



*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'enseignement Supérieure*

*Et La de Recherche Scientifique*

*Université de Larbi Tébessi -Tebessa*

*Faculté des Sciences et Technologie*

*Département : Génie Mécanique*



*Mémoire de fin d'étude*

*Pour l'obtention du diplôme de MASTER*

*Domaine : Science et Technologie*

*Filière : Génie Mécanique*

*Option : Génie Matériaux*

*Thème*

**EFFETS DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS  
MÉCANIQUES DES ASSEMBLAGES SOUDÉS**

*Présenté Par :*

***Messaadia Louardi***

*Encadre par :*

***Dr. Bouzid laouadi***

*Devant le jury :*

***Dr. TORCHANE Lazhar***

*MCA*

*Université Larbi Tébessa*

*Président*

***BOULEDROA Besma***

*MAA*

*Université Larbi Tébessa*

*Examinatrice*

***Dr. LAOUADI Bouzid***

*MCB*

*Université Larbi Tébessa*

*Encadreur*

**Année universitaire: 2020/2021**

# *Dedicace*

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et  
la patience de terminer ce travail.

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs  
prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma reconnaissance à mon  
encadreur de mémoire Monsieur le Docteur **bouid laouadi**

A mes chers amis et collègues de promotion

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

**Merci d'être toujours là pour moi.**



# Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de terminer ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma reconnaissance à mon encadreur de mémoire Monsieur le Docteur **bouzi laouadi** qui m'ont encadré et soutenu tout au long de ce travail de mémoire. Leurs grandes qualités humaines, leurs conseils scientifiques, et leurs critiques constructives ont rendu ce travail particulièrement enrichissant. Je tiens à les remercier pour m'avoir communiqué leurs passions pour la recherche scientifique.

Mes remerciements s'adressent aux **membres du jury** pour l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger notre travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à **mes parents, mes frères, mes sœurs** ainsi qu'à toute la famille pour leur soutien moral, leur encouragement inconditionnel et leurs aïdés financiers. Sans oublier de remercier tous les **enseignants et enseignantes** qui, pendant mon cursus universitaire, ont veillé pour ma formation et ma réussite.

Tous les mots restent faibles pour exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, en particulier tous **mes amis** pour leur soutien moral et leur présence à mes côtés.



## ملخص

إن تجميع الأنابيب بطرق التلحيم يحتل مكانة هامة في الصناعة البترولية. وبالأخص المعادن ذات المرونة العالية HSLA-X70 والتي تُستخدم هنا بالنظر لجودة قابلية تلحيمها SMAW، وهذه الأخيرة تنتج عنها فوارق ميكانيكية كبيرة بين مختلف أجزاء اللحام وأيضا إجهادات غير مرغوب فيها. وهنا تكمن دراستنا لتكامل الأعمال السابقة التي تهتم بدراسة المعالجات الحرارية للحام. والتي تطرقنا من خلالها لتأثير المعالجات الحرارية بعد التلحيم على الخصائص الميكانيكية والتعدينية لمعدن من نوع ferrito-perlitique.

كلمات مفتاحية: تلحيم، SMAW، HSLA-X70 المعالجات الحرارية.

## Résumé

L'assemblage des pipelines par soudure occupe une place très importante dans l'industrie pétrolière. Bien précisément les aciers HSLA-X70 sont plus utilisables vu leur bonne soudabilité par le procédé de soudage SMAW. En conséquence, les gradients thermiques se manifestant lors du soudage conduit inévitablement à la création des contraintes résiduelles et hétérogénéité microstructurale.

. Delà, vient notre étude compléter les travaux déjà accomplis. On abordera l'effet des traitements thermiques des différents milieux de trempe relaxation sur les propriétés mécaniques et métallurgiques de soudure d'un acier ferrito-perlitique X70.

**Mots Clé :** soudage SMAW, HSLA -X70, traitement thermique

## Abstract

Pipelines welding assembly occupies an important place in Oil industry. Precisely HSLA-X70 steels are more usable because of their good weldability by SMAW processes. Accordingly, the temperature gradients created during welding cause inevitably the creation of heterogeneous zones and residual stresses. Our study comes to complete previous works. We focused on heat treatments, their consequences on mechanical and metallurgical properties of ferrite-perlitic X70 steel after welding.

**Keywords:** SMAW welding, HSLA-X70, heat treatment.

## Sommaire

<i>Dedicace</i> .....	II
Remerciements .....	III
مخصص .....	IV
<b>Sommaire</b> .....	V
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	XI
<b>Nomenclature</b> .....	XII
<b>Introduction Générale</b> .....	2
<b>Chapitre 01 : État d’art de soudage</b> .....	4
1. Introduction .....	5
2. Histoire du soudage .....	5
3. Définition du soudage.....	5
4. Types des assemblages soudés .....	6
4.1. Assemblage bout-à-bout .....	6
4.2 Assemblage en coin ou en angles .....	7
4.3 Assemblage à bords relevés.....	7
4.4 Assemblage par recouvrement.....	8
5. Soudage à l’arc électrique .....	9
5.1. Soudage à l’arc avec électrode enrobée (SMAW) .....	9
5.1.1. Définition.....	9
5.1.2. Principe du procédé .....	9
5.1.3 Définition de l’électrode enrobée .....	10
5.1.4 Rôle de l’enrobage.....	10
5.1.5 Différents types d’enrobage .....	11
Tableau 1. 1: représente les différents types d’enrobage [12]......	11
5.1.6 Avantages et inconvénients.....	11
5.2 SOUDAGE TIG (GTAW) .....	12
5.2.1 Définition.....	12
5.2.2 Générateurs et méthodes d’amorçage .....	13
5.2.3 Les différents courants.....	14

---

a) Courant continu .....	14
b) Courant continue pulsé .....	15
c) Courant alternatif .....	15
d) Électrodes utilisées .....	16
5.2.4 Les gaz de protection : .....	17
5.2.5 Paramètres de soudage .....	18
a. Pour les aciers et aciers inoxydables : .....	18
b. Pour les aluminiums et alliages : .....	18
5.2.6 Avantages et inconvénients .....	18
Chapitre 02 : .....	20
Etude Métallurgique de soudage .....	20
<b>1- Introduction</b> .....	21
<b>2- Aspect thermique du soudage</b> .....	21
2.1 Cycle thermique du soudage mono passe .....	21
<b>3- Aspects métallurgiques du soudage</b> .....	26
<b>Chapitre 03 : TRAITEMENTS THERMIQUES DES SOUDURES</b> .....	29
1. Introduction .....	29
2. Évolution historique des traitements thermiques .....	29
3. Principes, buts et rôle des traitements thermiques .....	30
4. Cycle d'un traitement thermique .....	31
5. Diagramme d'équilibre .....	32
5.1 Diagramme fer-carbone métastable .....	32
5.2 Les constituants d'équilibres des alliages Fer- Carbone .....	32
6. Traitements thermiques des soudures .....	33
6.1 Objet et mise en œuvre des traitements thermiques .....	33
6.1.1 Classification selon l'objet .....	33
6.1.2 Modes de mise en œuvre .....	34
6.2 Traitement de relaxation .....	35
6.2.1 Objet .....	35
6.2.2 Mécanisme de la relaxation .....	35
6.2.3 Effets métallurgiques du traitement .....	37
6.2.4 Fissuration au réchauffage .....	38

---

---

6.2.5 Traitement avant ou après refroidissement .....	39
6.3 Traitements comportant une austénitisation.....	39
6.3.1 Recuit .....	39
6.3.2. Traitement inter critique .....	40
6.3.3. Trempe et revenu des ensembles soudés.....	41
6.3.3.2. Revenu de l'acier .....	44
<b>Chapitre 04 : Études Expérimentales .....</b>	<b>47</b>
<b>2 Matériaux utilisés .....</b>	<b>48</b>
➤ Métal de base .....	48
➤ Composition chimique.....	48
➤ Métaux d'apport.....	48
<b>3. Procédure de soudage.....</b>	<b>49</b>
3.1 Préparation des échantillons.....	49
➤ Paramètres de soudage.....	49
3.2 Découpage des éprouvettes.....	50
3.2.1 Traitement Thermique .....	51
3.2.2 Métallographie optique .....	52
➤ Enrobage.....	52
➤ Polissage.....	53
➤ Attaque chimique .....	54
3.3 Microscopie optique .....	54
<b>4 Caractérisations mécaniques .....</b>	<b>55</b>
4.1 Essai de traction.....	55
➤ Eprouvettes .....	55
➤ Exécution de l'essai : .....	55
4.2 Essai de résilience.....	56
➤ Eprouvettes .....	56
➤ Exécution de l'essai .....	56
4.3 Essai de dureté.....	57
➤ Eprouvettes .....	57
➤ Exécution de l'essai .....	58
4.4 Essai de pliage .....	58

---

➤ Eprouvettes .....	59
<b>5 Résultats Et Discussion.....</b>	<b>59</b>
5.1 Evolution de la microstructure .....	59
<b>5.2 Dureté .....</b>	<b>65</b>
➤ Discussion des résultats .....	65
<b>5.3Traction .....</b>	<b>66</b>
➤ Discussion des résultats .....	66
<b>5.4 Résilience .....</b>	<b>67</b>
➤ Discussion des résultats .....	67
5.5 Pliage L’essai de pliage à été effectué sur 04 éprouvettes extraites de chaque pièce. ....	68
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>69</b>
<b>Les références .....</b>	<b>71</b>

## Liste des figures

Figure 1. 1: Préparation des bords en assemblage bout-à-bout .....	7
Figure 1. 2: Assemblage en coin ou en angles .....	7
Figure 1. 3: Assemblage à bords relevés .....	8
Figure 1. 4: Assemblage à bords relevés .....	8
Figure 1. 5: Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). .....	10
Figure 1. 6: Composant de l'électrode enrobée .....	10
Figure 1. 7: Principe du procédé TIG (GTAW) .....	13
Figure 1. 8: Principe de courant continues, polarité directe.....	14
Figure 1. 9: Principe de courant continue, polarité indirecte.....	15
Figure 1. 10: Courbe temps intensité montrant le courant continu pulsé. ....	15
Figure 1. 11: Principe de soudage TIG, courant alternatif. ....	16
Figure 2. 1 : Cas de soudage mono passe .....	22
Figure 2. 2 : Cycle thermique Cas de soudage mono passe.....	22
Figure 2. 3 : Modifications dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes.....	24
Figure 2. 4 : Etat quasi-stationnaire .....	25
Figure 2. 5 : Représentation schématique d'un joint soudé .....	26
Figure 2. 6 : Transformations structurales dans la ZAT .....	28
Figure 2. 7 : structure de weidmannstaten .....	28
Figure 3. 1: Cycle d'un traitement thermique .....	31
Figure 3. 2: Diagramme Fer-Carbone .....	33
Figure 3. 3 Mécanisme de la relaxation des contraintes .....	36
Figure 3. 4: La variation de H en fonction de la température .....	37
Figure 3. 5: Fissuration du joint de liaison.....	39
Figure 3. 6: Les températures des différents traitements thermiques en fonction de la teneur en carbone.....	46
Figure 4. 1: métal d'apport utilisé (ER70S-3), (E7010). ....	52
Figure 4. 2: les pièces assemblés(chanfreinage) .....	52
Figure 4. 3: Une tronçonneuse (Struers Discotom).....	52
Figure 4.4 : Eprouvettes de pliage .....	53
Figure 4. 5:: Eprouvettes de traction .....	53
Figure 4. 6: Eprouvettes de résilience .....	53
Figure 4. 7: Eprouvettes de microstructure .....	53
Figure 4. 8: Cycle effectué pour 12 éprouvettes. ....	53
Figure 4. 9: Les éprouvettes dans le four au niveau de CRTI .....	54
Figure 4. 10: Enrobeuse au niveau de CRTI. ....	54
Figure 4. 11: Les échantillons après l'enrobage.....	55

Figure 4. 12: Polisseuse au niveau de CRTI .....	56
Figure 4. 13: Microscope optique au niveau de CRTI. ....	57
Figure 4. 14: Dimension de l'éprouvette de traction.....	58
Figure 4. 15: Machine de traction au niveau de CRTI.....	58
Figure 4. 16: éprouvettes de résilience .....	59
Figure 4. 17: Machine d'essais de résilience au niveau de CRTI.....	59
Figure 4. 18: Appareils de mesure de dureté au niveau de CRTI.....	61
Figure 4. 19: Eprouvettes de pliage .....	62
Figure 4. 20: Machine d'essais de pliage.....	62
Figure 4. 21: Schématisation du diagramme d'équilibre (à gauche) et diagramme TTT (à droite) pour le système binaire Fe-C.....	63
Figure 4. 22: les microstructures de la zone affectée thermiquement avant et après traitement (zat).....	64
Figure 4. 23: les microstructures des zones de la soudure (zat, zl, zf) .....	65
Figure 4. 24: les microstructures de la zone fondue (ZF) avant et après traitements.....	66
Figure 4. 25: les courbes de dureté .....	67
Figure 4. 26: les courbes de traction. ....	68
Figure 4. 27: Les énergies de rupture exprimées en joule .....	69

## Liste des tableaux

Tableau 1. 1: représente les différents types d'enrobage. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau1. 2: Tableau des électrodes en tungstène pour le procéder de soudage TIG	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 4. 1: Composition chimique de l'acier grade API X70. ....	50
Tableau 4. 2: Composition chimique du matériau d'apport (E7010 et E6010).....	51
Tableau 4. 3: Paramètres de soudage .....	52

## Nomenclature

**TIG** : soudage tungsten Inert Gas

**MIG** : Métal Inerte Gaz

**MAG** : Métal Active Gaz

**MEB** : La microscopie électronique à balayage

**ZF** : Zone fondue.

**ZAT** : Zone affecté thermiquement.

**MB** : Métal de base.

**ZL** : Zone de liaison.

**RE** : refroidissement a l'eau.

**RA** : refroidissement a l'air.

**RH** : refroidissement a l'huile.

**SMAW** : Procédé de soudage a l'arc électrique...

**TTT** : transformation temps température.

**Hv** : dureté Vickers.

---

# **Introduction Générale**

---

## **Introduction Générale**

Parmi les procédés d'assemblage, 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 [1].

Les techniques d'assemblage des matériaux métalliques sont en constante évolution. Afin de réaliser une parfaite continuité entre les matériaux assemblés, il est important de contrôler la soudure et réparer tout défaut [2]

Les pipelines sont des outils essentiels pour le transport des hydrocarbures à haut débit sur de grandes distances. Ils sont utilisés comme l'un des plus pratiques et des plus basses méthodes de tarification pour les grands transports de pétrole et de gaz depuis 1950.[3]

Jusqu'à présent, ce moyen de transport joue un rôle important dans les industries du pétrole et du gaz puisqu'il est peut-être le plus économique et le plus efficace moyen de transport des fluides à grande échelle pour le pétrole brut et le gaz naturel. [4]

Le transport pétrolier dans les conditions de production nécessite l'utilisation de pressions très élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite élastique HSLA avec des bonnes soudures. De plus, la sécurité des installations soudées demande une bonne propriété mécanique pour éviter l'éclatement et l'endommagement des pipelines [5].

De nos jours, l'industrie pétrolière porte un grand intérêt à la caractérisation de soudage des pipelines, ce type d'assemblage se distingue particulièrement par des zones d'hétérogénéités, qui reflètent des microstructures et des caractéristiques mécaniques très différentes, il est alors nécessaire de les identifier afin de les prendre en compte lors de l'installation du réseau de gazoducs [5]

L'objet de notre étude qui inscrit dans ce cadre, est la mise en évidence de l'effet des traitements thermiques des soudures dans un alliage spécifique à la construction des pipelines X70 et sur les structures métallurgiques et comportements mécaniques des soudures. Deux objectifs ont été poursuivis :

- Détermination des propriétés métallurgiques dans les différentes zones caractéristiques du

cordon de soudage,

- Evaluation de la tenue mécanique des assemblages soudés par la réalisation des filiations de dureté, essais de traction et de résilience.

Le présent mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à des notions générales sur le soudage tel que les procédés de soudage, les paramètres d'assemblage et les différents types de défauts constatés.

Le deuxième chapitre est présente une étude bibliographique relative à la métallurgie de soudage, suivie d'une analyse des principales conséquences mécaniques de transformation lors de l'opération de soudage.

Le troisième chapitre fait le point sur les différents traitements thermiques, appliqués au soudage. Pour en conclure à un choix précis et judicieux du traitement thermique effectué.

Le dernier chapitre porte sur l'analyse métallurgique des cordons de soudure soumis au procédé de soudage SMAW.

L'objectif de cette analyse est d'identifier la morphologie et type des phases en présence dans les différentes zones du cordon de soudure : la zone fondue (ZF) et la zone affecté thermiquement (ZAT). Par ailleurs la réalisation de filiation de micro dureté Vickers, essais de traction, essais de pliage et résiliences renseignent sur le comportement mécanique du cordon de soudure (ZF et ZAT) qui est induit par la microstructure.

Enfin une conclusion générale dans laquelle nous mettons en évidence les points essentiels de ce mémoire.

# Chapitre 01 :

# État d'art de

# soudage

## 1. Introduction

Les techniques de soudage sont en essor remarquable. 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. A l'heure actuelle, le soudage a compté parmi les modes d'assemblage les plus répandus en industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique tels que : les bateaux, trains, aviation, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage [6].

## 2. Histoire du soudage

Avant la naissance du soudage au 19<sup>ème</sup> siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux s'est fait par forgeage. Les premières techniques utilisaient l'électricité comme source d'énergie tel que le soudage à l'arc en acier jusqu'à l'invention d'arc enrobé en 1904 ou soudage par résistance. Dans la même période, l'arrivée de l'oxyacétylénique utilisant l'acétylène et l'oxygène (soudage au gaz) pour produire une flamme aller jusqu'à 3100°C permet de constituer un joint entre les parties à soudé après la solidification du bain de fusion.

En 1930, l'arrivée du soudage à électrode fusible facilite l'automatisation de dévidage, surtout ce qui concerne le soudage à l'arc submergé. Dès 1940, les scientifiques d'États-Unis ont essayé de protéger l'arc par un gaz inerte dont ils sont réussis à amorcer l'arc sans fusion de l'électrode de tungstène (sans matériau d'apport), le procédé est appelé TIG (Tungstène Inert Gas). Le procédé MIG (Métal Inert Gas) est apparu quelques années plus tard en 1950, il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continue et l'argon ou l'hélium comme gaz de protection, dont leur remplacement par CO<sub>2</sub> donne la naissance du procédé MAG (Métal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons en 1958, permet de réaliser une pénétration étroite et profonde, vient associer avec le procédé laser en 1980, le soudage devenu majoritaire à côté du rivetage. [7]

## 3. Définition du soudage

Le soudage se définit d'assembler deux pièces en réalisant la continuité de la matière qui les compose. Le joint qui en résulte est la soudure.

Le soudage est dit autogène lorsque les bords adjacents des pièces sont portés à fusion et participant à la formation du joint. Il est souvent nécessaire, pour former le joint soudé, d'ajouter au métal de base un métal d'apport, identique au précédent ou différent, mais de toute façon étranger au métal de base. Le métal d'apport et le métal de base doivent pouvoir former un alliage. [8]

Lorsque le métal de base n'est pas porté à fusion et que le métal d'apport constitue seul le joint, on est en présence d'une brasure. En soudage autogène, la continuité de la matière est obtenue par fusion, par pression ou par ces deux moyens combinés. Le soudage fait donc appel à une source d'énergie qui, selon le procédé considéré peut-être de différente nature :

- Thermochimique (soudage au chalumeau, soudage par alumine thermique).
- Électrothermique (soudage à l'arc et ses nombreuses variantes, soudage par résistance, soudage par bombardement électronique).
- Mécanique (soudages par pression à froid, par explosion, par friction, par ultrasons)
- Lumineuse (laser).

Certains procédés de soudage ont donné naissance à des techniques connexes fortes importantes telles que le coupage thermique (coupage aux gaz ou oxycoupage, coupage à l'arc au plasma), le soudobrasage et la métallisation (aux gaz, à l'arc, au plasma). Ces techniques utilisent les mêmes sources d'énergie que le procédé de soudage dont elles dérivent et nécessitent l'usage de matériels analogue. [8]

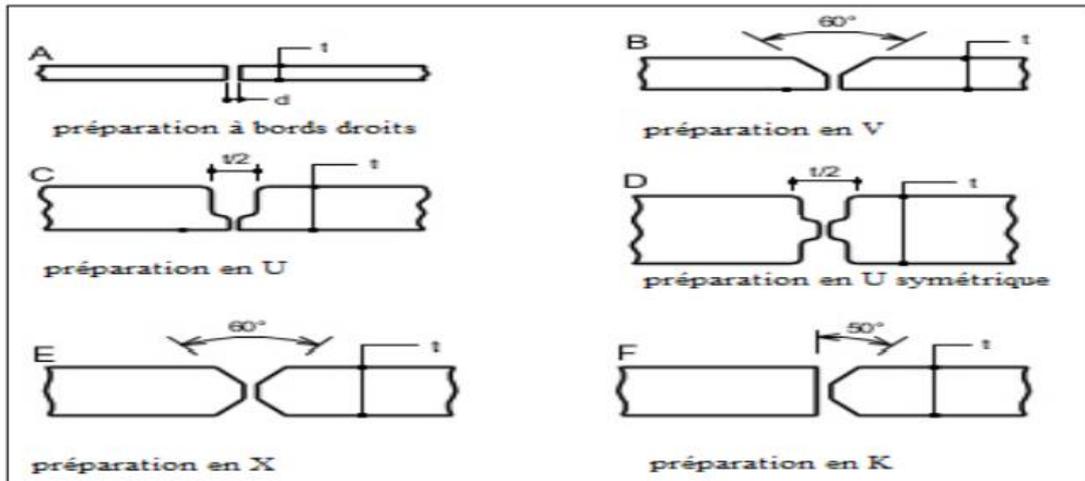
#### **4. Types des assemblages soudés**

La création d'une liaison métallique implique le rapprochement des surfaces à unir, ce qui permette de loger le métal d'apport entre eux et le soudage en pleine pénétration. Il existe quatre principaux types d'assemblages différents, chacun ayant ses particularités qui répondent à différents besoins bien précis.

