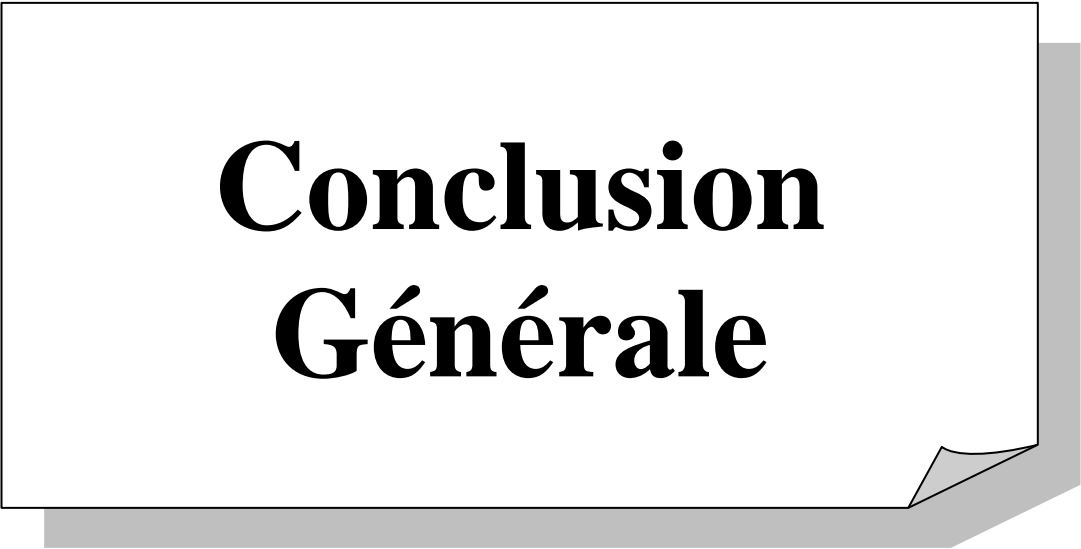
La Figure III.3 et4 présente les duretés des joints soudés acier X60 : non traité, traité à. L'analyse du graphe de dureté met en évidence l'influence du phénomène thermique du soudage sur

le joint. On remarque que la moyenne de la microdureté varie d'une zone à l'autre. Une augmentation de la microdureté est enregistrée dans les zones ZAT du joint soudé et traité à 620°C par rapport au cas de l'échantillon non traité .

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus après la caractérisation mécanique (traction - élasticité - dureté) des éprouvettes en acier X 60 soudé par l'arc électrique avec une comparaison entre des éprouvettes traités et non traités thermiquement, cela a nous permis de mettre en évidence leurs propriétés après le traitement thermique de recuit.

En générale, nous avons constaté que ce traitement thermique à 620°C a un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques et l'obtention d'une structure aux propriétés plus favorables.



# **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

---

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du traitement thermique des soudures en acier X60. Elle a été conduite selon une démarche purement expérimentale pour comprendre les principaux phénomènes, à prendre en compte lors de la réalisation de jonctions soudées, tenue mécanique d'interfaces soudées.

Notre travail visait en premier lieu l'effet du traitement thermique de l'acier X60 avec refroidissement à l'air, positif ou négatif sur le comportement mécanique de l'échantillon.

Pour ce faire, la mise en œuvre d'une large gamme de techniques de caractérisation par profils de dureté Vickers, les essais de traction, les essais de résilience a été indispensable. Les premiers travaux menés consolidés par ces différentes analyses ont confirmé un certain nombre de résultats, à savoir :

Après des essais mécaniques effectués sur des joints soudés, déduire ce qui suit :

1. L'étude métallographique des cordons de soudure a défini trois zones distinctes : la zone fondue (ZF), la zone affectée thermiquement (ZAT) et le matériau de base (MB).
2. Le traitement thermique a un effet net et significatif sur les propriétés mécaniques de l'acier, où l'on observe l'amélioration de la ténacité.
3. L'essai de la traction, a montré que le traitement à 620 °C a donné la meilleure valeur de l'allongement.
4. Le résultat est l'énergie d'impact minimale avant le traitement thermique et l'énergie d'impact maximale après le traitement thermique.
5. Après l'étude de microdureté nous avons constaté une différence de dureté dans les trois zones du joint soudé.