##### **4.1. Assemblage bout-à-bout**

La soudure bout-à-bout (figure 1.1) est la plus connue et la plus facile à pratiquer, elle comprend deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle.

Elle rassure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords (chanfreinage) est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égale à 5 mm. [9]

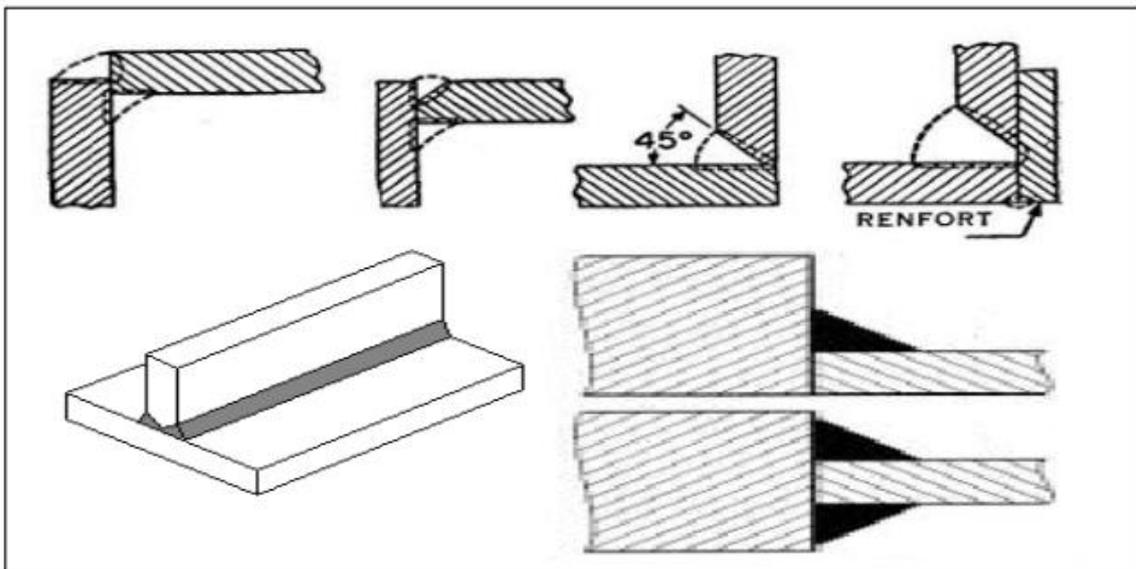


**Figure 1.1:** Préparation des bords en assemblage bout-à-bout [9]

#### 4.2 Assemblage en coin ou en angles

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

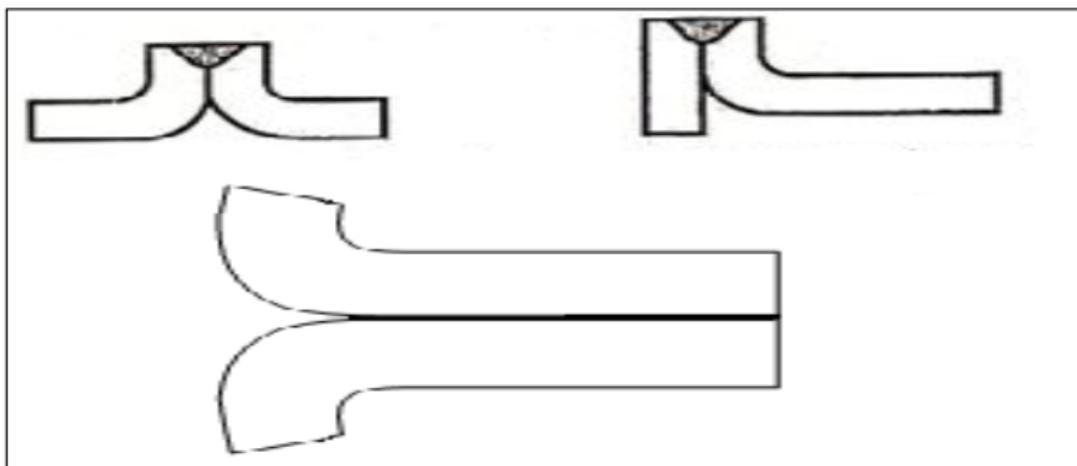
Lorsque les deux pièces se croisent à un angle de  $90^\circ$  faisant en sorte que les bords se réunissent au centre d'une composante ou d'une plaque on parle d'un assemblage en (figure 1.2)



**Figure 1.2:** Assemblage en coin ou en angles [9]

#### 4.3 Assemblage à bords relevés

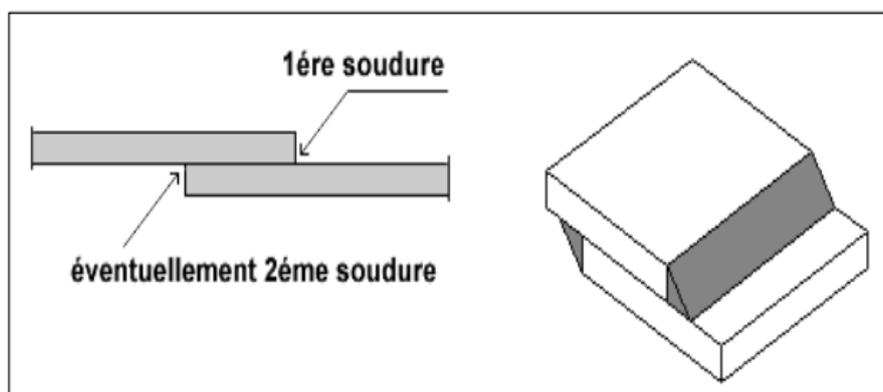
Ce type est fait de deux pièces placées côte à côte et soudés sur le même côté. Il s'agit du type de joint qui doit être remplacé le plus fréquemment en raison des résidus qui s'accumulent sur ses rebords. Il est souvent appliqué aux pièces de tôlerie qui ont des rebords incurvés ou formés de façon à ce qu'une soudure doive être faite pour réunir deux pièces adjacentes (figure 1.3).



**Figure 1.3:** Assemblage à bords relevés [9]

#### 4.4 Assemblage par recouvrement

Il se forme quand deux pièces sont placées une au-dessus de l'autre sur un certain intervalle le long du bord (figure 1.4). Le soudage peut être fait sur une ou deux faces, en fonction du symbole de soudure ou des exigences du plan. C'est la méthode la plus utilisée pour joindre des pièces d'épaisseur différente.



**Figure 1.4:** Assemblage à bords relevés [4]

## 5. Soudage à l'arc électrique

Le soudage en dépit de type a besoin de la chaleur pour produire la jonction entre les parties soudées par la formation d'une liaison au niveau atomique. Le soudage à l'arc est un terme délimitant l'ensemble des procédés de soudage utilisant un arc électrique comme source de chaleur pour fondre et joindre les métaux sans actions extérieures. La chaleur générée est généralement localisée en un point où la liaison est désirée. D'après les schémas de classification des procédés de soudage on constate qu'un grand nombre de procédés utilisent l'arc électrique comme source de chaleur en raison de sa concentration et facilité de contrôle. Il est important de rappeler que ce n'est pas toute la chaleur générée par le générateur qui est transférée au métal pour produire la soudure, mais il y a une perte due aux projections, dissipations par convection, radiations et conduction aux surfaces adjacentes.

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

### 5.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

#### 5.1.1. Définition

Ce type sous l'abréviation (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur ( $U_0$ ) doit être supérieure à la tension d'amorçage (sur toute n courant alternatif). Sava leur doit être comprise entre 40 et 80 volts. [10]

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, très utile dans certaines tâches spécialisées par exemple, des récipients, des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts, des bâtiments, des navires et des wagons.

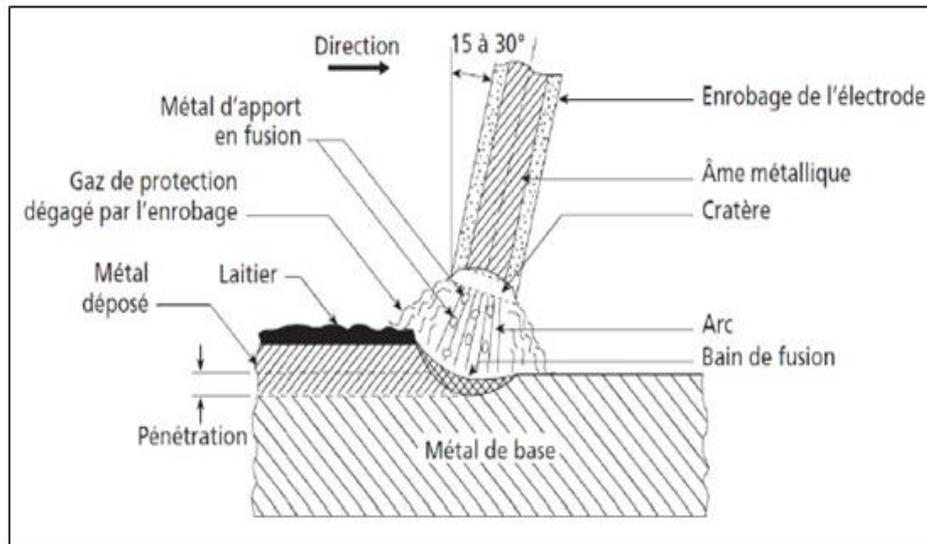
Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

#### 5.1.2. Principe du procédé

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la

---

plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder. Le Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW), et illustré sur la figure 1.5



**Figure 1. 5:** Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). [11]

### 5.1.3 Définition de l'électrode enrobée

**L'âme :** filmé tallique plein de nature voisine du métal de base (aciers non alliés et inoxydable), exception pour le soudage des fontes (âme enNi).

**L'enrobage :** entoure l'âme sur toute la longueur excepté la partie terminale pour assurer un bon contact électrique avec le porte-électrode. L'extrémité opposée est meulée pour permettre le court-circuit avec la pièce et faciliter ainsi l'amorçage. Il est constitué de matières minérales ou organiques.



**Figure 1.6:** Composant de l'électrode enrobée [11]

### 5.1.4 Rôle de l'enrobage

**Rôles mécaniques :** La fusion de l'enrobage a un certain retard sur celui de l'âme ce qui crée un cratère qui guide l'arc. La solidification du laitier en premier permet le maintien du banc

(coffrage) donc possibilité de souder en position. La volatilisation d'une partie de l'enrobage crée un souffle sur le bain de fusion, cela permet les soudures au plafond.

**Rôle métallurgique :** Protection contre l'oxydation, Désoxydant du bain de fusion, compensation de la volatilisation, apport d'éléments, Diminution de la vitesse de solidification et de refroidissement.

### 5.1.5 Différents types d'enrobage

Tableau 1. 1 : représente les différents types d'enrobage [12]

Symbole	Désignation	Caractéristiques et utilisation
R	<b>Enrobagerutile</b> (la plus répandue)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polarité directe</li> <li>- Toutes positions sauf verticale descendante - Tps d'amorçage faible Laitier auto détachable</li> <li>- Bonne vitesse defusion</li> <li>- Bonne caractéristique mécanique pour les aciers nonalliés.</li> <li>- Deux fois moins cher que lebasique.</li> </ul>
B	<b>Enrobage Basique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polarité inverse</li> <li>- Electrodes à étuver donc risque de fissuration à froid faible.</li> <li>- Soudage en toutes positions sauf au plafond - Laitier dense et vitreux.</li> </ul>
C	<b>Enrobage cellulosique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polaritédirecte.</li> <li>- Soudages en toutespositions.</li> <li>- Fortepénétration.</li> <li>- Souduresubaquatique.</li> </ul>
A	<b>Enrobage acide</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polaritédirecte.</li> <li>- Très bel aspect decordons.</li> <li>- Soudage à plat uniquement (risque de fissuration si utilisée en d'autresposition).</li> </ul>

### 5.1.6 Avantages et inconvénients

- Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, et permet une grande autonomie avec l'équipement requis peu dispendieux.
- Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient ; le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire. [4]

- Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70V.

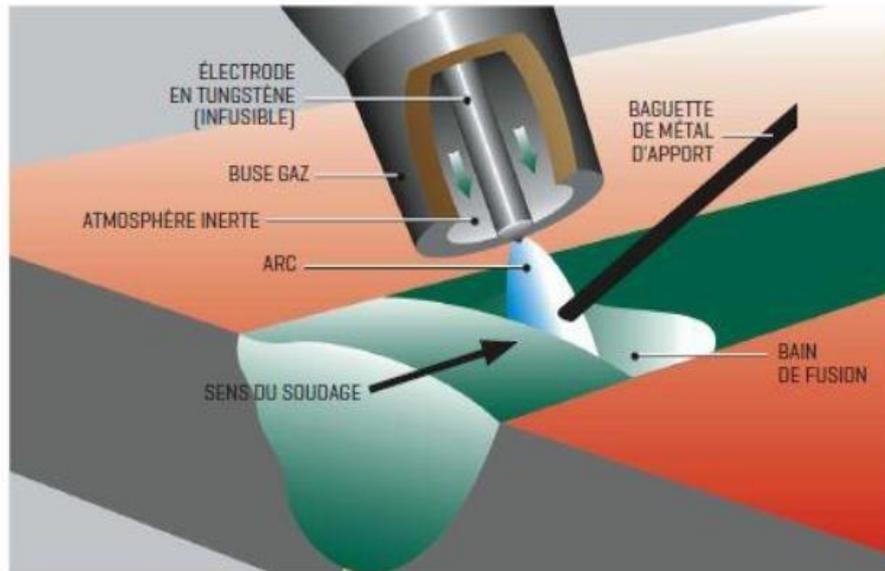
## 5.2 SOUDAGE TIG (GTAW)

### 5.2.1 Définition

Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin. TIG est un acronyme de Tungstène Inert Gas, où Tungstène désigne l'électrode, Inert Gas c'est le type de gaz utilisé. L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de gaz rare tels que l'argon et l'hélium. De fait, l'arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l'arc s'appuie sur l'élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d'un courant électrique alternatif ou continu. [12].

Le soudage s'effectue le plus souvent en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou du magnésium, où l'on soude en polarité alternée. Il n'est pas possible de souder en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) car cela détruirait cette électrode en la faisant fondre. [13]

La soudure TIG est une soudure de qualité, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur. Les domaines d'application les plus courants sont : L'aéronautique, L'automobile, La tuyauterie industrielle, et l'agroalimentaire. La figure I.7 ci-dessous représente le principe de soudage TIG ;



**Figure 1.7:** Principe du procédé TIG (GTAW) [14]

### 5.2.2 Générateurs et méthodes d'amorçage

Les générateurs utilisés sont des générateurs dont la courbe tension-intensité est de type plongeant, c'est-à-dire que pour une variation de tension dans une plage donnée, l'intensité peut varier. Ces générateurs peuvent également s'employer pour le soudage à l'électrode enrobée. Il existe 3 façons d'amorcer l'arc :

- ✓ Par contact (lift-arc) : le soudeur va faire entrer en contact l'électrode avec la pièce à souder puis va éloigner l'électrode afin de « tirer » un arc électrique. Cette méthode peut être utilisée avec tous les générateurs de soudage mais peut créer une inclusion de Tungstène. Cette méthode s'emploie uniquement dans des endroits où la HF est interdit.
- ✓ Par hautes fréquences : le générateur va créer un arc électrique de faible intensité en appliquant une haute tension (env. 1 000 V) à une très haute fréquence (env. 1000000 Hz) entre l'électrode et la pièce. L'ionisation de l'air entre pièce et électrode va permettre la création d'un arc de soudage de forte intensité malgré une tension modeste (environ 20-30V). Cette méthode d'amorçage a pour inconvénient d'engendrer une pollution électromagnétique de l'environnement immédiat. [15]
- ✓ Parcours circuit (grattage manuel) : L'arc s'amorce en grattant l'électrode sur le matériau. Il est conseillé d'amorcer sur un cuivre afin d'éviter d'abîmer le tungstène et de contaminer la soudure.

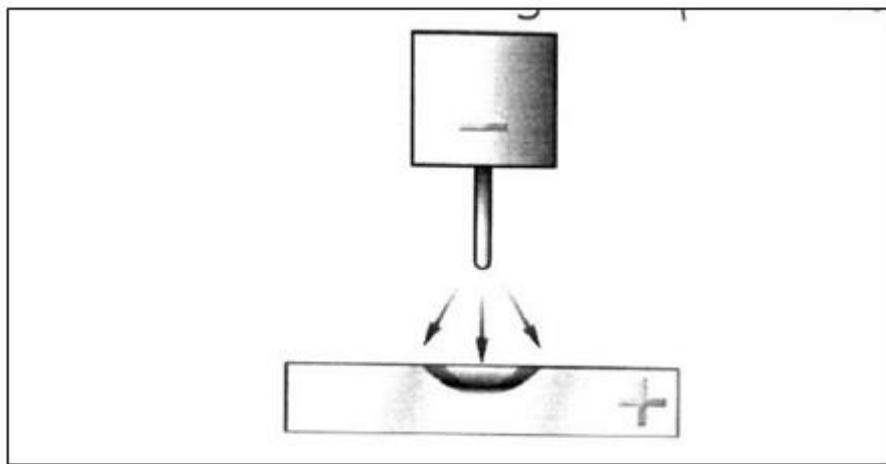
### 5.2.3 Les différents courants

Le soudage des métaux dits « lourds » de type métaux ferreux, cuivre et alliage nickel...) s'effectue en courant continu. Le soudage des métaux dits « légers » de type aluminium et alliages s'effectue en courant alternatif. [15]

#### a) Courant continu

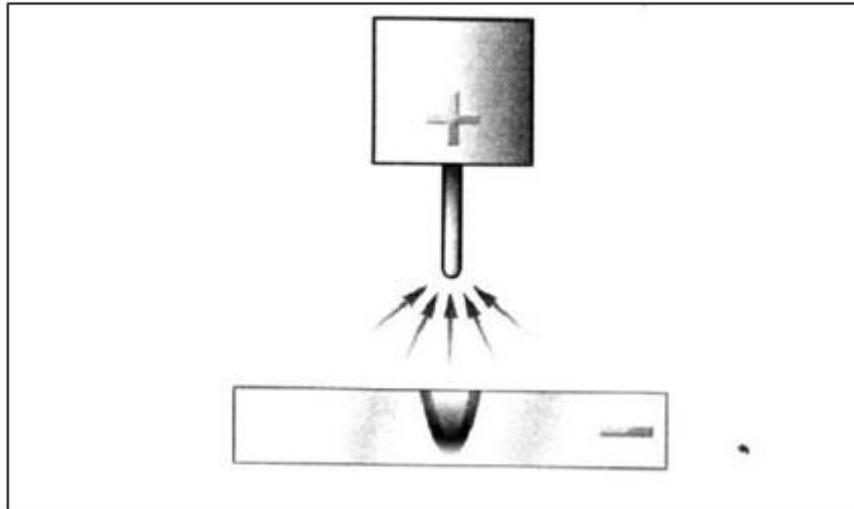
L'arc électrique est alimenté par une source à tension continue. L'atmosphère inerte est assurée par de l'argon ; l'électrode réfractaire est en tungstène théorie, peuvent contenir des substances additionnelles. Dans ce cas, la substance utilisée est l'oxyde de thorium. Le courant continu peut fonctionner en deux polarités, directe ou indirecte. [15]

- Polarité directe (- à l'électrode) : le sens électronique n'ayant pas changé c'est maintenant l'anode (+) qui est bombardée par les électrons émis par la cathode (-). On constate alors un échauffement anormal de l'électrode et la zone de fusion est dans ce cas très large et peu profonde, (figure1.8).



**Figure 1.8:** Principe de courant continu, polarité directe. [15]

- Polarité indirecte (+ à l'électrode) : le sens électronique du courant allant du pôle - au pôle + à l'extérieur d'un générateur (à l'inverse du sens conventionnel du courant électrique), les électrons vont donc se déplacer de l'électrode (cathode) vers la pièce (anode) et bombarder celle-ci. Dans ce cas, la zone de fusion est profonde et étroite, (figure1.9).

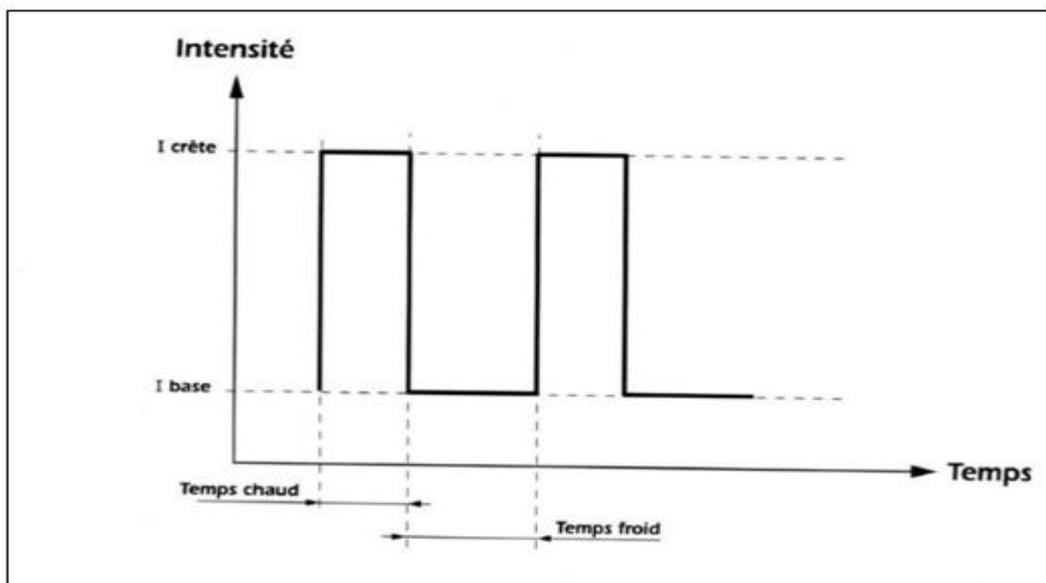


**Figure 1.9:** Principe de courant continu, polarité indirecte. [15]

Pour la soudure lourde, la polarité négative à l'électrode aboutit à obtenir des cordons de soudure étroits et bien pénétrés.

### b) Courant continu pulsé

Le courant pulsé est une variante du courant continu dont l'objet est de maîtriser l'énergie apportée à la pièce. Le courant pulsé engendre une succession de temps froids avec maintien de l'arc et de temps chauds (pics d'intensité, figure 1.10) qui assurent la pénétration.



**Figure 1.10:** Courbe temps intensité montrant le courant continu pulsé. [15]

### c) Courant alternatif

L'arc électrique est alimenté par une source à tension alternative ; l'atmosphère inerte est assurée par de l'argon. Ce type de courant est utilisé spécialement pour le soudage d'aluminium, Lors de l'alternance de polarité, le jaillissement des électrons de la tôle vers l'électrode détruit la couche d'alumine protectrice. [15]

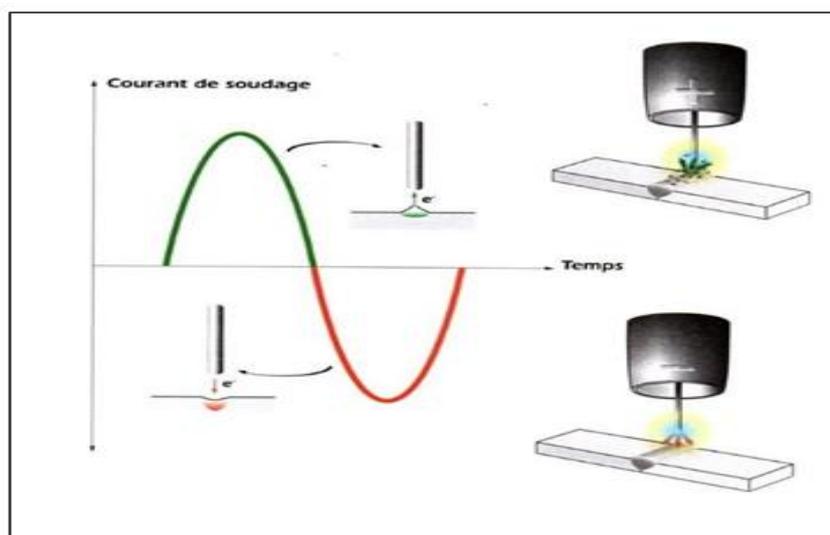
A l'alternance suivante, la polarité inverse assure la pénétration comme il est illustré sur la figure 1.11

#### d) Électrodes utilisées

Les électrodes en tungstène thoré, (tungstène +oxyde de thorium), sont utilisées, lors du soudage TIG, depuis plusieurs décennies dans la plupart des secteurs d'activité. On peut aussi dans certains cas les utiliser pour la découpe.

Les électrodes employées sont majoritairement constituées de tungstène (W) à plus de 99 % en masse auquel on ajoute des oxydes métalliques pour augmenter la longévité et la stabilité des Électrodes à haute température, améliorer l'amorçage de l'arc électrique, augmenter l'émissivité électronique de l'électrode et donc le rendement. Ces oxydes sont ceux

Du thorium ( $\text{ThO}_2$ ), du cérium ( $\text{CeO}_2$ ), du lanthane ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), du zirconium ( $\text{ZrO}_2$ ) ou d'yttrium ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) finement dispersés dans la phase W.



**Figure 1.11:** Principe de soudage TIG, courant alternatif. [15]

- Pour le soudage de l'aluminium et ces alliages on trouve des électrodes en tungstène pur.
- Pour le soudage d'Acier, Inox en CC et intensité élevées on trouve des électrodes en Thorium.
- Pour le soudage d'Acier, Inox, Alu, titane, Nickel, Cuivre, Magnésium, en CC et CA on trouve des électrodes en Lanthane.

- Pour le soudage de l'aluminium et Magnésium en CA en fortes intensités et pour un arc très stables on trouve des électrodes en zirconium.
- Pour le soudage d'Acier, Inox, alliages de nickel, titane en faibles CC on trouve des électrodes en cérium.

La codification, la fabrication, le contenu et la présentation des électrodes sont données dans la norme françaises NF EN 26848 les normes internationales ISO 6848. Les types d'électrodes en tungstène thoriées que l'on trouve sont :

- WTh 10 jaune : 0,80 à 1,20 % ThO<sub>2</sub>,
- WTh 20 rouge : 1,70 à 2,20 % ThO<sub>2</sub>,
- WTh 30 violet : 2,80 à 3,20 % ThO<sub>2</sub>,
- WTh 40 orange : 3,80 à 4,20 % ThO<sub>2</sub>

**Tableau 1.2:** Tableau des électrodes en tungstène pour le procédé de soudage TIG [12] .

Types d'électrodes en tungstène	Tungstène pure	Thorium	Terres rares	Zirconium	Cérium	Lanthane
Couleur des électrodes en tungstène	WP vert	WTh 10 <b>jaune</b> WTh20 <b>rouge</b> WTh 30 <b>violet</b> WTh 40 <b>orange</b>	E3 <b>lilas</b>  WR02 <b>turquoise</b>	WZr3 <b>marron</b>  WZr8 Blanc	WCe20 <b>gris</b>	WLa10 <b>noir</b> WLa15 <b>or</b> WLa20 <b>bleu</b>

#### 5.2.4 Les gaz de protection :

- ✚ **Argon** : Gaz inerte monoatomique, lourd, neutre, incolore et indolore, le plus utilisé, bon amorçage de l'arc électrique. [16]
- ✚ **Hélium** : Gaz inerte monoatomique, neutre, incolore et indolore, plus léger que l'air pour les alliages légers de fortes épaisseurs, cuivre et ses alliages.
- ✚ **Hydrogène** : Gaz réducteur n'est jamais utilisé pur et il est généralement additionné pour former un gaz binaire ou ternaire avec l'argon ou l'hélium pour la protection endroit et l'azote pour la protection envers duplex, augmente la tension d'arc, l'apport de chaleur,

augmente la vitesse de soudage et des valeurs de pénétration pour certains aciers martensitiques, ferritiques. [16]

- ✚ **Azote** : Gaz diatomique, paresseux, incolore et indolore. Ce gaz instable peut générer une instabilité de l'arc et une détérioration accélérée de l'électrode tungstène, Généralement utilisé pour la protection envers des aciers inoxydables du fait de son faible coût. [16].

### 5.2.5 Paramètres de soudage

#### a. Pour les aciers et aciers inoxydables :

- ✚ Courant continu polarité directe, électrode en tungstène thorié (rouge) affûtage de 30° à 60°,
- ✚ En bout à bout : 20 à 25 Ampères par mm d'épaisseur,
- ✚ En angle : 30 à 35 Ampères par mm d'épaisseur.

#### b. Pour les aluminiums et alliages :

- ✚ Courant alternatif, électrode en tungstène pur (vert), affûtage de 90°,
- ✚ En bout à bout : 35 à 40 Ampères par mm d'épaisseur,
- ✚ En angle : 45 à 50 Ampères par mm d'épaisseur, [12]

### 5.2.6 Avantages et inconvénients

- ✚ Ce procédé de soudage est particulièrement destiné pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).
- ✚ Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.
- ✚ La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et

procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

- ✚ Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.
- ✚ Les défauts de soudures sont rares avec le procédé de soudage TIG. [12].

---

# Chapitre 02 :

# Etude Métallurgique de

# soudage

---

## 1- Introduction

Le soudage est un moyen d'assurer la continuité métallique par le concours de plusieurs phénomènes ; thermique, métallurgique, chimique. Cerner le problème du soudage revient obligatoirement à faire une approche selon les aspects qui le caractérisent à savoir :

- Aspect thermique
- Aspect chimique
- Aspect thermomécanique.

## 2- Aspect thermique du soudage

Cet aspect est caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent en mouvement, parfois immobile (exemple : soudage par résistance) dont la nature et la puissance qu'elle peut atteindre déterminent les possibilités pratiques d'utilisation.

Le soudage comporte, là où il intervient, des échauffements rapides, dans de nombreux cas plus rapides que ceux qui correspondent à l'état d'équilibre en phase solide des alliages concernés. Si l'on veut prévoir ou interpréter l'effet métallurgique du soudage, il est donc nécessaire de tenir compte de la vitesse d'échauffement, en particulier lorsqu'on cherche à simuler le cycle thermique de soudage pour reproduire les structures qui en résultent.

L'effet de l'échauffement rapide est accusé par la brièveté du séjour à la température maximale, température qui avoisine la température de fusion. Le gradient de température qui résulte de la localisation de l'échauffement entraîne une vitesse de refroidissement en général élevée, elle-même fonction, pour chaque matériau, non seulement du procédé de soudage utilisé, mais aussi du mode opératoire pratiqué pour l'application de ce procédé.

Pour ces raisons, toute analyse métallurgique des effets de l'opération du soudage doit être précédée et éclairée par une étude thermique approfondie [11].

### 2.1 Cycle thermique du soudage mono passe

Le cycle thermique lors de l'opération de soudage mono passe se traduit par un chauffage rapide jusqu'à une température proche de la température de fusion et par une cinétique de refroidissement qui dépend des paramètres opératoires :

- ✓ Energie de soudage
- ✓  $T_e$  de procédé
- ✓ Épaisseur de la pièce.

Pour caractériser la loi de refroidissement, plusieurs paramètres peuvent être adoptés :

$$vitesse\ moyenne = \frac{\theta_1 - \theta_2}{t_1 - t_2}$$

Vitesse à une température donnée :  $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{\theta = \theta_1}$

Temps de passage entre deux températures :  $\Delta t_{\theta_2 \theta_1} = t_{\theta_1} - t_{\theta_2}$

Pour choisir un paramètre de refroidissement, il doit être indépendant de tout autre paramètre.

(D'après l'Institut de Soudure I R S I D) :

Le temps écoulé entre 800°C et 500°C

Le temps écoulé entre 700°C et 300°C

Ces deux paramètres de refroidissement déterminent la microstructure fig.1.1. Deux autres paramètres, la vitesse de refroidissement à partir de 300 et le temps écoulé entre 300 et 100 C° les Japonais prennent en considération les conditions d'hydrogénation des soudures, c'est à dire le comportement des soudures en fissuration à froid .[17]

Ces deux paramètres sont représentatifs des conditions de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite ils permettent d'apprécier la ZAT (siège de fissures).

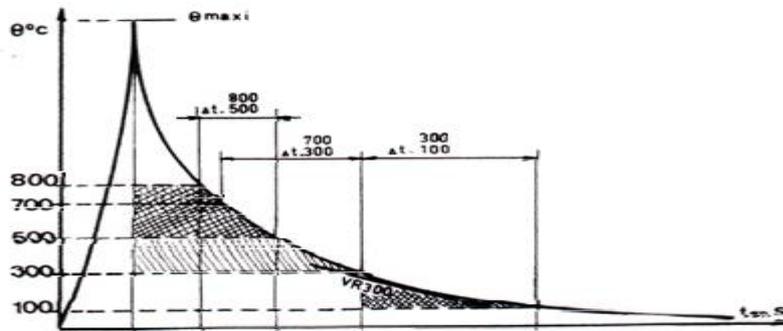


Figure 2.1: Cas de soudage mono passe [21]

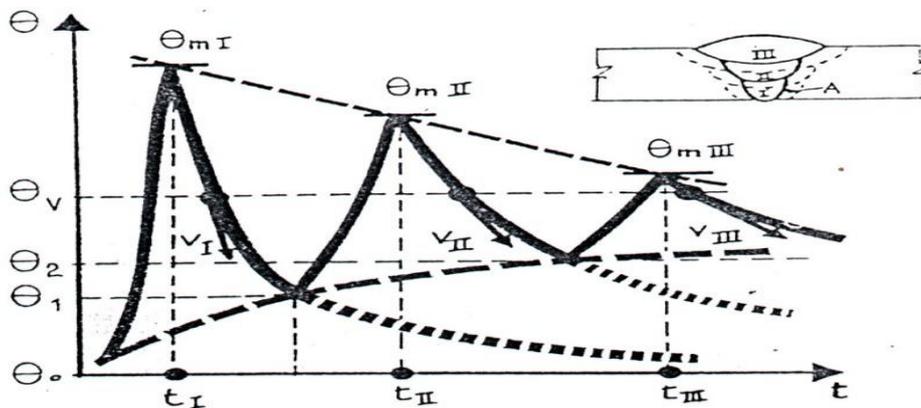


Figure 2.2 : Cycle thermique pour le soudage multi passes [21]

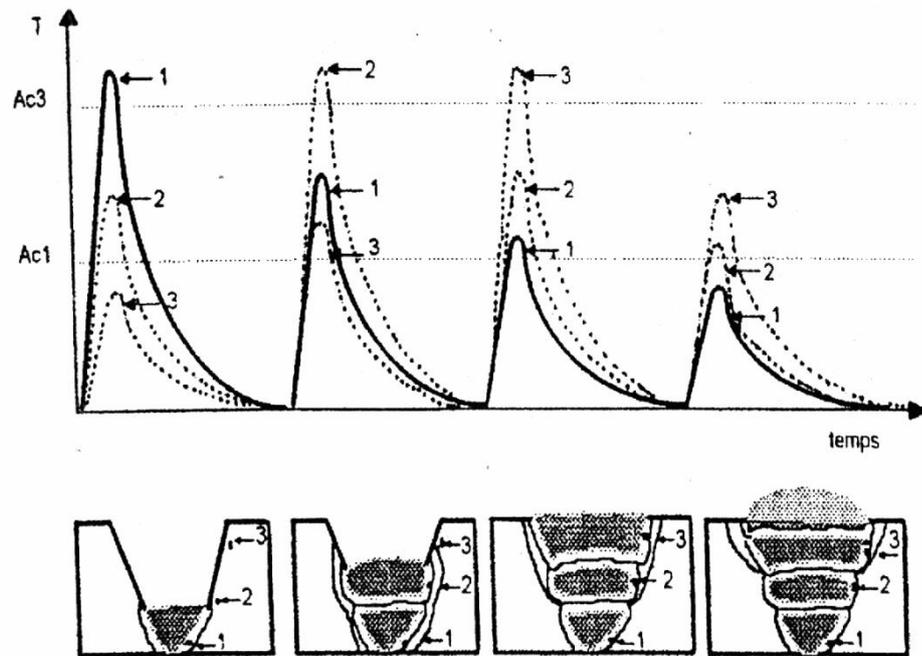
## 2.2 Cycle thermique du soudage multi passes

Juxtaposé à la première passe on observe les cycles thermiques les plus sévères, par rapport à la température maximale atteinte et la rapidité du refroidissement. Les passes suivantes provoquent à cet endroit des cycles de plus en plus atténués. Lorsque le temps entre les passes est inférieur à une certaine valeur qui dépend des conditions de soudage, fig.2.2 la température minimale au point A augmenté à chaque passe.

Suivant la disposition des passes, une même température peut être dépassée deux ou plusieurs fois en une région donnée au cours des passes successives. La structure finalement observée en cette région est le résultat de la succession des cycles correspondants. Le dépôt d'une passe modifie la structure de la passe précédente (ou des passes précédentes), en produisant sur celle-ci un recuit ou un revenu de la structure. Voir Fig.2.3 représentant les modifications dues au cycle thermique pour le soudage multi passes. [17].

Cette observation vaut aussi bien pour la ZAT que pour le métal fondu, lui aussi réchauffé et, s'il y a lieu, transformé au cours des passes successives. [11].

La notion de pré et post chauffage, qui concerne essentiellement la première et la dernière passe, doit être complété par la notion de température entre passes. Cette température est définie comme étant la température atteinte au refroidissement par le métal déposé avant le dépôt de la passe suivante. Elle est à la fois température de préchauffage pour la passe suivante et température minimale du post – chauffage pour les passes précédentes. [17].



**Figure 2.2** Modifications dues à l'action thermique en fonction du nombre de passes [21]

Divers facteurs interviennent sur l'allure des cycles thermiques et donc sur la répartition thermique, on peut en citer :

#### a) Influence de la pièce à souder

Intervient par ses propriétés physiques (conductibilité thermique, capacité calorifique). Il faut tenir compte aussi de l'influence géométrique (épaisseur, position des pièces à souder, chanfreins).

Influence de la température initiale (joue sur le temps de séjour à haute température ainsi que sur la vitesse de refroidissement) elle peut être contrôlée par un préchauffage.

#### b) Influence du préchauffage et du post-chauffage

Le préchauffage et le post-chauffage sont utilisés pour éviter la formation de structures fragiles dans la Z A T, et pour permettre à l'hydrogène dissout dans les pièces de diffuser vers l'extérieur.

Le préchauffage des pièces à assembler permet de :

- Diminuer la vitesse de refroidissement dans le domaine de transformation de l'austénite, et par la suite, limiter les transformations physico-chimiques.
- Réduire la teneur en hydrogène en fin de refroidissement et faciliter son dégagement pour éviter la formation de soufflures.

- Réduire les déformations et ralentir la croissance des contraintes le principal but du préchauffage est l'amélioration des conditions de refroidissement en vue d'éviter la formation de constituants de trempe ou semi trempe (la martensite). La température de préchauffage est d'autant plus élevée que le pouvoir trempant de l'acier est plus énergétique.

Le post chauffage consiste à interrompre le refroidissement naturel du joint soudé et à maintenir celui-ci à une température au moins égale à celle du préchauffage ; Permet à l'hydrogène de s'échapper et suspend la croissance des contraintes liées au refroidissement entre 300 et 100°C ; qui permet de caractériser la quantité d'hydrogène diffusible. Le post-chauffage est nécessaire, dans le cas des pièces à forte trempabilité ; quand l'action du préchauffage n'atteint pas les résultats demandés [18].

### c) Notions d'état quasi-stationnaire

Dans le cas de soudage avec déplacement de la source de chaleur, Si nous relevons, au moyen d'un couple thermoélectriques, les courbes  $\theta = f(t)$  en des points A1, A2...etc. situés à la même distance d'un cordon de soudure à l'arc et à des distances croissantes de l'origine O de ce cordon, supposé en pleine tôle figure.2 .4, [11].

La température maximale  $\theta_m$  atteinte croit avec la distance parcourue à partir du début du cordon, puis se stabilise à une valeur qui devient constante, tant que la source de chaleur progresse à une vitesse uniforme, l'énergie demeurant constante.

Les lois différentes conditions et  $s$  de refroidissement, déterminées d'après la mesure des temps de refroidissement entre deux températures, deviennent identiques, donc les courbes  $\theta = f(t)$  deviennent superposables dès que la source a franchi un certain parcours.

L'énergie dépensée par la conductibilité dans la pièce est à chaque instant compensé par l'énergie fournie au niveau de la source de chaleur. On peut dire donc que les isothermes demeurent identiques à elles-mêmes et se déplacent avec la source. Leurs enveloppes sont des lignes parallèles au cordon.

Grâce à l'état quasi stationnaire nous pouvons limiter notre détermination des courbes température- temps à des points repartis sur une droite perpendiculaire à la ligne de soudure.

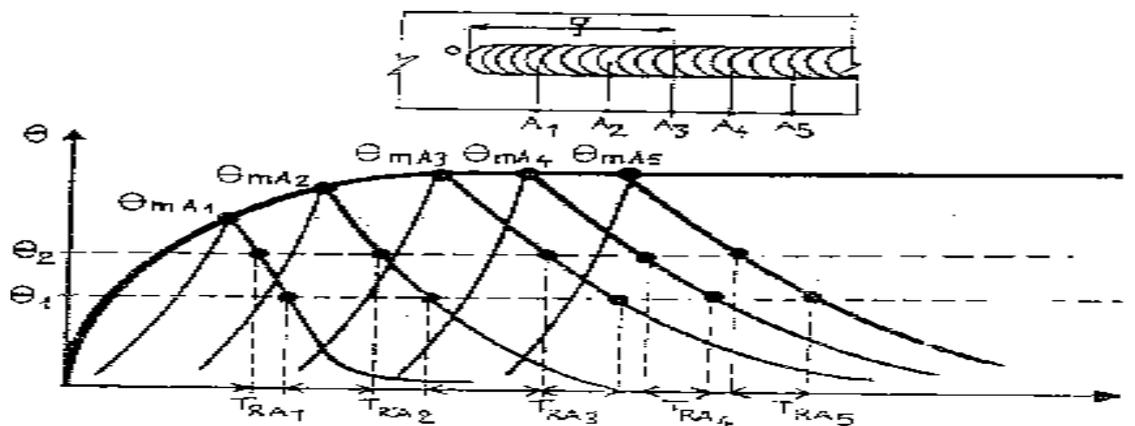


Figure 2.4: Etat quasi-stationnaire [6]

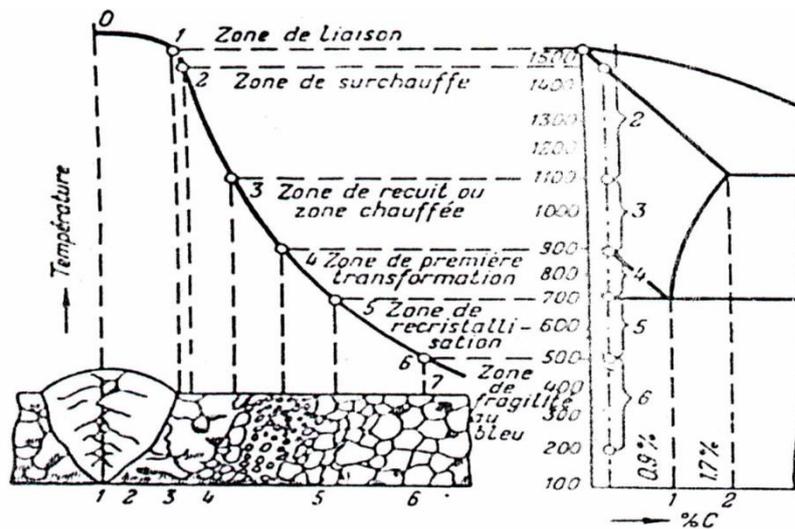


Figure 2.5: État quasi-stationnaire [6].

### 3- Aspects métallurgiques du soudage

Les caractéristiques d'un acier sont fonctions de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier.

Les principes généraux de la métallurgie (édifice cristallin, composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures.

L'examen métallographique de la soudure fait apparaître une grande diversité de structures. On observe pour chaque joint soudé divers aspects qui rendent compte de la variation du cycle thermique subi en chaque point examiné. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence.

Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. Leur dimension dépend de la température et de la cinétique de refroidissement. Voir figure.2.5 qui donne une représentation schématique d'un joint soudé perpendiculairement à la ligne de fusion. [21]

On distingue plusieurs zones : figure.2.6 [20]

#### 1) Zone de fusion (structure basaltique) :

Qui pour une soudure multi passes est constituée par une alternance de zones thermiquement régénérés et de zones brutes de solidification à grains orientés.

## **2) Zone surchauffée**

A granulation grossière où la température maximale atteinte est très élevée (entre 1200 et 1500). Le refroidissement rapide de l'austénite surchauffée, dont le grain atteint des dimensions importantes, donne la structure de Widmanstaetten, structure très fragile. Dans ce cas, la ferrite ou la cémentite pro-eutectoïde précipite isolément au cours de leur migration en direction des joints des grains d'austénite. Leur précipitation s'effectue alors le long des plans de clivage du cristal d'austénite où elle se trouve facilitée. Le constituant pro-eutectoïde précipite le long de ces plans sous forme de plages de grandes dimensions. La section de celle –ci par le plan duquel s'effectue l'observation du métal au microscope donne lieu à l'apparition d'aiguilles plus ou moins allongées, orientées dans des directions déterminées (figure.2.7). Les structures de Widmanstaetten doivent être effacées par un traitement de normalisation, car sinon elles sont la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers.

## **3) Zone de normalisation**

Où la granulation est plus fine que dans le métal de base. La température atteinte est légèrement supérieure à Ac3.

## **4) Zone à température maximale comprise entre Ac1 et Ac3**

C'est une zone de transformations incomplètes. L'austénite résiduelle se transforme en perlite fine, et les grains de ferrite proeutectoïde ne se modifient pas. La granulation dans cette zone n'est pas très homogène. L'austénitisation partielle du métal conduit pour cet acier à une structure à grains très fins.

## **5) Zone de recristallisation**

Où la température maximale atteinte est comprise entre 500 et Ac1. Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone : précipitations et coalescence en présence d'éléments dispersifs, sur revenu dans certains aciers trempés revenus, légère globularisation de la perlite dans les aciers normalisés.

## **6) Métal de base**

Où la température maximale atteinte resta inférieure à environs 500°C, dans laquelle on ne détectera pas de modifications structurales visibles.

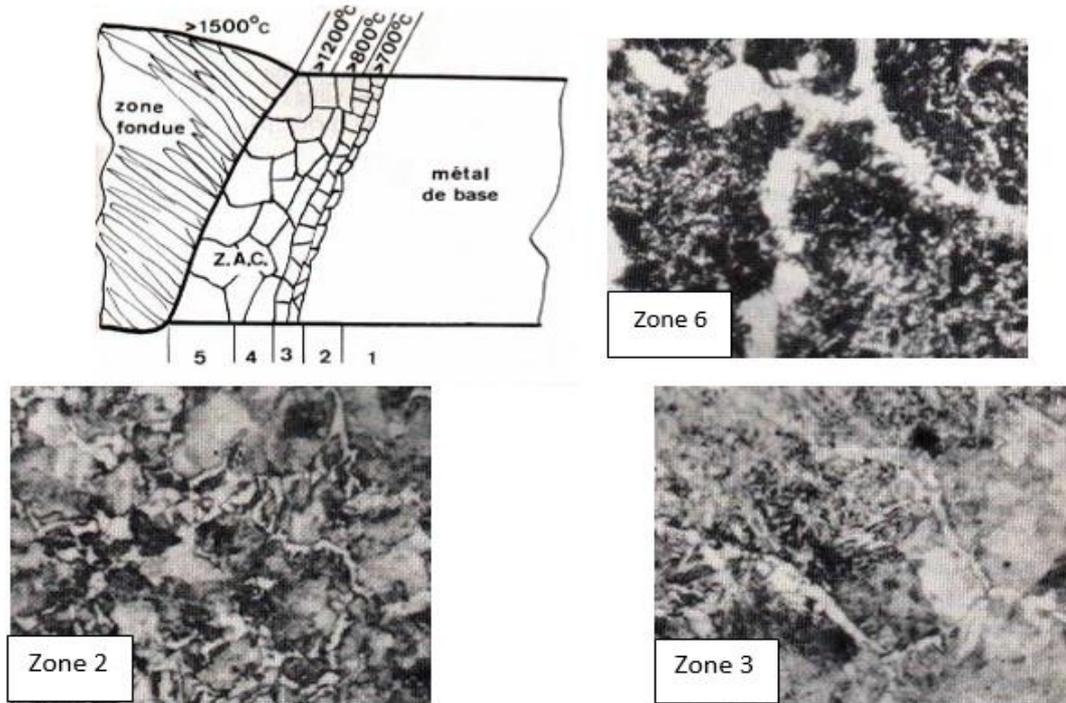


Figure 2.7 : Structure de weidmannstatten [21]

---

**Chapitre 03 :**  
**TRAITEMENTS**  
**THERMIQUES DES**  
**SOUDURES**

---

## 1. Introduction

Sur le plan technologique, les aciers et alliages à base de fer sont toujours d'une importance capitale, puisque on les retrouve sous une forme ou sous une autre dans presque tous les domaines.

Ces aciers, on peut leur faire acquérir des propriétés très variées notamment en recourant au traitement thermique. Ce qui permet de les adapter aux exigences d'utilisations les plus diverses.

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage suivi de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables pour son emploi ou sa mise en forme.

Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques tel que : l'augmentation de la limite élastique et la diminution de la fragilité.

Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique dans la plupart des cas, un traitement thermique approprié. D'une manière générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique mais apporte des modifications de point de vue :

- Constitution (état de carbone, forme allotropique de fer),
- Structure (taille de grain, répartition des constituants),
- Etat mécanique (gradient de température au divers point de la pièce).

## 2. Évolution historique des traitements thermiques

L'évolution des traitements thermiques s'effectue dans le sens d'une association de cycles de température à d'autres sollicitations : déformations plastiques, contraintes d'origines diverses, influence de l'environnement, en particulier emploi d'atmosphères spécifiques de chaque traitement et de chaque alliage, etc. Les traitements thermiques modernes pour les alliages performants comprennent souvent une succession complexe d'opérations très précises ; c'est dans les traitements thermiques des alliages d'aluminium qu'on enver des traitements thermiques superficiels ou localisés sur certaines parties de pièces, utilisant parfois des techniques physiques très récentes : laser, bombardement électronique par exemple.

Les progrès dans les traitements thermiques n'ont pu être obtenus que grâce aux développements de la physique des matériaux et à l'amélioration de la connaissance des mécanismes structuraux dont dépendent les diverses propriétés des matériaux. Ces progrès ont donc été étroitement liés à la découverte et au développement des appareils de laboratoire et des méthodes d'investigation de la structure des matériaux.

La mise au point en laboratoire de nouveaux traitements thermiques et de nouveaux alliages obtenant par traitement thermique des propriétés intéressantes ne peut généralement s'étendre aux conditions de fabrication industrielle qu'au prix de difficultés importantes. Les solutions industrielles dépendent beaucoup de la dimension, de la masse, de la quantité et de la fonction des pièces à traiter. Des pièces d'horlogerie, de très grande série, et ne pesant que quelques

milligrammes, ne se traitent évidemment pas de la même façon que des pièces uniques de grosse mécanique ou de grosse chaudronnerie, pesant plusieurs centaines de tonnes. Trouve une illustration spectaculaire. Il faut aussi ajouter l'évolution [21]

### 3. Principes, buts et rôle des traitements thermiques

La plupart des matériaux sont susceptibles de subir des traitements thermiques. C'est ainsi que l'on peut modifier les structures des matières plastiques, des verres, des céramiques, mais ce sont les matériaux métalliques, métaux et alliages, qui offrent les plus grandes possibilités de traitements thermiques : on peut même dire que c'est grâce à eux que l'on peut en tirer le plus grand profit.

Les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent, de conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie, ou +à sa mise en œuvre dans les meilleures conditions, sous forme de demi-produit ou d'ébauche. Ces améliorations contribuent très souvent à une diminution des coûts, car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché quand on sait les traiter convenablement, ou la diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

Il faut préciser, dès à présent, que les traitements thermiques permettent une modification de toutes les propriétés des matériaux, car celles-ci sont toutes étroitement liées à leur structure : propriétés mécaniques, propriétés chimiques et de résistance à la corrosion, propriétés physiques diverses (électriques, magnétiques, etc.). On commence à bien comprendre les relations entre structure et propriétés, et, comme on peut maîtriser les évolutions structurales par traitement thermique, il est souvent possible d'obtenir ainsi les propriétés voulues.

Il s'agit, bien entendu, d'améliorer les propriétés des matériaux pour leur emploi mais, souvent, l'amélioration de l'une d'elles va généralement de pair avec une dégradation d'autres propriétés. Ainsi, une augmentation de dureté ou de résistance mécanique est toujours associée à un accroissement de la fragilité ou à une diminution de la ductilité, et à l'altération de nombreuses autres propriétés, mais aussi à une diminution de l'usinabilité ou à une impossibilité d'emploi du matériau traité thermiquement pour le soudage par exemple. De même, un recuit permet en général d'augmenter la malléabilité et la facilité de mise en forme, mais diminue la dureté, la résistance mécanique et la résistance à l'usure, l'usinabilité pouvant être, selon le cas, améliorée ou diminuée. [21].

Ce sont surtout les industries de pointe (aéronautique, nucléaire, essentiellement) et les industries de grande série (automobile) qui ont poussé au développement des performances des alliages et à la mise au point de traitements thermiques permettant d'atteindre ces performances. On rencontre alors, parmi les alliages traités thermiquement, des domaines d'application spécifiques.

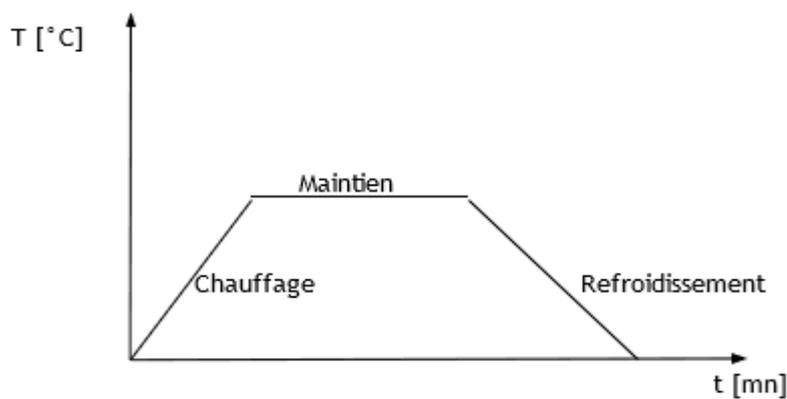
Quand un alliage doit être utilisé sous des sollicitations diverses et simultanées, il est souvent nécessaire de faire des choix entre les propriétés et de faire des concessions à certaines d'entre elles. C'est ainsi qu'un acier traité à haute résistance est en général sensible à la corrosion sous tension, et que, dans le cas où un tel acier est soumis à ce type de corrosion, il convient de ne pas le traiter à son plus haut niveau de résistance mécanique ; l'emploi de cet acier pourra néanmoins se révéler plus intéressant, même s'il n'est pas traité à son niveau optimal de résistance.

Pour ces raisons, le choix d'un traitement thermique résulte souvent d'un compromis entre plusieurs propriétés contradictoires, les solutions sont souvent multiples, et le choix de la place des traitements thermiques dans une gamme de fabrication est d'une importance capitale.

#### 4. Cycle d'un traitement thermique

En général le traitement thermique comprend 3 étapes :

- Un chauffage jusqu'à une température qui dépend du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.



**Figure 3.1:** Cycle d'un traitement thermique [21]

Toute fois le choix du traitement thermique le plus approprié est en lui-même d'une grande difficulté plus particulièrement dans le choix de ces paramètres, et ce en fonction des structures et des propriétés physiques et mécaniques souhaitées

## **5. Diagramme d'équilibre**

### **5.1 Diagramme fer-carbone métastable**

Le diagramme d'équilibre est une représentation graphique indiquant la composition des phases et la structure d'alliage Fe-C, élaboré sous la pression ordinaire supposant des vitesses de chauffage et de refroidissement extrêmement faibles. [14]

Les domaines de solubilité du carbone sont désignés par  $\gamma$  et  $\alpha$  respectivement, la solubilité étant très faible à l'état  $\alpha$  contrairement à l'état  $\gamma$  qui est plus grande, ce qui explique l'étendue du domaine  $\gamma$  par rapport au domaine  $\alpha$  qui est extrêmement réduit (Figure.3.2).

### **5.2 Les constituants d'équilibres des alliages Fer- Carbone**

#### **▪ La solution solide $\delta$**

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer  $\delta$  la solubilité limite du carbone dans le fer  $\delta$  est de 0.1 %.

#### **▪ La solution solide $\alpha$ (ferrite)**

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer  $\alpha$ , la solubilité limite du carbone dans le fer  $\alpha$  est de 0.022 %.

#### **▪ La solution solide $\gamma$ (austénite)**

C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer  $\gamma$  la solubilité limite du carbone dans le fer  $\gamma$  est de 2.11 %.

#### **▪ La cémentite**

De composition chimique  $Fe_3C$ , elle constitue l'un des composés de la perlite. Elle peut apparaître sous forme lamellaire ou globulaire selon le mode de refroidissement.

#### **▪ La perlite**

C'est un agrégat eutectoïde obtenu par transformation isotherme de l'austénite, chaque grain est formé de lamelles alternées de ferrite et de cémentite, quand le refroidissement est lent elle peut exister sous forme globulaire.

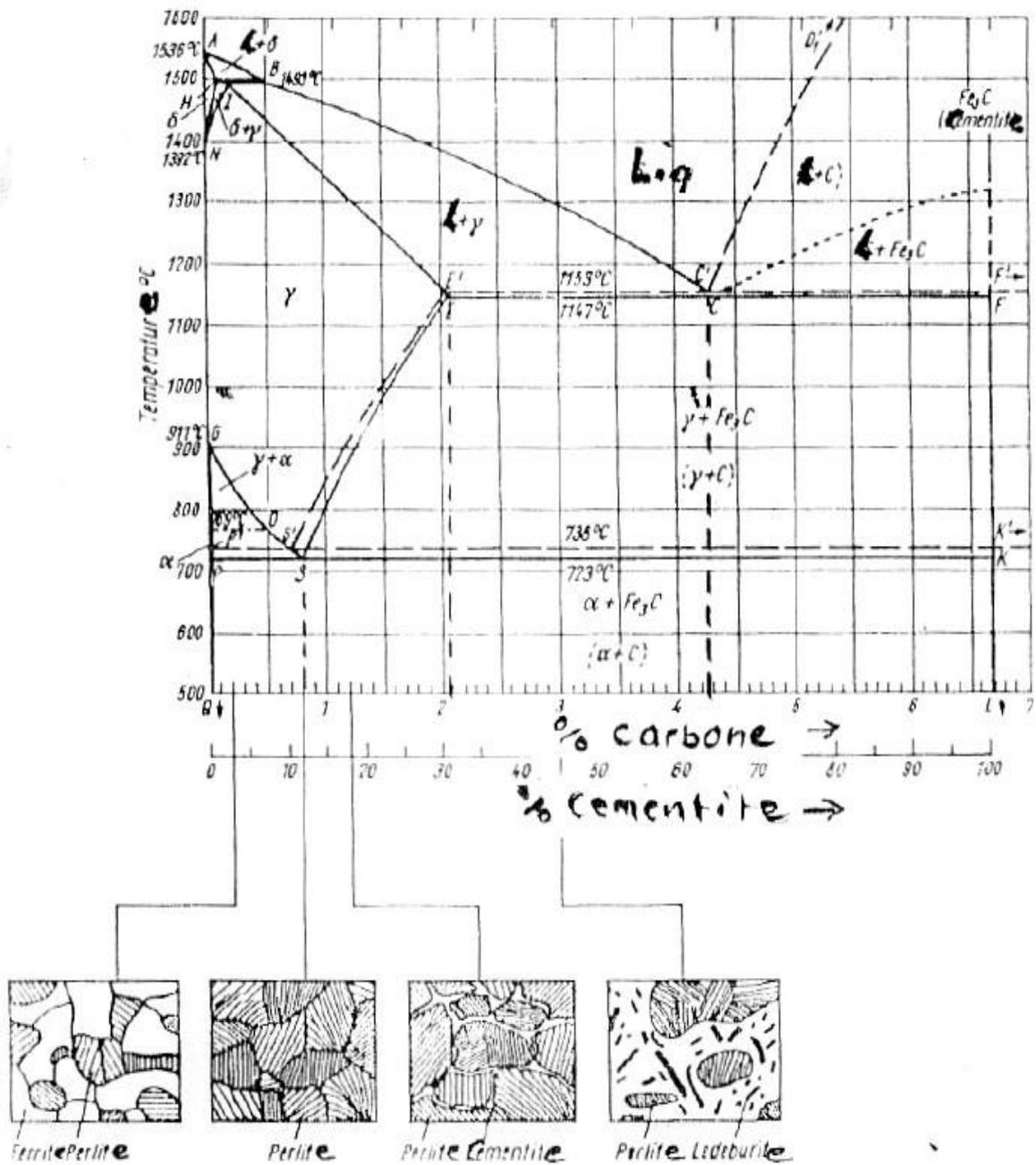


Figure 3.2 : Diagramme Fer-Carbone (d'après [14]).

## 6. Traitements thermiques des soudures

### 6.1 Objet et mise en œuvre des traitements thermiques

#### 6.1.1 Classification selon l'objet

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. En réalité, compte tenu des rôles multiples que joue tout cycle d'échauffement et de refroidissement, le premier type de traitement destiné à jouer un rôle métallurgique, agit aussi sur l'état de contraintes. Le second à finalité mécanique, a cependant des conséquences métallurgiques. C'est donc en gardant à l'esprit cette interaction que l'on étudiera successivement, ci-dessous, dans le cas des aciers, les types de traitement suivants, sans entrer dans le détail de la nature des sources d'énergie mise en œuvre :

- Traitement de relaxation (ou de détente) et de revenu.
- Traitement de normalisation.
- Traitement de trempe et revenu. [21]

### 6.1.2 Modes de mise en œuvre

On peut classer et décrire comme suit la façon dont les traitements thermiques concernant des soudures ou des ensembles soudés sont pratiqués.

a) Le traitement peut être global, c'est à dire affecter la ou les soudures constitutives de l'ensemble, en même temps que la totalité du métal de base. Une telle action peut être simultanée, c'est – à dire que tout l'ensemble soudé est soumis en même temps, au même cycle de traitement ; ou bien le traitement à lieu de proche en proche, mais pour chaque position qu'elle occupe, la source de chaleur agit simultanément et selon le même cycle sur la soudure et le métal de base non affecté. Le traitement global de proche en proche est illustré par un schéma emprunté à la fabrication des tubes soudés par résistance ou par induction, la source de chaleur, immobile, traite une source entière du tube qui défile, aussi bien le métal de base que la soudure qui vient d'être faite.

Dans la pratique, le traitement global simultané peut être appliqué à tous les objectifs de traitement mentionnés plus haut et à toutes les formes et encombrement d'ensembles soudés compatibles avec les capacités des sources de chaleur mise en œuvre. Le traitement global de proche en proche, qui requiert un profil constant du produit à traiter, est essentiellement pratiqué pour la fabrication des tubes, pour la normalisation ou l'hypertrempe, selon qu'il s'agit d'acier " noir" ou d'acier inoxydable.

b) Le traitement local simultané consiste à opérer en même temps sur la totalité d'une soudure et de ses abords et donc sur une partie seulement de métal de base encadrant la zone

affectée. Le traitement se distingue du traitement local de proche en proche en ce sens que ce dernier est pratiqué au moyen d'une source de chaleur se déplacent par rapport à la soudure ou l'inverse (l'une immobile, l'autre mobile), pour assurer ce proche en proche l'effet recherché dans le métal fondu est une partie de métal de base incluant la zone affectée.

Le traitement local simultané est essentiellement destiné à des soudures circulaires, pour lesquelles il assure un effet métallurgique (normalisation ou revenu), ainsi que de relaxation, en raison de symétrie qu'il assure. Tel n'est pas le cas de traitement local de proche en proche qui, s'il assure une action métallurgique (essentiellement de normalisation), n'est pas à conseiller pour obtenir la relaxation, car qu'il ne fait que remplacer un état de contrainte du au soudage, par un autre, du au traitement lui-même.

En ce qui concerne les traitements thermiques locaux, qu'ils soient simultanés au de proche en proche, ils ne peuvent être pratiqués sans inconvénient que moyennant deux conditions, toutes deux relatives au métal de base, sur lesquelles on reviendra plus loin:

Lors des traitements thermiques de normalisation, la vitesse de refroidissement, donc l'éloignement de la source de chaleur, doit être réglée de sorte que la zone traitée, qui est momentanément austénitisée, ne prenne pas la trempe.

Tout traitement thermique local crée sa propre zone affectée qui remplace la ZAT de la soudure que l'on traite. Du fait de l'inévitable gradient de température qui y règne, cette zone comporte sur ses bords. Une bande où le traitement appliqué n'a pas complètement été réalisé, mais où il a créé une modification du métal de base par rapport à son état initial, en particulier un adoucissement si le métal de base est lui-même à l'état initial trempé et revenu. [21]

## **6.2 Traitement de relaxation**

### **6.2.1 Objet**

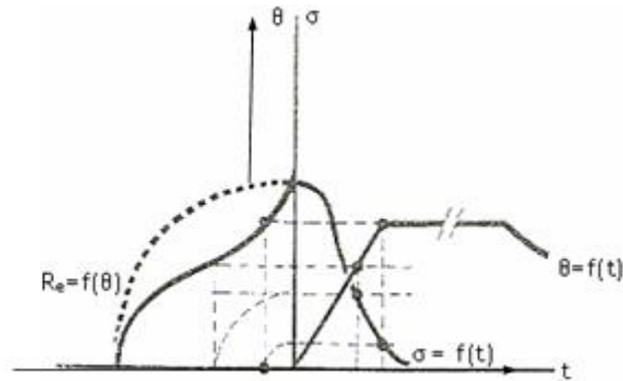
Le traitement thermique de relaxation, ou encore de détente a pour objet d'annuler ou d'atténuer les contraintes résiduelles présentes dans un ensemble soudé après son achèvement, ou en cours de construction s'il apparaît nécessaire d'intervenir sur l'état des contraintes avant de poursuivre les opérations de soudage en toute sécurité. Compte tenu de domaine de température, en tous cas inférieurs à celle du point (A1), dans lequel se pratique le traitement de relaxation, il entraîne aussi un effet de revenu, lorsque les soudures contiennent des constituants de trempe, dans la zone fondue comme dans la zone affectée. Cet effet est parfois l'objet principal du traitement qui reste alors pratiqué selon les mêmes techniques. Malheureusement, ce rôle métallurgique supplémentaire n'est pas toujours bénéfique, car des effets défavorables peuvent intervenir, en affectent les propriétés mécaniques ou en provoquant le phénomène de fissuration dit " au réchauffage".