La pièce traitée a produit divers aspects que celle du cas non traité, cette constatation se base sur les essais mécaniques que nous avons appliqués (dureté, traction, résilience), qui montrent que l'effet de traitements thermiques est plus que bénéfique dans le cas de recuit à l'air, sur le comportement mécanique, et par conséquent de réduire considérablement le taux des dégradations des soudures en service à tous les niveaux des zones (ZF) et (ZAT)





**Références  
bibliographiques**

## **Références :**

- [1] - BENARRACHE, S., and H. A. BENHORMA. "Effet des Traitements Thermiques sur la Formation et la Dissolution des Carbures et Nitrures dans le Cordon de Soudure de l'Acier X70." *Revue des sciences et sciences de l'ingénieur* 3.1 (2013) : 13-19.
- [2] - DEBABI, ADIL. *Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique*. Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.
- [3] - MOSTEFA Abdellatif, "Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration à froid dans la ZAT".
- [4] - *Soudage de métaux : les principaux procédés Techniques, définitions, matériel et équipements de protection*. Publié le 28/05/2015 par Feriel BELCADHI.
- [5] – WebSite. <https://materiel-soudure.4mepro.com/content/140-guide-les-differents-types-de-soudage>.17/03/2022
- [6] - Li, Jun. *Simulation de réparation par soudage et billage ultrasonore d'un alliage à base Nickel*. Diss. Lyon, INSA, 2011.
- [7] - Zalt, Abdulkader. *Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson*. Diss. Université de Lorraine, 2012
- [8] - <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-l-arc-e-e-mma-smaw-111-263/>.
- [9] - AISSANI, Mouloud. *Étude du comportement thermique et mécanique des matériaux aéronautiques par des méthodes numériques : application au soudage de structure métallique*. Diss. Université Saad Dahlab-Blida 1, 2013.
- [10] – WebSite. <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-l-arc-e-e-mma-smaw-111-263/>. 20/03/2022.
- [11] -WebSite <https://learnmech.com/gas-welding-equipment-basic-of-gas-welding/> .21/03/2022
- [12] -WebSite<[https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage\\_TIG](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG)>. 21/03/2022.
- [13] -WebSite <https://metalblog.ctif.com/2020/05/25/les-technologies-de-soudage-des-pieces-en-aluminium-2/> .21/03/2022.
- [14] - PROCÉDÉS DE SOUDAGE - Dunod PDF.

[15] ACIER 1060 | C60 | 1.0601 | AISI 1060 | S60C. WebSite

[https://waldunsteel.com/fr/products/1060steel/#21060\\_Steel\\_Chemical\\_Composition](https://waldunsteel.com/fr/products/1060steel/#21060_Steel_Chemical_Composition).

01/04/2022.

[16] photo sur Google.

[https://www.google.com/search?q=composant+chimique+acier+xc60&hl=fr&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjRtJDes4D3AhXRgP0HHWY6BxEQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=600&dpr=1#imgrc=Ne58S7WaxpE7rM](https://www.google.com/search?q=composant+chimique+acier+xc60&hl=fr&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjRtJDes4D3AhXRgP0HHWY6BxEQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=600&dpr=1#imgrc=Ne58S7WaxpE7rM).03/04/2022.

[17] Acier-Carbone-C60-AUSA

<http://www.ausasteel.com/wp-content/uploads/2015/05/Acier-Carbone-C60-AUSA.pdf>.

05/04/2022.

[18]- ACIER 1060 PROPRIÉTÉ MÉCANIQUE. [https://waldunsteel.com/fr/products/1060-steel/#21060\\_Steel\\_Chemical\\_Composition](https://waldunsteel.com/fr/products/1060-steel/#21060_Steel_Chemical_Composition).07/05/2022

[19]-ACIER 1060 APPLICATION : [https://waldunsteel.com/fr/products/1060-steel/#21060\\_Steel\\_Chemical\\_Composition](https://waldunsteel.com/fr/products/1060-steel/#21060_Steel_Chemical_Composition).07/04/2022.

[20] Par : OUADFEL OMAR FAROUK - BENOMARI KAMEL « Méthodes de caractérisation expérimentale de matériaux métalliques »

[21] LAKHDARI, Lakhdar. L'effet du soudage par induction sur les aciers. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, 2019.

[22] L'essai de résilience :

<http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap4/site/html/7.html#7>.12/04/2022

[23] Pénétration

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9\\_\(mat%C3%A9riau\)#P%C3%A9n%C3%A9tration](https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_(mat%C3%A9riau)#P%C3%A9n%C3%A9tration).14/04/2022.

[24]-DUROMÈTRE VICKERS .<https://www.innovatest-europe.com/fr/vickers/>.14/04/2022.

[25] - MESSAADI, SACI. Etude de la microdureté Vickers des poudres chimiques de Ni-P. Diss. UNIVERSITE DE BATNA, 2012.