### **6.2.2 Mécanisme de la relaxation**

On a déjà indiqué, à propos de l'étude thermique et thermomécanique du soudage, que la relaxation thermique des contraintes résiduelles est obtenue grâce à la diminution de la limite d'élasticité provoquée par l'élévation de la température il résulte de cette diminution que toute région d'une pièce ainsi réchauffée qui était

le signe d'une contrainte résiduelle à l'ambiante (contrainte évidemment élastique) se plastifie au fur et à mesure de l'échauffement, ce qui fournit l'allongement nécessaire à l'obtention d'un taux de relaxation croissant avec la température du traitement.

Une représentation simplifiée de ce mécanisme peut être obtenue en confrontant sur un même graphique (Figure.3.3) le cycle thermique  $\theta = f(t)$  du traitement, la variation  $R_e = f(\theta)$  de la limite d'élasticité en fonction de la température et en fin la courbe  $\sigma = f(t)$  donnant la variation de la contrainte résiduelle durant le cycle du traitement.



**Figure 3.3:** Mécanisme de la relaxation des contraintes (d'après [22]).

Le taux de relaxation, en première approximation fonction de la seule température de traitement est très faible jusqu'à 200 °c, atteint 50 à 60 % à 500 °c, 70 à 85 % à 575 °c, et 90 à 95 % pour une température de 625 °c, le résultat étant obtenu dès que la température maximale est atteinte. Il n'en reste pas moins que tout traitement thermique doit être spécifié non seulement en termes de température, mais aussi en termes de durée, pour tenir compte, en fonction de l'énergie disponible pour assurer le traitement, de la masse du produit traité et de la nécessité d'homogénéiser la température pour éviter la création de nouvelles contraintes au refroidissement. D'autre part, un certain temps de maintien de la température fixée pour le traitement assure un pourcentage complémentaire de relaxation dans les régions où existent initialement des points de contraintes [23],

Finalement pour définir un traitement thermique en fonction de la température et du temps, et pour en évaluer les effets, du point de vue des contraintes ou Surtout de celui des propriétés mécaniques, on fait appel à un paramètre dit de Hollomon [24].

$$H = T (20 + \log t) 103$$

Où T est la température de traitement (en degrés K) et T la durée du traitement (en heures).

Ce paramètre est utilisé dans la norme précitée pour rendre compte de l'effet du traitement sur les propriétés mécaniques, dont il est fait état dans le paragraphe suivant. La norme indique à cette effet les valeurs de H (Figure.3.4) correspondant aux diverses combinaisons température / temps.

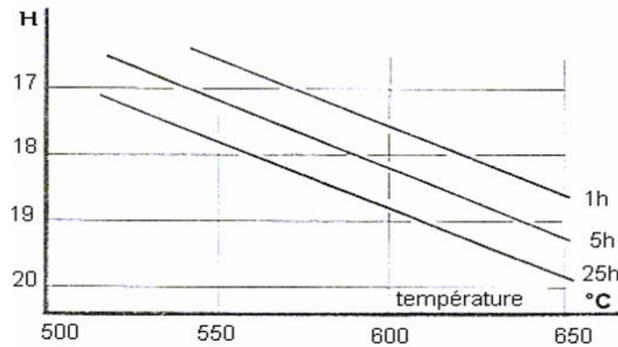


Figure 3.4: La variation de H en fonction de la température (d'après [34]).

### 6.2.3 Effets métallurgiques du traitement

Le cycle thermique d'un traitement de relaxation étant assimilable à celui d'un traitement de revenu, il n'y a dans l'ensemble pas d'effet sur le métal de base lorsque ce dernier est lui-même mise en œuvre à l'état normalisé et revenu et trempé et revenu, sauf si le traitement à lieu à une température supérieure à celle de revenu initial ; à cet effet on se tient à une température inférieure d'une trentaine de degrés au-dessous. Il faut cependant signaler que certains aciers alliés (au Mn-Mo, au Mn-Ni-Mo, ou encore au Cr-Mo) peuvent être sensible au phénomène dit de fragilité de revenu, qui se produit au cours d'un traitement à 450 – 550 °C ou durant le refroidissement au cours d'une traversée trop lente de cet intervalle de température ce phénomène, qui semble être associé à l'effet des impuretés, est moins sensible en présence de vanadium [25] [20].

Par contre pour les aciers utilisés à l'état normalisé, le traitement thermique de relaxation une action à la fois sur les caractéristiques de traction (à l'ambiante ou à chaud) et sur la température de transition de résilience ; cette action est fonction de paramètre H du traitement, défini comme indiqué ci-dessus. Ce comportement se produit par les aciers au C, au Mn, au C-Mn additionnés de Ni et pour les aciers a haut limite d'élasticité

En ce qui concerne l'effet de traitement de relaxation sur les propriétés mécaniques du métal fondu, il est bénéfique en ce qui concerne la restauration à partir de l'état vieilli par l'effet tenson-thermique que l'on peut rencontrer dans les soudures multi passes surproduits épais. Il peut par contre avoir un effet fragilisant pour certaines compositions sensibles à la fragilité de revenu, essentiellement au cours d'un refroidissement trop lent ; la température maximale atteinte et la durée du séjour ne sont pas en cause dans ce phénomène. [24]

En conclusion, il apparaît en toute état de cause, on doit, au moment du calcul d'une construction devant être soumise à un traitement thermique de relaxation, tenir compte des propriétés mécaniques réelles, telles qu'elles résultent de l'effet métallurgique de ce traitement [26].

21 Pour ce faire, la valeur H du paramètre de ce traitement doit être fixée au minimum compatible d'une part avec les conditions technologiques indiquées plus haut, d'autre part avec le taux de relaxation recherché ou imposé, cependant que la vitesse de refroidissement doit être réglée au maximum possible, tout en maintenant l'homogénéité thermique des pièces traitées [24].

### 6.2.4 Fissuration au réchauffage

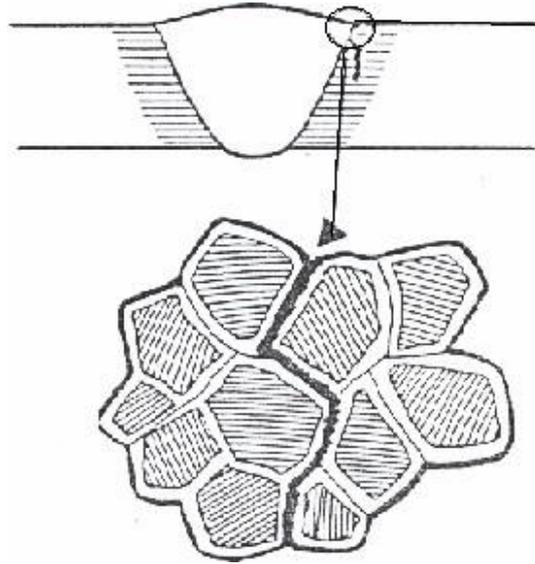
L'explication simplifiée du mécanisme de la relaxation qui a été donnée dans ce qui précède suppose un état de contraintes et un état structural homogènes. En réalité, un ensemble soudé, à l'état brut, n'est homogène à aucun de ces deux points de vue d'une part le joint soudé, et ses bords n'ont pas la même structure que le métal de base et réagissent donc différemment vis-à-vis du réchauffage nécessaire à la relaxation des contraintes, d'autre part, l'état de contrainte n'est pas uniforme, en raison de cette hétérogénéité de structure et aussi des particularités géométriques de la structure. Pour ces deux raisons on peut craindre que l'allongement plastique nécessaire à la relaxation soit mal supporté au niveau des soudures au cours du cycle de réchauffage, en raison de la structure initiale qui y règne et des modifications de ce cycle y engendre. Ce risque se trouve accentué au niveau des zones où se manifestent n. Si tel et le cas, l'allongement plastique imposé risque de n'être obtenu qu'au risque de la fissuration qui a été appelée " Fissuration au réchauffage" [27].

La fissuration au réchauffage peut affecter non seulement les ensembles soudés, mais aussi les pièces rechargées, en particuliers les parois intérieures d'appareils à pression revêtues d'une couche austénitique déposée par soudage sous flux en passe larges, surtout avec apport en feuillards. Dans ce cas, la fissuration, qui est transversale, se produit dans l'étroite zone de revenu du métal de base comprise entre deux passes voisines, déjà signalée à propos des transformations en phase solide à l'échauffement.

Ce cas pose un problème supplémentaire associé à la différence de coefficient de dilatation entre le dépôt austénitique et le métal de base, qui intervient aussi bien durant le soudage qu'au cours du traitement thermique ultérieur.

Ce phénomène, qui ne se produit pas pour la plus part des aciers au C-Mn ou à haute limite d'élasticité à dispersoïde, est caractéristiques de certains aciers alliés contenant des éléments d'addition carburigènes, c'est – à –dire susceptible de produire des carbures, tels que, par exemple, les aciers au Cr-Mo-V. L'examen métallurgique des fissures montre qu'elles s'amorcent volontiers dans la zone affectée, au raccordement des cordons de soudure, où l'effet d'entaille accentue localement la contrainte résiduelle initiale et se propage le long des joints de grains de l'austénite mère, qui avait donné naissance au refroidissement après soudage à de la martensite ou de la bainite (Figure.3.5).

Ce parcours de la fissuration, qui a lieu à température croissante, s'explique par la précipitation des carbures dans les aciers grains d'austénite, d'où un durcissement qui entraîne la localisation de la déformation au niveau des joints de ces grains, affaiblis par la ségrégation des impuretés qui s'y produisent. Le risque de fissuration au réchauffage est donc essentiellement associé à la composition chimique de l'acier (éléments d'alliage et impuretés) et, d'autre part, aux conditions d'exécution de traitement.



**Figure 3.5:** Fissuration du joint de liaison [21]

### 6.2.5 Traitement avant ou après refroidissement

Normalement, il n'y a pas d'inconvénient à procéder au traitement de relaxation d'un ensemble soudé aussitôt après l'exécution de la dernière soudure, avant refroidissement complet, même si le programme prescrit un post-chauffage; en effet, le traitement de relaxation se pratique à une température supérieure aux température usuelles du post-chauffage, dont il ne peut que compléter les effets. Cependant, si on est en présence de plusieurs pièces identiques à souder et à traiter, on peut avoir intérêt à les stocker après refroidissement pour leur faire subir ultérieurement et simultanément le traitement thermique prescrit. Mais il faut, pour opérer ainsi en toute sécurité, veiller à ce que la température et le temps de post-chauffage permettent un refroidissement complet sans risque de fissuration à froid.

De même, lorsqu'une opération, de chauffage de longue durée doit être interrompue, par exemple aux fins de contrôle, la température de préchauffage doit être maintenue pendant un temps suffisant pour assurer un refroidissement sans risque, ou alors il faut procéder à un traitement intermédiaire de relaxation.

Une autre solution consiste à procéder au contrôle non destructif à chaud, mais cela indique des difficultés techniques non négligeables.

## 6.3 Traitements comportant une austénitisation

### 6.3.1 Recuit

Les traitements de recuit présentent une grande diversité, certains d'eux sont mis en œuvre pour éliminer les hétérogénéités structurales et chimiques dans les pièces brutes de fonderie ou de forge, et d'autres sont utilisés pour obtenir des structures dont les caractéristiques mécaniques répondent à la manière la plus satisfaisante à l'utilisation dans l'industrie ; on distingue :

### a. Recuit de normalisation

En matière d'acier, le recuit ou la normalisation ont tous deux pour objet d'obtenir, au moyen d'un chauffage au-dessus de point A3 provoquant l'austénitisation complète de la zone ou de la pièce traitée, suivi d'un refroidissement relativement lent, une structure affinée constituée de ferrite et de perlite qui remplace, quelle qu'elle aient été, la constitution et la structure à l'état brut de soudage. La normalisation, qui comporte un refroidissement moins lent que le recuit, produit une perlite dont l'espace interlamellaire est plus faible, donc plus dure que ne le fait le recuit. Pour certains aciers faiblement alliés, la normalisation peut provoquer une trempe de type bainitique et requérir de ce fait un traitement ultérieur de revenu.

Du point de vue du mode de mise en œuvre, le traitement global simultané est le plus complet car il affecte tout l'ensemble traité, sans gradient de température ; il produit donc uniformément l'effet métallurgique recherché aussi bien dans la zone fondue et thermiquement affectée que dans le métal de base, qui bénéficie de la même régénération thermique, s'il a été déformé à froid ou à haute température (emboutissage à froid ou à chaud). S'il s'agit d'un ensemble important et lourd, le traitement global peut poser des problèmes pratiques difficiles de déformation ou d'encombrement. On peut être amené à étayer les pièces pour éviter leur déformation et, pour les pièces trop importantes pour être normalisées en une seule fois, telles que les longues viroles, on peut traiter successivement chaque moitié qu'on introduit dans le four cependant que l'autre dépasse à l'extérieur. On peut aussi normaliser séparément chaque élément de virole, dont la soudure longitudinale, placée verticalement dans le four bénéficie du traitement sans risque de déformation ; on assemble ensuite les viroles entre elle et en termine alors par un traitement de relaxation global, sans normalisation des soudures circulaires.

### b. Recuit complet

On parle de recuit complet lorsque le refroidissement est lent (refroidissement au four). Il consiste en une austénitisation au-dessus de Ac3, on aura une résistance à la rupture, une limite élastique et une dureté faible, et une ductilité élevée.

### c. Recuit de régénération

C'est un recuit qui comprend :

Un chauffage sans maintien prolongé, à une température légèrement supérieure à Ac3 de manière à obtenir une austénite de grains fins suivi d'un refroidissement à vitesse convenable conduisant à une structure fine.

### d. Recuit d'adoucissement

Ce type de recuit consiste en un chauffage juste au-dessous de Ac1, un maintien à cette température, suivi d'un refroidissement lent pour obtenir un état suffisamment adouci et aussi exempt de contraintes que possible.

### 6.3.2. Traitement inter critique

On qualifie d'inter critique un traitement pratiqué à une température située entre les points A1 et A3 de l'acier considéré. D'après le diagramme fer-carbone, l'acier est constitué dans ce domaine de température,

par une partie de la ferrite initiale, c'est à dire celle qui existait avant le traitement, et une austénite résultant de la transformation de l'agrégat lamellaire perlitique initial. Si on part d'un état hors d'équilibre, c'est aussi vers cette constitution que le traitement inter critique fait évoluer l'acier. En même temps, les carbures ou carbonitrides présents (aciers à dispersoïde) subissent une dissolution partielle.

Au refroidissement (nécessairement lent car il s'agit toujours d'un traitement global) les plages d'austénite se transforment en ferrite et perlite, nouvelles et plus fines, par rapport au constituants initiaux qu'elles remplacent et les plages de ferrite non dissoutes à l'échauffement demeurent intactes. Il en est de même pour le comportement des carbures et carbo-nitrides. Ce mécanisme, sommairement décrit, d'accompagne d'une amélioration de la ténacité (abaissement de la température de transition) qui, sans être intéressante, d'autant qu'à la température pratiquée, le risque d'affaissement des pièces traitées est beaucoup moins grand.

En ce qui concerne les ensembles soudés, le traitement inter critique peut être utilisé soit en complément du traitement de normalisation dont il complète les effets, soit comme seul traitement sur l'état brut de soudage, essentiellement pour améliorer la ténacité de la zone fondue. Cette amélioration est d'autant plus sensible que, compte tenu de la composition chimique, la structure initiale est plus éloignée de l'état d'équilibre.

Enfin, il convient de signaler que, malgré les avantages qu'il comporte, l'application du traitement inter critique est limitée au cas des ensembles soudés constitués avec un acier de base mis en œuvre à l'état normalisé. En effet, compte tenu de la température à laquelle il doit être appliqué, nécessairement supérieure à celle du point A1, il ne peut pas être appliqué à des ensembles constitués par de l'acier trempé et revenu qui ne saurait, sous peine d'un adoucissement inacceptable, être porté à une pareille température. [21]

### **6.3.3. Trempe et revenu des ensembles soudés**

Bien que son application soit relativement rare, le traitement de trempe et revenu de pièces soudées, qui intervient surtout en construction aéronautique ou mécanique, mérite d'être signalé ici en raison des particularités qu'il présente. Le but du traitement est d'effacer les effets du soudage et d'obtenir, par trempe et revenu, les qualités optimales des pièces soudées, tant dans le métal de base (qui peut être soudé à l'état initial recuit ou déjà trempé et revenu) que dans le métal fondu.

S'agissant d'un acier destiné à ce type de traitement, sa composition (carbone et élément d'alliage), est nécessairement celle d'un acier trempant ou même autotrepant, ce qui crée une première difficulté, au cours même du soudage, du point de vue de la fragilité engendrée par la trempe due au cycle thermique ainsi que de celui du risque de fissuration à froid, ces deux risques étant accentués par une teneur en carbone, nécessaire à l'obtention des caractéristiques élevées à l'état traité. En particulier, la fissuration à froid intervient même pour des teneurs en hydrogène très faibles, telles que celle qu'on trouve dans le métal fondu en soudage TIG ou MIG avec fil nu.

D'autre part, dans la mesure où ces difficultés peuvent être résolues par les précautions indiquées à propos de la trempe et de la fissuration à froid, le succès du traitement requiert, au niveau du métal fondu, une "réponse" à ce traitement identique ou comparable à celle de métal de base, de telle sorte qu'il n'y ait pas de

discontinuité au niveau du ou des joints. Il est évident que ce souci conduit à élever la teneur en carbone et en élément d'alliages dans le métal fondu à un niveau comparable à celui de métal de base, mais cette solution accentue les risques de fragilité et de fissuration déjà mentionnés.

Il s'agit donc d'un problème difficile, qui requiert pour chaque cas une expérimentation préalable, comportant des essais directs sur joints soudés, ou bien des essais de comparaison de la trempabilité du métal de base et du métal fondu.

### **6.3.3.1. La trempe de l'acier**

#### **a) Définition**

La trempe est un traitement thermique qui comprend :

Le chauffage de métal à une température supérieure au point de transformation A3.

Le maintien en température pour permettre aux transformations internes de se produire dans toute la masse.

Le refroidissement rapide à une vitesse supérieure à la vitesse indispensable à la formation de martensite et inférieur à la vitesse qui laisserait subsister une proportion trop importante d'austénite. Le refroidissement a lieu par immersion des pièces dans un fluide. Un tel traitement modifie très sensiblement les caractéristiques mécaniques du métal.

#### **b) But de la trempe**

- Amélioration générale des propriétés mécaniques.
- Augmentation de la résistance à la rupture pour les aciers de construction qui subiront, après trempe un revenu à haute température.
- Augmentation de la limite élastique.
- Augmentation de la dureté.
- Diminution de la résilience Régénération d'un métal surchauffé.

Un métal est dit surchauffé lorsqu'il a été porté trop longtemps à une température bien supérieure à son point de transformation. Il présente une cristallisation grossière et ses caractéristiques sont ainsi très diminuées.

Une trempe aura pour effet, ce traitement pourra avantageusement être appliqué aux aciers doux et, particulièrement aux aciers de cémentation.

#### **c) Maintien en température**

Lorsqu'un métal est porté à une température supérieure au point Ac3, il se produit des transformations internes comportant notamment, pour les aciers la dissociation du carbone de fer. Ces réactions ne sont pas instantanées et elles doivent intéresser toute la masse si l'on veut obtenir une trempe à cœur. Il est donc nécessaire :

Que toutes les parties des pièces soient réellement portées à une température supérieure à Ac3.

Que la transformation qui commence par les parties extérieures de la pièce, gagne toute la masse métallique. Or, le pyromètre placé dans le four nous renseigne que la température de l'atmosphère ou du bain et non sur celle des pièces.

Entre l'instant où le pyromètre marque la température désirée et celui où l'on va tremper le métal, il faut donc attendre entre 2 à 3 minutes pour les pièces minces, 10 minutes pour les grosses pièces.

Remarquons que ce temps doit être réduit au minimum afin d'éviter la décarburation, l'oxydation du métal est, dans le cas des pièces cémentées, la diffusion du carbone dans la masse, ce qui entraînerait un manque de dureté.

#### **d) Comment obtenir une trempe correcte**

- En général, on recherche :
- Une dureté maximum.
- Une trempe aussi homogène que possible.

Des tensions internes minimales qui ne provoquent ni tapures, ni déformations. Il ressort de l'exposé précédent que ce triple but sera atteint si :

- Le refroidissement est très rapide jusqu'à une température légèrement supérieure à celle de transformation

- La vitesse de refroidissement, obligatoirement supérieure à la vitesse critique de trempe, est choisie en tenant compte de la composition de l'alliage traité et de la forme de la pièce, elle conditionne le choix de fluide réfrigérant.

- Le fluide de trempe baigne également toutes les parties de la pièce de façon à provoquer un refroidissement uniforme. D'où la nécessité de provoquer le déplacement relatif de la pièce et de fluide.

#### **e) Les fluides de trempe**

Les fluides de trempe ont pour but de provoquer le refroidissement rapide des pièces en emportant les calories qu'elles ont emmagasinées au cours de la chauffe.

Les principaux fluides de la trempe sont :

-Gazeux: l'air soufflé

Liquides :

- L'eau et les solutions salines
- Les huiles minérales et les graisses en fusion
- Les métaux et les sels en fusion.

### 6.3.3.2. Revenu de l'acier

On appelle revenu le chauffage de l'acier trempé à une température inférieure à Ac1, le maintien de cette température et le refroidissement ultérieur. Le revenu est une opération finale de traitement thermique, Son but est l'obtention des propriétés mécaniques requises.

De plus, il supprime complètement ou partiellement les contraintes internes dues à la trempe. Cette suppression des contraintes est d'autant plus complète que la température de revenu est plus élevée.

Ainsi après revenu à 550 °C, les contraintes axiales d'une éprouvette cylindrique en acier à 0.3%C diminuent de 60 à 8 kgf/mm<sup>2</sup>. Les contraintes tangentielles et radiales diminuent aussi intensément.

L'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30mn à 550 °C. Après le maintien de 1h30mn, les contraintes décroissent jusqu'à une valeur minimale susceptible d'être obtenue par le revenu à la température considérée.

La vitesse de refroidissement après revenu exerce également une action importante sur la valeur des contraintes résiduelles. 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. Le refroidissement à l'air engendre à la surface des contraintes de compression 7 fois inférieures et le refroidissement dans l'huile 2,5 fois inférieures à celles produites par l'eau. C'est pourquoi pour prévenir le gauchissement après revenu aux températures élevées, les pièces de forme complexe doivent être refroidies lentement, alors que dans tous les cas, après revenu à 500 °C ou 650 °C, les pièces en aciers alliés susceptibles de fragilité de revenu réversible doivent être refroidies rapidement. Les propriétés d'un acier obtenues par revenu dépendent surtout de la température. Il existe trois modalités de revenu.

Le revenu à basse température s'effectue avec un chauffage à 250 °C. Ce revenu diminue les contraintes internes, transforme la martensite de trempe en martensite de revenu. Il augmente la résistance et améliore quelque peu la ductilité sans altérer sensiblement la dureté. Après revenu à basse température, un acier trempé (0,6 à 1,3 %C) garde une dureté comprise entre 58 et 63 HRC, et donc une tenue à l'usure élevée. Pourtant, dans le cas d'un cœur non ductile la pièce ne supporte pas des charges dynamiques importantes.

C'est pourquoi le revenu à basse température est appliqué aux outils de coupe et aux instruments de mesure en aciers peu alliés au carbone, ainsi qu'aux pièces ayant subi une trempe superficielle ou une cémentation... etc. La durée usuelle de revenu est de 1h à 2h 30 mn ; pour les instruments de mesure et les pièces de grande section il faut choisir des durées de revenus plus grandes.

Le revenu à température intermédiaire se fait entre 350 et 500 °C et s'emploie pour les ressorts de types variés et pour des étampes. Il permet d'obtenir une limite d'élasticité importante, les résistances à la fatigue et à la relaxation élevées. Ou troostomar tensite et la dureté de l'acier varie de 40 à 50 HRC. La température de revenu doit être choisie de façon qu'elle ne provoque pas de fragilité de revenu irréversible.

Le refroidissement après revenu à 400 ou 450 °C se fait à l'eau ce qui contribue à la formation à la surface des contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.

Le revenu à haut température se fait entre 500 et 680 °C. Il donne à l'acier la structure de sorbite de revenu. Le revenu à haute température crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier.

La trempe suivie de revenu à haute température améliore par rapport à l'état normalisé ou recuit les limites de rupture et d'élasticité, la striction et surtout la résilience, comme pour un acier à 0.42 %C (Tableau3.1). [21]

**Tableau 3.1** : Influence du traitement thermique sur les caractéristique  
mécaniques de l'acier au carbone à 0,42 %C

Traitement Thermique	Propriétés mécaniques			
	R [daN/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>0,002</sub> [daN/mm <sup>2</sup> ]	A %	K [J/cm <sup>2</sup> ]
Recuit à 880 °C	55	35	20	9
Trempe à 880 °C (avec refroidissement à l'eau et revenu à 300 °C)	62	43	22	3
Trempe à 880 °C (avec refroidissement à l'eau et revenu à 600 °C)	62	43	22	14

La décomposition de la martensite de revenu influe sur toutes les propriétés mécaniques de l'acier. Le revenu aux températures basses (jusqu'à 200 au 250°C) diminue la susceptibilité à la rupture fragile, Le revenu aux basses températures renforce légèrement la résistance à la ductilité des aciers sous l'effet de diminution des macros contraintes et micro contraintes et de la modification de l'état structural. En poussant la température du revenu de 200 ou 250°C à 500 ou 680°C, on altère sensiblement la dureté, la charge de rupture, la limite élastique tout en améliorant l'allongement et la striction. Remarquons que la température du traitement en —générale doit être choisie en fonction de la teneur de carbone (Figure.3.6).

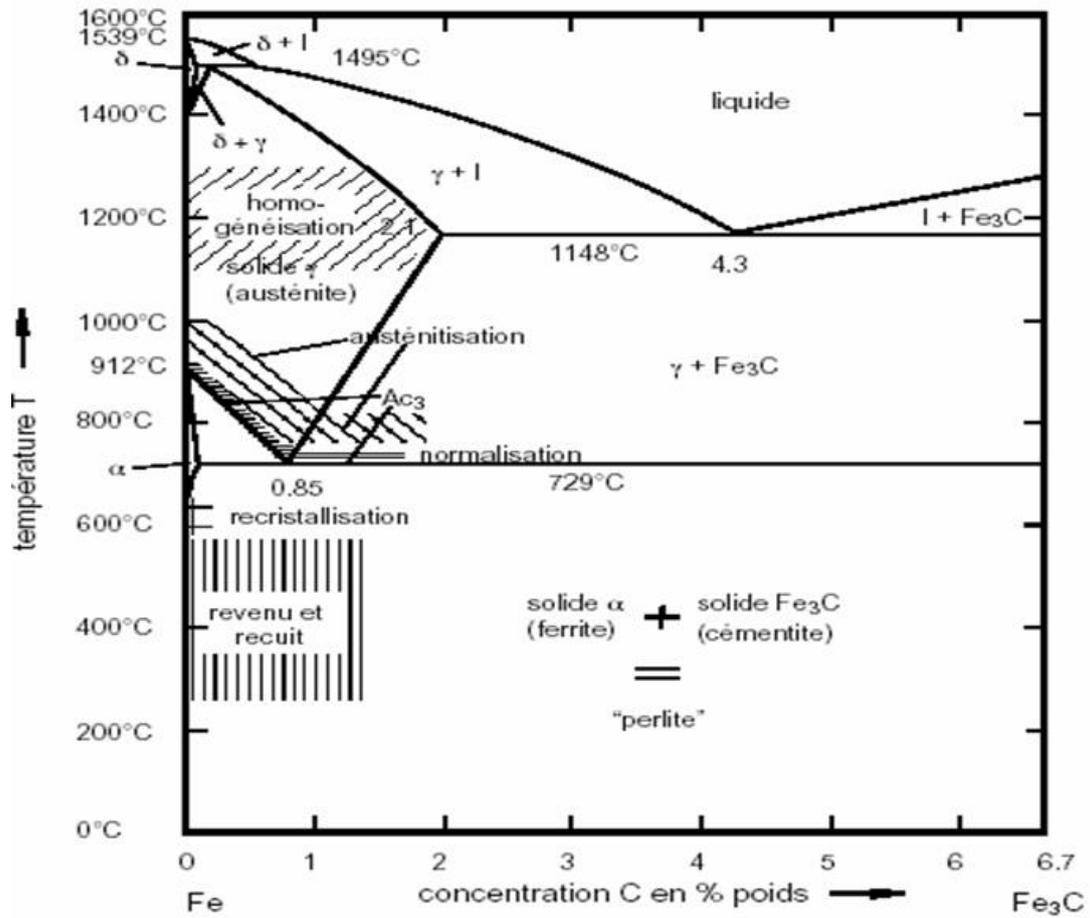


Figure 3.6: Les températures des différents traitements thermiques en fonction de la teneur en carbone (d'après [24])

---

# **Chapitre 04 : Études Expérimentales**

---

## 1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales réalisées par [28] pour caractériser les joints de soudure et la mise en évidence de l'influence d'un traitement thermique de trempe aux différents milieux de refroidissement sur les caractéristiques mécaniques d'un joint soudé en acier X70 avec un métal d'apport de même nuance.

Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour les connaître.

## 2 Matériaux utilisés

### ➤ Métal de base

L'acier utilisé pour les conduites de transport d'hydrocarbure et de gaz, se présente sous la forme d'un tube de 17 mm d'épaisseur, il répond au critère de la spécification Technique API 5LX de grade X70.

### ➤ Composition chimique

**Tableau 4. 1 :** Composition chimique de l'acier grade API X70 [28]

X70	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	Cu	Ti	Nb	Al	p
%	0.125	1.68	0.270	0.051	0.040	0.021	0.005	0.045	0.003	0.033	0.038	0.012

### ➤ Métaux d'apport

Le matériau de base va être soudé à l'arc électrique en 07 passes avec deux électrodes de type : E6010 et de E7010 de diamètre de 2.5mm, de manière permettant d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique.

**Tableau 4. 2 :** Composition chimique du matériau d'apport (E7010 et E6010)

	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
E6010	0.20	1.20	1.00	0.035	0.04	0.30	0.20	0.30	0.08
E7010	0.20	1.20	0.6	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10



Figure 4.1 : Métal d'apport utilisé (E6010) et (E7010).

### 3. Procédure de soudage

#### 3.1 Préparation des échantillons

Avant de passer par la procédure de soudage, il faut passer par l'étape de chanfreinage selon la norme ASME (Figure 4.2).

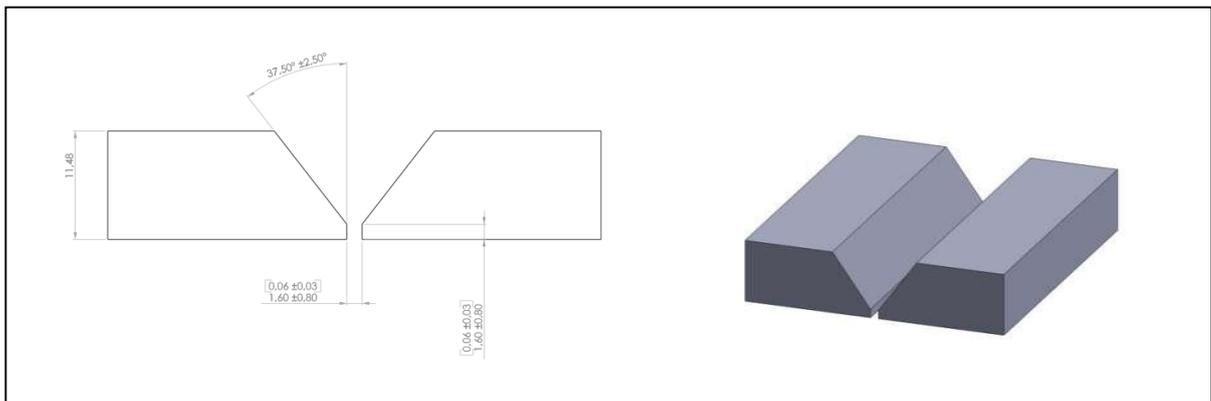


Figure 4.2 : les pièces à assemblés (chanfreinage).

#### ➤ Paramètres de soudage

Les opérations de soudage sont réalisées au niveau de l'atelier de soudage au Centre de Recherche des techniques industrielles (CRTI) par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant donne les principaux paramètres d'électrode utilisés et les techniques d'exécution du joint de soudure.

**Tableau 4.3:** Paramètres de soudage .

Pass	1er	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème	7ème
Type d'électrode	E6010	E7010	E7010	E7010	E7010	E7010	E7010
Dimension (mm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
Courant et polarité	DC-	DC+	DC+	DC+	DC+	DC+	DC+
Gamme d'intensité (A)	40/125	7/120	70/120	70/120	70/120	70/120	70/120
Gamme de Voltage (V)	20/4	15/3	15/3	15/3	15/3	15/3	15/3
Vitesse de soudage (mm/s)	8	8	8	8	8	8	8

### 3.2 Découpage des éprouvettes

A partir de notre plaquette soudée nous avons prélevé 16 éprouvettes.



**Figure 4.3 :** Une tronçonneuse (Struers Discotom) au niveau de CRTI.



Figure 4.4 : 4 Eprouvettes de pliage



Figure 4.5 : 4 Eprouvettes de traction



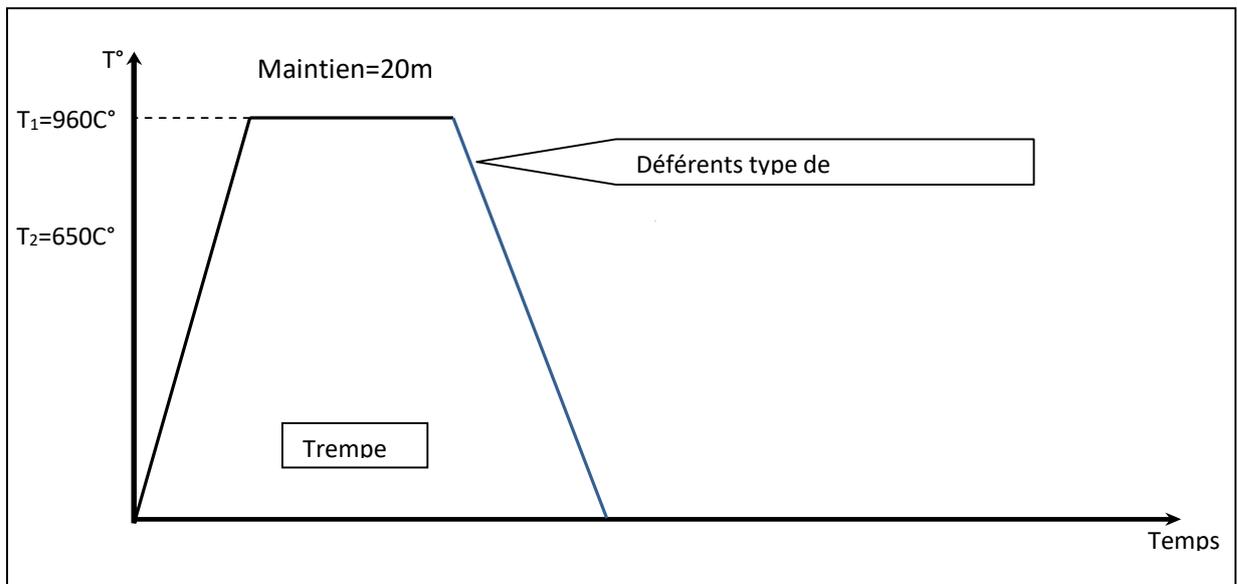
Figure 4.6 : 4 Eprouvettes de résilience [28]



Figure 4.7 : 4 Eprouvettes de microstructure [28]

### 3.2.1 Traitement Thermique

#### ➤ Cycle de traitement effectué



**Figure 4.7 :** Cycle effectué pour 12 éprouvettes.**Figure 4.9 :** Les éprouvettes dans le four au niveau de CRTI [28].

➤ **Etapes de traitement thermique :** Le cycle de traitement thermique effectué c'est un cycle de trempe réalisé par ces étapes :

- a) Chauffage des éprouvettes dans le four jusqu'à  $960\text{ C}^\circ$  pour mettre l'acier dans le réseau cristallin cubique à face centrée correspondant au Fer  $\gamma$ , avec une vitesse d'échauffement égal  $16\text{ C}^\circ/\text{min}$ .
- b) Maintien pendant 20 minutes à  $960^\circ\text{C}$  pour dissoudre les carbures dans toute la masse de la pièce. Les atomes de carbone de carbure se dissocient et s'insèrent au centre des mailles du réseau du Fer  $\gamma$ .
- c) Nous avons adopté 3 différents milieux de trempe (air, eau, huile).

### 3.2.2 Métallographie optique

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. L'obtention de ces surfaces nécessite une suite des opérations. Dans ce qui, nous donnons le détail de chaque opération.

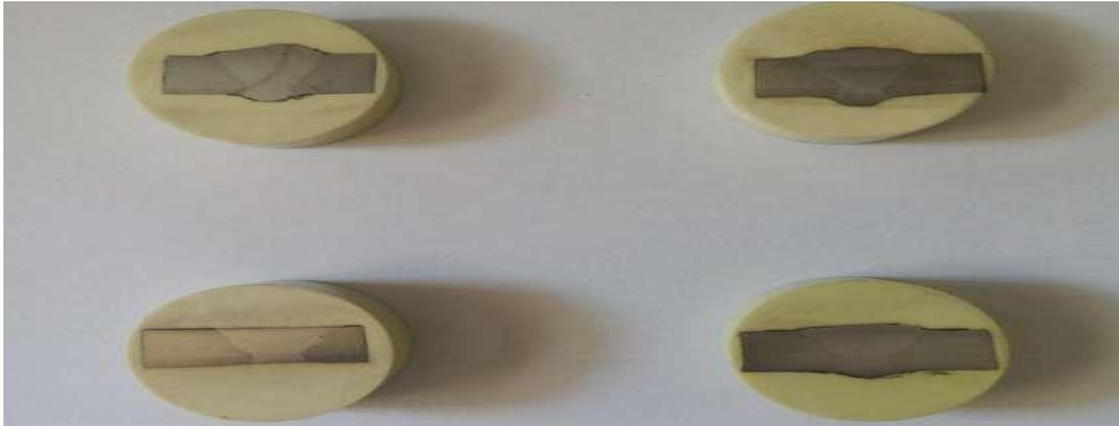
#### ➤ **Enrobage**

Les échantillons sont souvent enrobés dans une enrobeuse pour faciliter leurs manipulations.

**Figure 4.10 :** Enrobeuse au niveau de CRTI..

Pour notre expérience, un enrobage à chaud a été utilisé. Ce procédé nécessite de mise en pression. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine en polyester versé dans

un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel [28].



**Figure 4.11 :** Les échantillons après l'enrobage .

### ➤ Polissage

Après l'enrobage, nous passons les éprouvettes sur une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométries des grains abrasifs en carbure de silicium (du plus gros au plus fin :( 80,180, 220, 320,500, 800, 1000, 1200,2400) qui tournent avec une vitesse de 250 tr/mn.

Cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

Le polissage fin est terminé de finition à répartie sur un feutre fin avec l'addition de la pâte diamantée.

Après chaque polissage les échantillons sont nettoyés à l'éthanol.

L'expérience s'est déroulée au niveau de centre de recherche en technologie industrielle (CRTI), La polisseuse utilisée est représentée dans la figure [28].



**Figure 4.12:** Polisseuse au niveau de CRTI..

### ➤ Attaque chimique

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures. Cette opération donne une différence de couleur entre les différentes zones, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants.

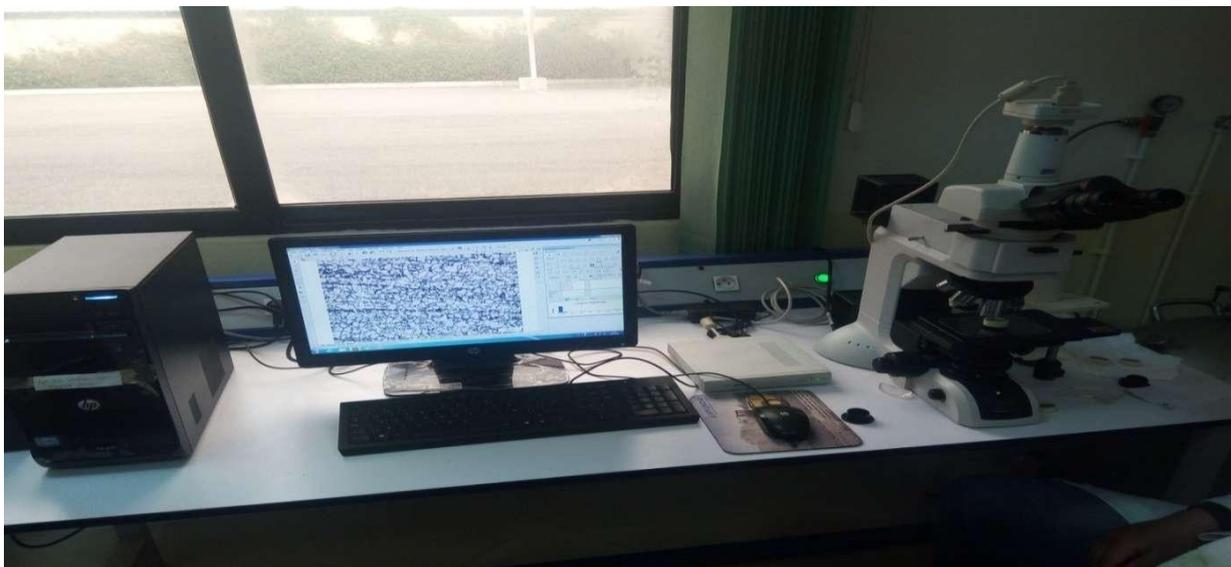
Les deux réactifs chimiques utilisés pour notre acier (acier faiblement allié) est le Nital 4 % (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol). Les échantillons furent immergés durant 10 à 20 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire [28].

### 3.3 Microscopie optique

L'examen métallographique a été effectué au niveau du laboratoire de au centre de recherche en technologie industrielle (CRTI).

L'appareillage utilisé pour l'acquisition des images est un microscope optique équipé d'une caméra numérique reliée à un micro-ordinateur, équipée d'un logiciel installé pour l'acquisition et le traitement des images.

Pour l'observation de l'évolution de la microstructure après chaque réparation dans la ZAT, la zone fondue (ZF), la zone de liaison (ZL) et le métal de base (MB), nous avons fait un balayage de ces zones à trois niveaux parallèles équidistants, en commençant par le plus faible grossissement, tel que 100X, suivi progressivement par de plus élevés pour évaluer les caractéristiques de base de la microstructure [28].



**Figure 4.13:** Microscope optique au niveau de CRTI.

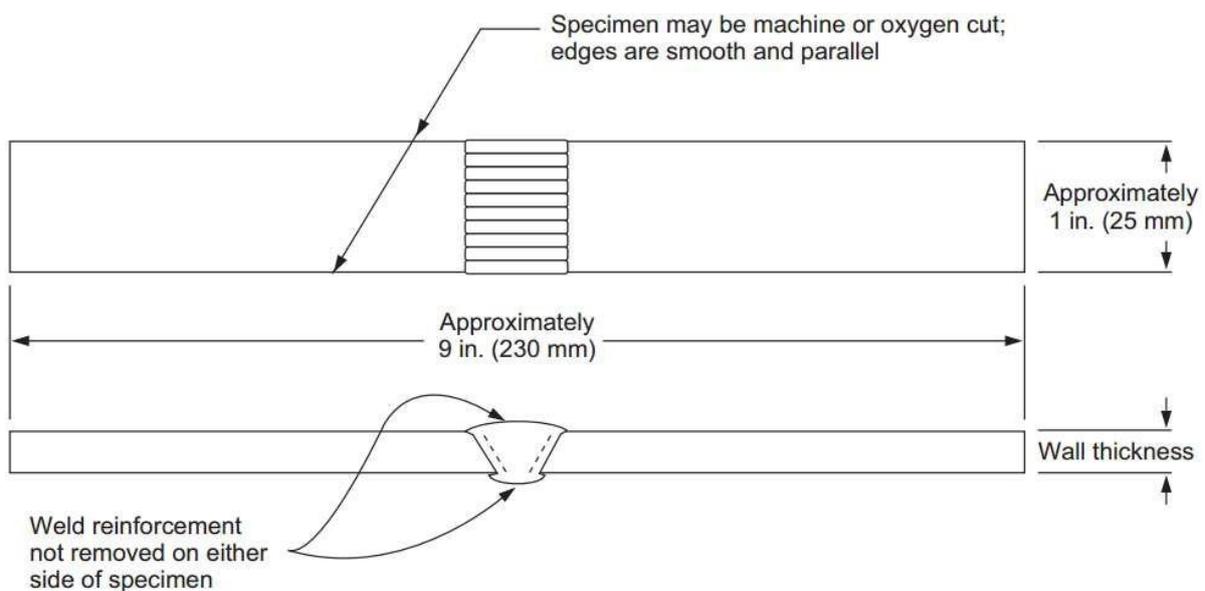
## 4 Caractérisations mécaniques

### 4.1 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 plus part des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique [29].

#### ➤ Eprouvettes

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'essai de traction réalisée selon la norme API Standard 1104. [29]



**Figure 4.14** : Dimension de l'éprouvette de traction [29].

#### ➤ Exécution de l'essai :

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande hydraulique.



Figure 4.15 Machine de traction au niveau de CRTI

## 4.2 Essai de résilience

L'essai de résilience (essai de flexion par choc ou essai de rupture fragile) consiste à mesurer le travail nécessaire pour rompre, à l'aide d'une masse pendulaire, un barreau usiné de forme carré de 1 cm<sup>2</sup> de section et 55 mm de longueur, entaillé en son milieu par une encoche et reposant sur deux appuis [30].

### ➤ Eprouvettes

Les épreuves que l'on va utiliser pour effectuer les essais sont des épreuves normalisées C'est à dire que leurs caractéristiques sont indiquées par une norme. Pour réaliser l'essai, il est nécessaire de faire une entaille normalisée [31].

Quatre épreuves soudées ont subi les essais de résilience réalisés selon la norme EN 10045-2.

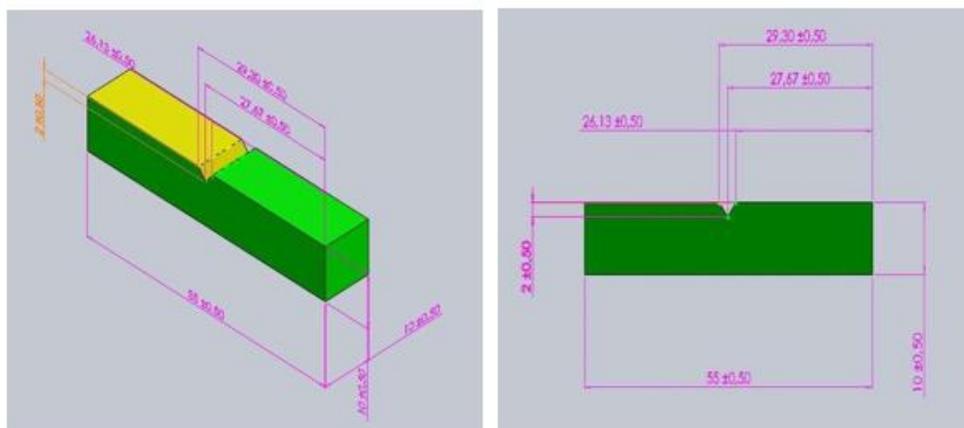


Figure 4.16 : Epreuve de résilience [28].

### ➤ Exécution de l'essai

Un marteau de masse  $m$  est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figure 4.4). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'épreuve repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce

que le marteau atteigne sa position initiale P et on le lâche. Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ  $mgh_0$ ,  $h$  étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte [29].



**Figure 4.17:** Machine d'essais de résilience au niveau de CRTI .

#### .43 Essai de dureté

L'essai de dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques de durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau.

Les essais de dureté consistent à imprimer dans la pièce à tester un pénétrateur en forme de pyramide (Vickers) et à mesurer la diagonale  $d$  de l'empreinte laissée considérée comme une pyramide droite et on relie cette information à la charge appliquée par la formule :

$$H_v = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

$F$  : Niveau de la charge appliquée.

$d$  : Diamètre de l'empreinte [32].

#### ➤ Echantillons

La surface de l'échantillon doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée.

Plus les dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'échantillon doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à l'écrasement. L'épaisseur de l'échantillon doit être suffisante pour qu'aucune trace

d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la – è charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte [30].

#### ➤ Exécution de l'essai

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge. Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell.



Figure 4.18 : Appareils de mesure de dureté au niveau de CRTI .

#### 4.4 Essai de pliage

Cet essai permet de déterminer l'aptitude à la déformation par pliage du joint soudé. Il est décrit dans des normes, des codes de construction ou les cahiers des charges des donneurs d'ordre. Le prélèvement des éprouvettes est le plus souvent effectué dans le sens travers (perpendiculairement à la soudure) pour tester l'aptitude au pliage endroit ou envers du joint soudé mais, lorsque l'épaisseur du matériau est trop importante, ils sont parfois remplacés par des essais de pliage côté.

Les avantages de l'essai de pliage sont que tant l'éprouvette que l'appareillage nécessaire à l'essai sont simples et faciles à mettre en œuvre. [33].

### ➤ Eprouvettes

Sont faciles à réaliser mais n'nécessitent d'être grossièrement polies afin de mettre en évidence la soudure et d'arrondir les arrêtes pour éviter les amorces de rupture. L'essai peut être réalisé à l'atelier.



**Figure 4.19:** Eprouvettes de pliage..



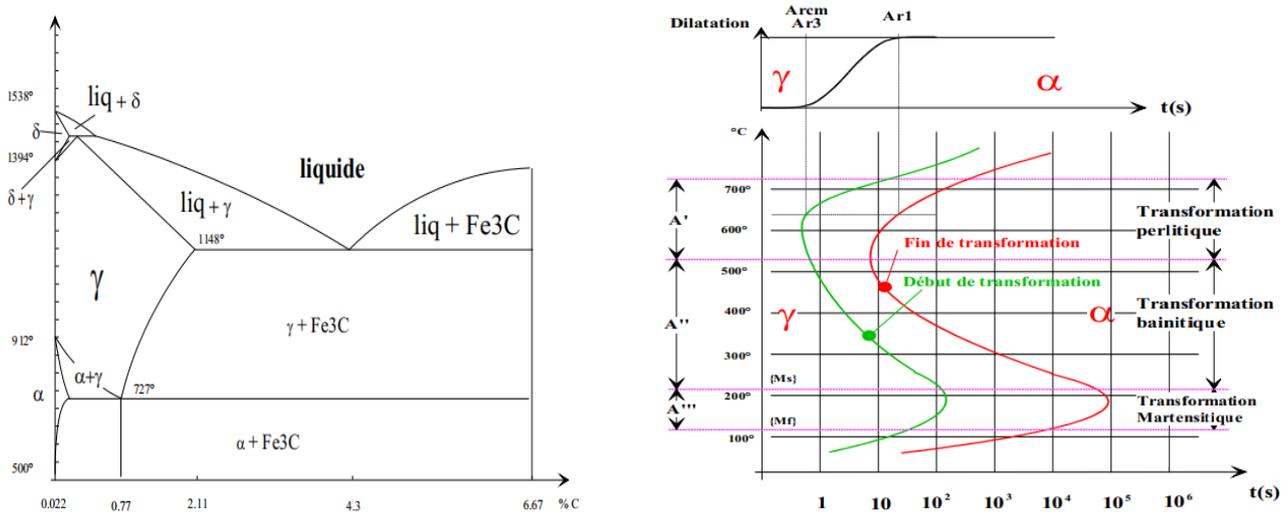
**Figure 4.20:** Machine d'essais de pliage (CRTI)

## 5 Résultats Et Discussion

### 5.1 Evolution de la microstructure

Dans l'acier étudié, Le processus du soudage a donné lieu une multitude de microstructures toutes aussi différentes les unes des autres et dans l'apparition dépend de plusieurs paramètres : le type du procédé utilisé, emplacement de la zone étudiée par rapport au bain de fusion, épaisseur de la pièce et éventuellement de traitement thermique après soudage effectué.

Dans le processus du traitement thermique, La rapidité des trempes à travers les milieux de trempé engendre un déplacement des réseaux cristallins qui va modifier la nature et la proportion des phases à l'équilibre, au-dessus des conditions d'équilibre, des domaines de température dans lesquels se développent les transformations austénitiques, ferritiques et martensitiques ; ce qui ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre et les diagrammes hors équilibre TTT (transformation temps température) pour prévoir la nature exacte des différentes phases aux différentes zones de la soudure. Il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. On se placera dans le cadre des aciers faiblement allié, en examinant le diagramme (Fe-C) en parallèle avec les températures maximales atteintes dans un joint soudé



**Figure 4.21:** Schématisation du diagramme d'équilibre (à gauche) et diagramme TTT (à droite) pour le système binaire Fe-C [28].

Avant le traitement thermique, La microstructure initiale du matériau de base (MB) est ferrito-perlitique, la zone affectée thermiquement (ZAT) se défère dans la forme et le type de la ferrite, elle dépend de emplacement de la zone étudiée par rapport au bain de fusion (zone fondue MF) (tableau IV.1). La ZAT avant traitement est constituée de deux zones : ZAT à gros grains et ZAT à grains fins. La première zone a une microstructure biphasée qui constitue principalement de perlite et de ferrite polygonale à gros grains avec de petite fraction de martensite et de bénite granulaire. On remarque aussi la présence des précipitations grossières des éléments de micro-alliage en comparaison avec les tailles ultrafines habituelles de ces précipitations dans le métal de base. La zone à grains fins adjacente à la zone à gros grains ayant une microstructure de ferrite polygonale à grains fins et la dissolution des précipités des éléments de micro-alliage.

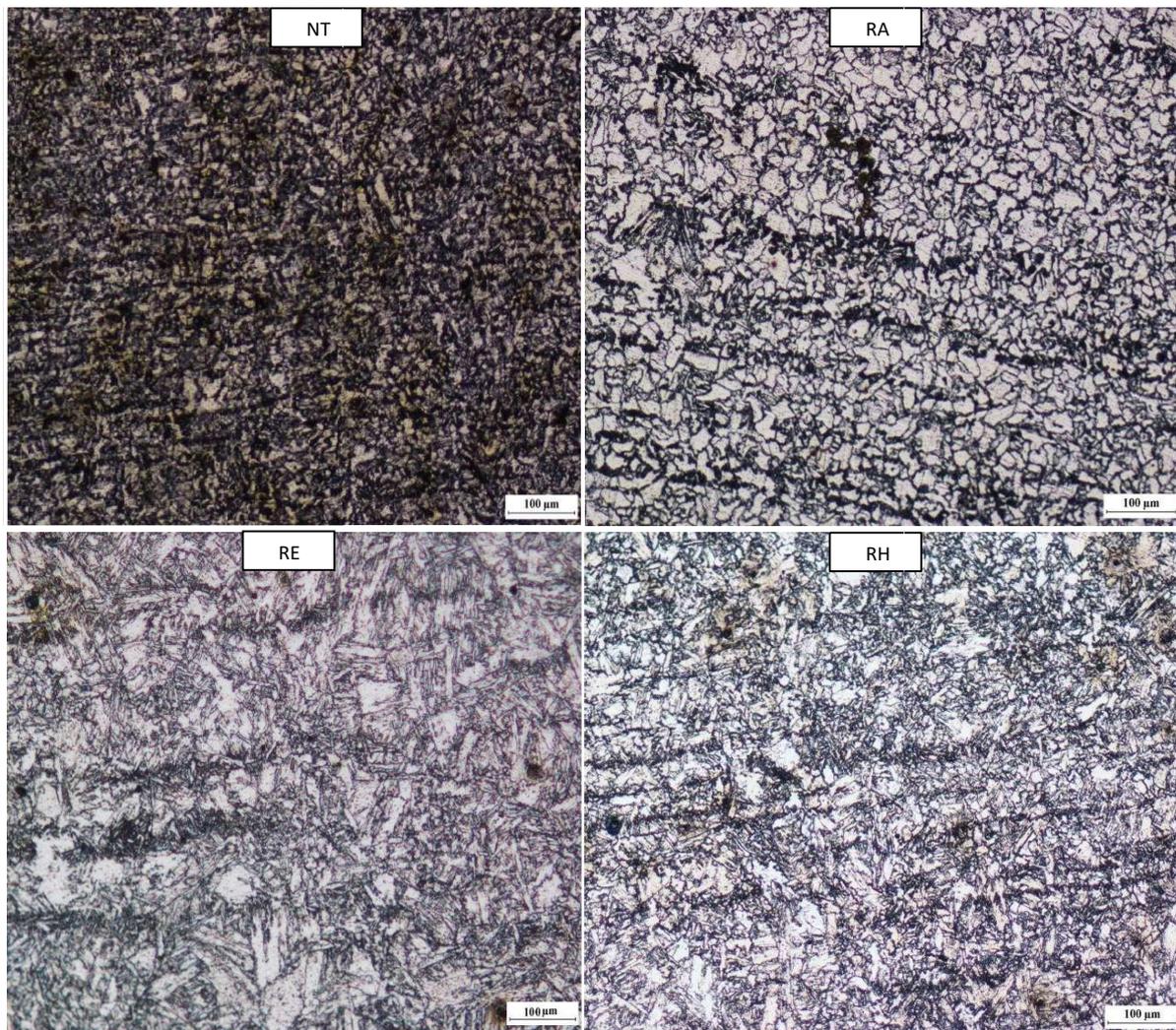
La zone fondue a des multitudes des microstructures. Elle constitue principalement de la ferrite (bandes blanche), des zones perlitiques (en gris), des précipitations des carbures métalliques (en noire), la martensite (des aiguilles) et la bainite (des branches dispersées).

Les micrographies obtenues par un microscope optique sont regroupées dans la (figure iv.20) qui montre les différents changements de structure lors des traitements thermiques de trempe avec différentes milieux. Malgré l'austénitisation (960°C) englobe toutes les zones de la soudure (le mb, zat et zf), ces zones restent distinguées. Ceci peut être expliqué par la différence entre des compositions chimiques des trois zones.

En peut distinguer trois états :

- trempe à l'huile : dans le matériau de base, il s'agit une transformation bainitique, cette transformation se termine avec 70% de bainite car la transformation a eu lieu à une température inférieure à 550°C (voir le diagramme ttt) au final, le métal de base possède une microstructure bainitique.
- trempe à l'eau : cette courbe de refroidissement se situe vraiment à gauche de ttt, ainsi on aboutit directement à la formation de martensite. la transformation de l'austénite en martensite débute à 390°C et la plupart de l'austénite est transformé en martensite. la courbe de refroidissement passe devant la phase de bainite, on a une bonne trempe avec la formation de beaucoup de martensite. au final, le matériau de base possède une microstructure riche en martensite.
- trempe à l'air : la transformation ferritique de l'austénite débute à 690°C. à 580°C, cette transformation se termine, avec environ 50% de l'austénite initiale transformée en ferrite. ensuite débute la transformation en perlite (a+f+c). puis à 390°C, la transformation se termine avec 45% de cémentite formée. il se forme en fin de refroidissement un peu de martensite à 10%. au final, l'acier possède une microstructure multiphasé constitué principalement de : la ferrite, la bainite et de martensite.

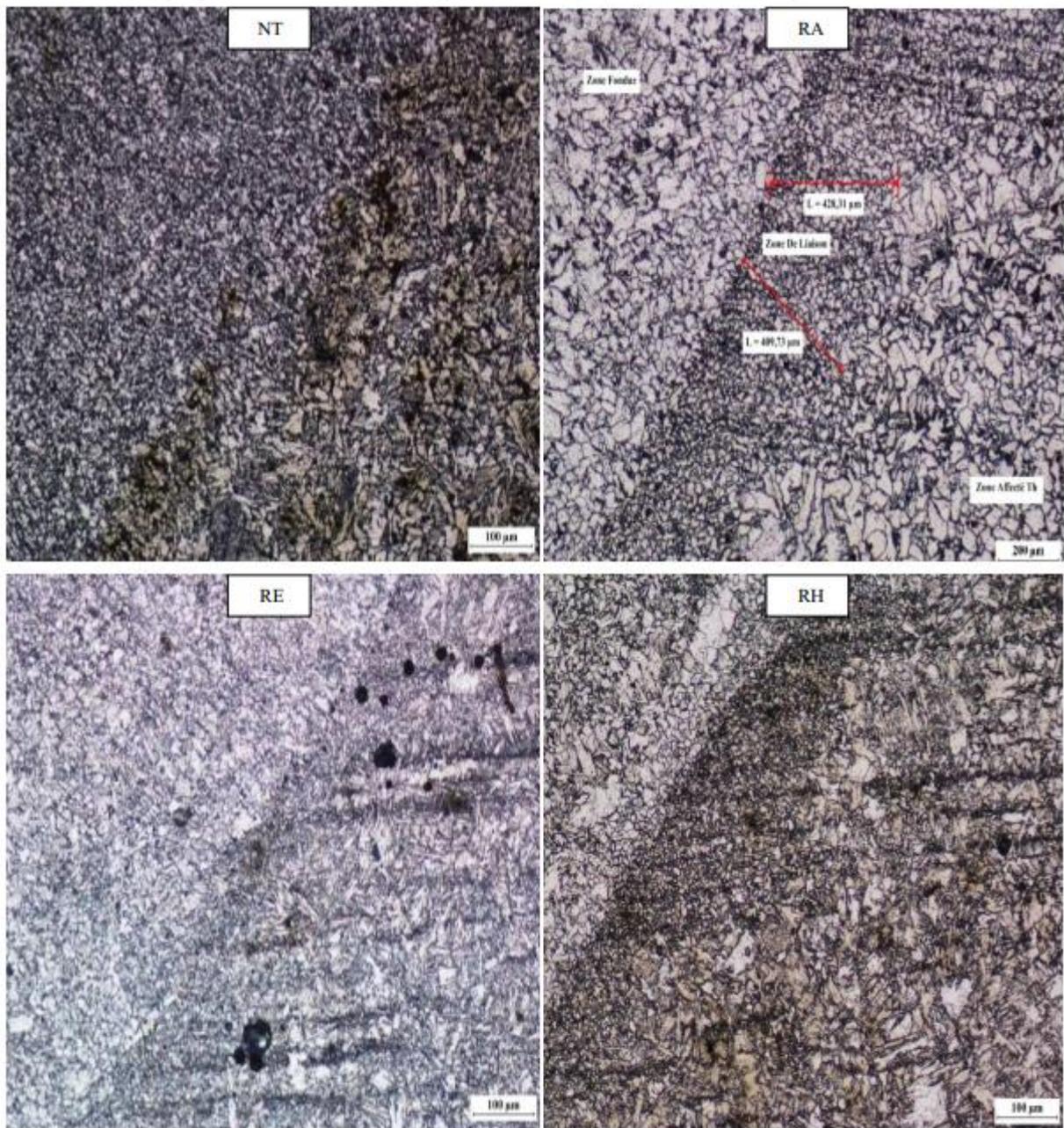
Dans la micrographie suivante nous exprimant la (zat) dans les quatre cas précédent :



**Figure 4.22** les microstructures de la zone affectée thermiquement avant et après traitement (zat).

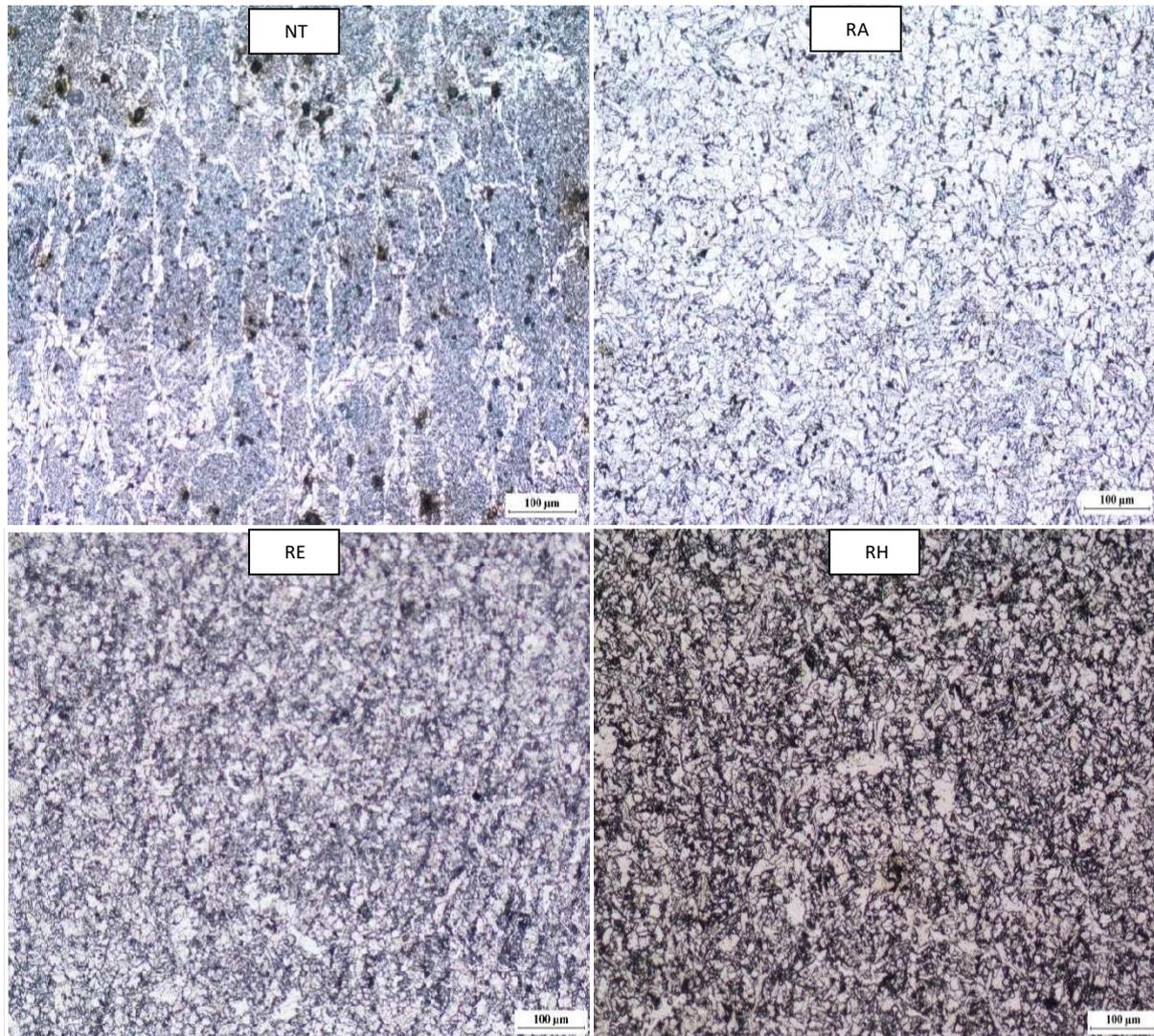
[28]

Dans la micrographie suivante nous exprimant la (zl) dans les 4 cas précédent :



**Figure 4.23** les microstructures des zones de la soudure (zat, zl, zf) [28]

Dans la micrographie suivante nous exprimant la (zf) dans les 4cas précédent :



**Figure 4.24** les microstructures de la zone fondue (ZF) avant et après traitements. [28]

D'autre part, les microstructures du zone fondu traitée et la ZAT traité est proche de celle métal de base traité avec des légères différences, ces différences est provoquer par : la diffusion de carbone a travers la zone de liaison, sachant que le teneur de carbone a un effet direct sur l'apparitions des phases et les précipitations des carbures métalliques, il influe aussi sur la fraction des phases comme de la martensite et la perlite. Dans la zone fondue l'influence des éléments d'addition est primordiale comme Mo qui favorise l'apparition des structures bainitique lors du traitement de trempe.

Dans la fraction de la phase bainitique dans la zone fondue du (RH) est plus grand que celle du matériau de base (RH). Ainsi la fraction de la phase martensitique dans la zonefondue du (RE) est plus grande que celle du matériau de base (RE). Portant l'influence deséléments d'addition est légèrement faible dans (RA) car la cinétique de la trempe est très lentepar rapport (RE) et (RH).

## 5.2 Dureté

Les valeurs de la dureté moyenne mesurées sur les différentes zones du cordon de soudure sont récapitulées dans les courbes suivants :

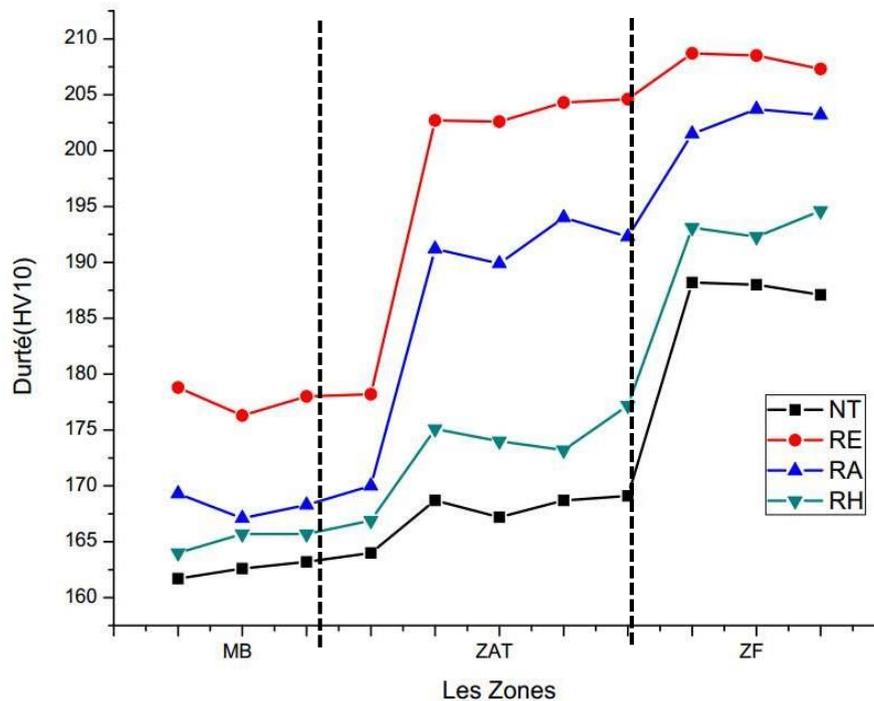


Figure 4.25: les courbes de dureté. [28]

### ➤ Discussion des résultats

A partir des résultats qu'on a obtenus préalablement on a tracés les quatre graphes de dureté. Ainsi, les graphes sont divisés en trois zones selon les trois zones de soudure

A partir de ces graphes de profils de dureté on tire les conclusions suivantes :

- Les échantillons traités subissent une grande augmentation dans toutes les niveaux (Mb, ZAT, ZF) de dureté par rapport l'échantillon (NT).
- On observe dans le graphe (RE) une grande dureté par rapport les autres traitements, cela est relié à la dominance de la phase martensitique dans (RE).
- La dureté dans le graphe (RA) a subi une diminution par rapport les échantillons traités puisqu'il comprend une microstructure combinée principalement de trois phases (ferrite,

bainite, et martensite).

### 5.3 Traction

Pour finaliser la phase de validation du soudage à l'arc électrique, des essais en traction ont été effectués à température ambiante 20°C sur les éprouvettes (pour comparer les caractéristiques mécaniques) en disposant le cordon de soudure perpendiculairement au sens de l'allongement (Figure 4.25). Les caractéristiques conventionnelles sont reportées dans le tableau ci-dessous :

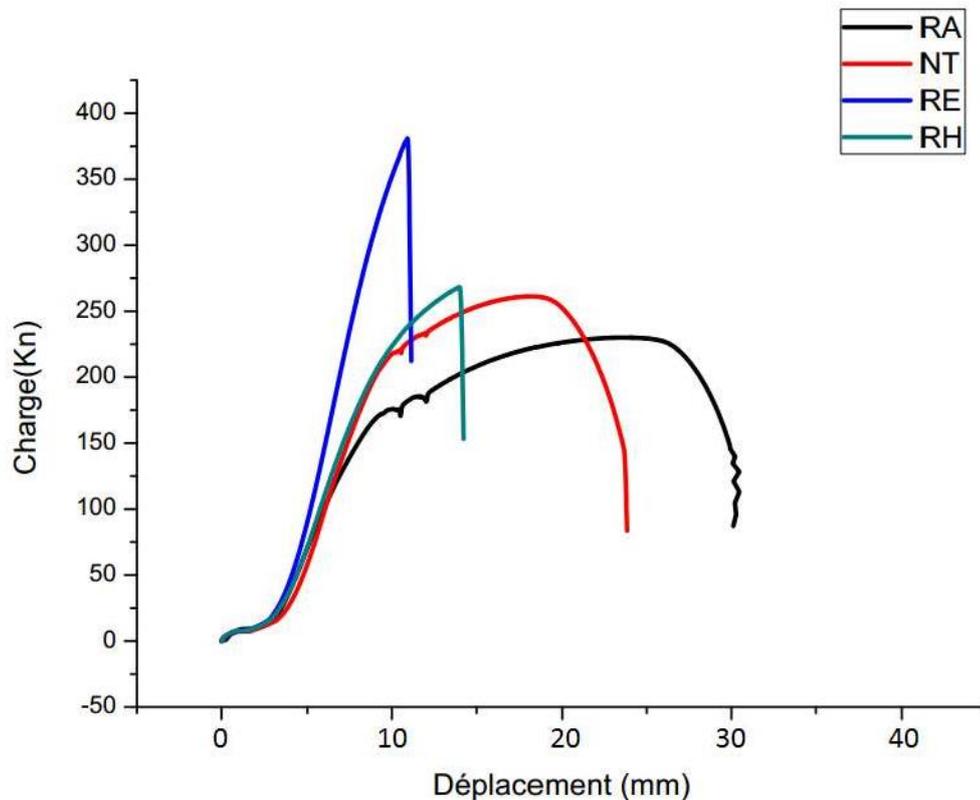


Figure 4.26: Les courbes de traction. [28]

#### ➤ Discussion des résultats

Les résultats des essais des tractions sont représentés par des courbes (Figure 4.25), dont l'allure générale des traitements du trempé laisse apparaître une élévation dans  $R_e$  et  $R_m$  avec une baisse de la déformation totale du traitement par rapport l'état non traité.

La (Figure 4.25) montre bien que les courbes des éprouvettes comportent trois parties :

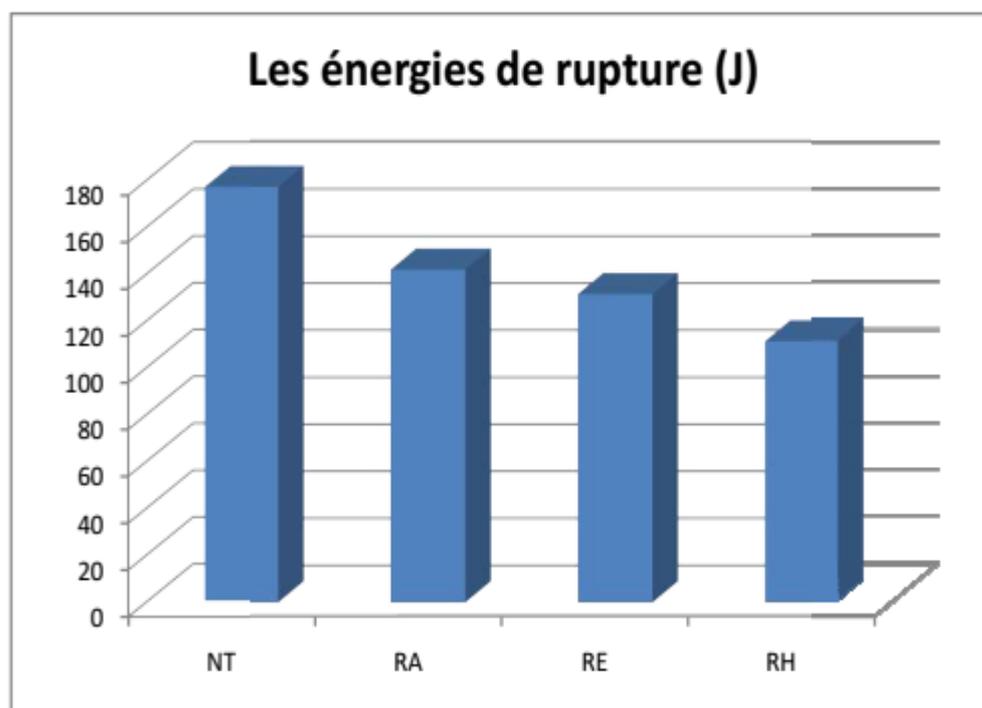
- ❖ Une phase initiale linéaire qui reflète le comportement élastique du matériau.
- ❖ Puis une partie non linéaire de pente plus faible qui traduit la phase plastique homogène.

- ❖ Enfin une décroissance de l'effort au-delà du maximum, qui résulte l'instabilité plastique où la striction apparaît et la rupture de l'éprouvette se produit.
- ❖ Une absence de la phase plastique dans (RE) et (RH) qui est traduit par la présence de la phase martensitique
- ❖ Une chute légère dans l'élasticité des éprouvettes (RE) et (RH), avec une diminution de la résistance maximale  $R_m$  dans (RH) et (RA) où les éprouvettes ont présenté lors du traitement thermique de trempe une fragilité dus à la dureté considérable des deux traitements

Le traitement thermique de trempe à l'aire (RA) ont augmenté la ténacité des éprouvettes (contrainte maximale+ déformation) représentée par l'aire de courbe de traction, ainsi la plasticité des éprouvettes traitées à l'aire est remarquable.

#### 5.4 Résilience

Suivant exprimé l'énergie de rupture pour chaque éprouvette



**Figure 4.27** : Les énergies de rupture exprimées en joule. [28].

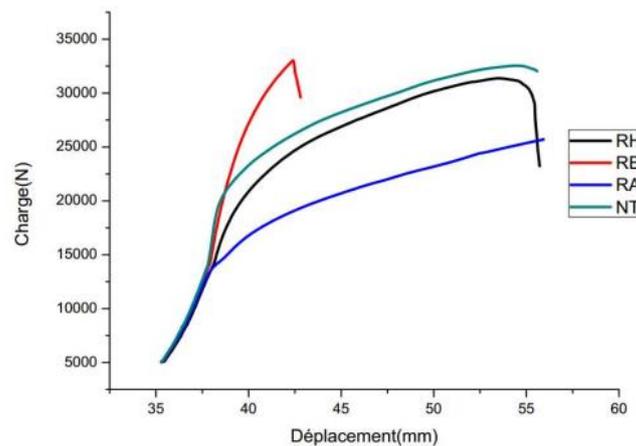
#### ➤ Discussion des résultats

Nos essais de résilience a pour objet de déterminer la résistance des soudures traitées à la rupture sous l'effet d'un choc par l'intermédiaire de l'énergie de rupture (K). Remarquant avec un

essai de résilience (Histogramme) la résistance que l'on vise à étudier ici est un peu commun avec la résistance observée dans un essai de traction statique. Dans l'essai de traction la déformation est graduellement imposée à l'éprouvette. La soudure a ainsi assez de temps pour réagir et s'adapter au changement. En service, notre matériau soudé est souvent soumise à des chocs brutaux. Pour cette situation, les valeurs observées dans un essai de traction ne donnent pas toujours satisfaction. L'échantillon traité à l'aire de trempe avec celle de non traité présente le meilleur comportement au choc conformément à ces capacités de déformation aux essais de résilience statique.

### 5.5 Pliage

L'essai de pliage à été effectué sur 04 éprouvettes extraites de chaque pièce.



**Figure 4.28** : Les courbes de pliage [27].

#### ➤ Discussion des résultats

En fin, au vu des courbes représentant l'effet du traitement de trempe sur les propriétés mécanique de pliage, il apparait clairement qu'une trempe à l'aire (RA) sous une sollicitation de flexion engendre une résistance très importante contre les contraintes de flexion à angle par rapport les autres traitements thermiques. Ainsi elle présente une grande ténacité de flexion et une bonne résistance maximale à la flexion rotative

### **Conclusion Générale**

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du traitement thermique des soudures en acier X70. 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 par SMAW.

Nous nous sommes proposé d'étudier la microstructure, tenue mécanique d'interfaces soudées. Après la réalisation des jonctions moyennant le soudage des pipes en forte épaisseur par faisceau SMAW, en bout à bout, notre travail visait en premier lieu la caractérisation métallurgique des interfaces soudées. L'objectif étant d'expliquer les zones d'hétérogénéité du cordon de soudure qui sont propres à notre procédé. Pour ce faire, la mise en œuvre d'une large gamme de techniques de caractérisation par analyse métallographie optique, profils de dureté Vickers, les essais de traction, les essais de pliage et la résilience a été indispensable. Les premiers travaux menés consolidés par ces différentes analyses ont confirmé un certains nombre de résultats, à savoir

- L'analyse métallographique des différents cordons réalisés a conduit à des micrographies très défères. L'étude métallographique des cordons de soudure a définit trois zones distinctes: la zone fondue (ZF), la zone affectée thermiquement (ZAT) et le matériau de base (MB).
- La trempe utilisée dans notre étude est un traitement thermique pour durcir la soudure. Elle comporte deux étapes : une phase d'austénitisation qui permet de mettre en solution solide le carbone et les autres éléments de l'alliage, une phase de refroidissement rapide qui entraîne la formation de martensite et de bainite, structures confèrent le durcissement microstructural.
- Après, le traitement thermique de trempe, la microstructure des soudures observée est presque homogène pour le même traitement. La morphologie aiguillée est obtenue par le refroidissement rapide de la soudure dans l'eau. En effet, le trempé à l'eau induit des vitesses de refroidissements élevées qui conduisent à la transformation martensitique morphologie aciculaire qui présente des aiguilles très fine en raison des vitesses de refroidissement très élevées.

Dans la Trempe à l'huile, il s'agit une transformation bainitique, cette transformation se termine avec 70 % de bainite car la transformation a eu lieu a une tmepérature inférieur à 550°C (selon le diagramme TTT)

➤ Dans la Trempe à l'air : La transformation ferritique de l'austénite débute à 690°C. A 580°C, cette transformation se termine, avec environ 50% de l'austénite initiale transformée en ferrite. Ensuite débute la transformation en perlite (A+F+C). Puis à 390°C, la transformation se termine avec 45% de cémentite formée. Il se forme en fin de refroidissement un peu de martensite à 10%. Au final, l'acier possède une microstructure multiphase constituée principalement de : la ferrite, la bainite et de martensite.

➤ Les micrographies des échantillons soudés prises pour différentes zones montre que les traitements thermiques de trempe à différents milieux a une très grande influence sur la nature et la morphologie des phases métalliques. Par conséquent la fiabilité, d'une pièce traitée va prendre des allures différentes que celle du cas non traité, cette constatation se base sur les essais mécaniques que nous avons appliqués (dureté, traction, résilience, et pliage), qui montrent que l'effet de traitements thermiques est plus que bénéfique dans le cas de trempe à l'air, car il a permis de combiner les caractéristiques bénéfiques des trois phases (ferrite, bainite, et martensite) sur le comportement mécanique (dureté, traction, résilience, et pliage), et par conséquent de réduire considérablement le taux de dégradation des soudures en service à tous les niveaux des zones (MB) (ZF) et (ZAT)

## Les références

- [1] A. Debabi, «Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique " Mémoire de Master,» *Université Mohamed Boudiaf, M'SILA*, 2018.
- [2] B. Maamache et al, «Mechanical and metallurgical characterization of HSLA X70 welded pipeline steel subjected to successive repairs,» *Acta Metall. Sin.*, 2016.
- [3] M. H. Meliani, «Corrosion de fectassessment on pipe using limit analysis and notch fracture mechanics,» *Engineering Failure Analysis*, 2011.
- [4] H.M. Tawancy, et al,, « Analysis of corroded elbow section of carbon steel piping system of oil-gassepara torves sel,» *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2013.
- [5] M. F. Benlamnouar, et al, ", «Comportement mécanique des soudures SMAW ",» chez *3ème Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Matériaux et Alliages*, Oran, 2012.
- [6] GUITOUNZAHIA, «Caractérisationmécaniqued'unassemblageàclinenacierinoxydable soudé par le procédé MAG,» *mémoire master 2, Université de Technologie Tlemcen*, 2018.
- [7] R.BLONDEAU, «procédésetapplicationindustrielledusoudage,» *LAVOISIER*, 2001.
- [8] «brochure Brasage et Soudobrasage du Cuivre et de ses Alliages,» *publiée par le Centre d'Information du Cuivre, boulevard Berthier.Paris..*
- [9] a. BELABED, «Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue lzs soudures d'angles,» *universite de telemcen*, 2017.

- [10] «soudage,» [En ligne]. Available: <http://www.lyc-de-gaulle-pulversheim.ac-strasbourg.frconsulter>. [Accès le 5 03 2021].
- [11] H. Granjon, *Bases métallurgiques du soudage*, Eyroles, Paris, 1977.
- [12] B. Salheddine, «Effets des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des assemblages soudés,» *memoire master universite Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –*, 2019.
- [13] «soudage,» [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage\\_TIG](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG). [Accès le 09 03 2021].
- [14] ARFAOUI Ali, CHAKER Med Amir, «"Matériaux Métalliques",» *ISSET Kasserine*, 20220.
- [15] M. CHRISTOPHE, « le soudage Tungstène Inert Gas (tig),» *centre de ressources des métiers de l'automobile, France,2007*, 2007.
- [16] «soudage,» [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage\\_TIG](https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG). [Accès le 15 03 2021].
- [17] L.P.Astrid,, « Rupture par clivage de microstructure d'aciers bainitiques btenués en conditions de soudag,» *thèse de doctorat, ENS des Mines de Paris,,* 2001.
- [18] A.COMPA, «Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens,,» *FOCHER* , 1971.
- [19] P.HAUSILD, «. Transition ductile-fragile dans un acier faiblement allié,» *Thèse de doctorat, Ecole centrale de paris*, 2002.
- [20] A.-S. BILAT, *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 2007.
- [21] Z. MOUSSA, «INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LA RUPTURE FRAGILE DES CONSTRUCTIONS SOUDEES CAS DES SOUDURES EPAISSES,» *These de doctorat,UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE*, 2009.
- [22] H.GRANJON., *Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses*.
- [23] C.LEYMONIE , R.BOUVEROT . , «Contribution à l'étude des traitements thermiques après».
- [24] C.BOUHELIER, « Traitements thermiques des constructions chaudronnées».
- [25] C.CHAUSSIN, *Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques Dunod* 1981.
- [26] B.CHASSIGNOLE, «Influence de la structure métallographique des soudures en acier».
- [27] L.LAICHE, *Etude mécanique et métallurgique dans les joints de soudure sur le monobloc des*.
- [28] «Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique,» *Mémoire de master universite mohamed boudiaf msila*, 2018.

- [29] «API Standard 1104, Twenty-first edition, September 2013».
- [30] «cours-proprietes-des-materiaux,» <https://www.technologuepro.com/cours-proprietes-des-materiaux/chapitre-1-caracterisation-mecanique-des-materiaux.pdf>.
- [31] « <http://www.cours-et-exercices.com/2016/04/essai-de-resilience-les-essais.html>.».
- [32] S. OULBANI, «Influence de la fatigue mécanique sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé en acier inoxydable austénitique 316L",» *Mémoire de Magister, Université de Boumerdes*, 2008.
- [33] D. François, «Essais Mécaniques des Métaux- Détermination des lois de Comportement,» *Techniques de l'Ingénieur*, 2004.
- [34] H.GRANJON., *Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage*.