

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE  
N° : FAB-02



FILIERE : GENIE MECANIQUE  
OPTION : FABRICATION MECANIQUE  
ET PRODUCTIVE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme Master Académique**

**Par: DEBABI ADIL  
FETITA MOHAMMED NADIR**

**Intitulé du Sujet :**

**Etude des caractéristiques mécaniques d'un  
joint de soudure après application d'un  
traitement thermique**

**Soutenu le : 19 / 06 / 2018**

Encadré par : Dr. Zaoui Moussa

Université Mohamed Boudiaf – M'sila

Co Encadreur : Dr. Benlamnouar M<sup>ed</sup> Farid

Chargée de Recherche CRTI Chéraga

*Devant le jury composé de :*

Président Mr. Bouabdallah

Université Mohamed Boudiaf – M'sila

Examineurs Mr. N. Menasri

Université Mohamed Boudiaf – M'sila

Examineurs Mr. A. El Hadi

Université Mohamed Boudiaf – M'sila

**Année universitaire : 2017 / 2018**

## **Remerciements**

*Mes remerciements vont tout d'abord à notre Dieu pour la santé et le courage qu'il m'a donnés pour terminer ce modeste travail.*

*Je remercie profondément mes très chers parents qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour ma réussite, je souhaite que Dieu les protège et leur donne la santé et la vigueur.*

*Je tiens à remercier **Dr. ZAOUI MOUSSA** mon directeur de thèse et chargé de cours au département du génie mécanique et ce pour m'avoir dirigé dans mon travail et m'a fait profiter de ses connaissances qui m'ont été d'une aide appréciable.*

*Je souhaite également transmettre mes remerciements à **Mr. BENLAMNOUAR MOHAMMED FARID**, du centre de recherche pour m'avoir aidé à réussir et a accepté de lire, d'examiner et de juger ce mémoire ainsi que l'ensemble des employés de CRTI.*

*Un grand merci également au personnel du laboratoire (CRTI) pour leur gentillesse et leur disponibilité et pour leurs aides et conseils appréciés pour la réalisation des essais. Je citerai notamment Idir et Nabil, Djamel et Bahia, Abderrazak et Hani.*

*Je remercie toute ma famille (mon frère Krimo, ma sœur Manel et ma sœur Imen et son époux « Fayçal») pour leurs encouragements, et mes grands parents pour leurs prières.*

*Je tiens également à remercier mes amis et collègues A. Khaled, C. Abdelkader, K. Mohammed, M. Med Bachir et son fils M. Salah pour leurs aides et soutiens permanents.*

*J'adresse aussi mes remerciements à tous mes amis de l'université Pour leur patience et leur soutien tout au long des périodes d'étude.*

*Merci à tous ceux qui ont été présents et participants dans ce mémoire, et je m'excuse pour ceux que je n'ai pas cités!*

## **Remerciements**

*Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans l'aide de " الله ", le tout puissant, tout remercié pour m'avoir donné la santé, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles à travers mon chemin d'étude.*

*Je remercie ma très chère mère qui me donnée beaucoup de courage pour ma réussite.*

*J'adresse mes remerciements a monsieur **Dr. ZAOUI MOUSSA** mon encadreur, pour ses remarques et conseils qu'ils m'aidé beaucoup dans ce travail.*

*Je remercie au fond de cœur, **Mr. BENLAMNOUAR MOHAMMED FARID**, qui malgré ses responsabilités a bien voulu s'intéresser a notre travail, et le personnel du laboratoire (CRTI) pour leur gentillesse et leur disponibilité et pour leurs aides et conseils appréciés pour la réalisation des essais. Je citerai notamment Idir et Nabil, Djamel et Bahia, Abderrazak et Hani.*

*Je remercie toute ma famille (mes frère et mes sœurs, mon oncle, ma grand mère)*

*Je tiens également à remercier mes amis et collègues : D, lakhdar ,M, sohaib et H,( idriss, aissa, khair eddine , nouh).*

*J'adresse aussi mes remerciements à tous mes amis de l'université Pour leur patience et leur soutien tout au long des périodes d'étude.*

*Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail, et mes excuses à tous ceux que je n'aurais pas cité.*

**ADIL**

## 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 بطريقة SMAW, وهذه الأخيرة تنتج عنها فوارق ميكانيكية كبيرة بين مختلف أجزاء اللحام وأيضا إجهادات غير مرغوب فيها. وهنا تكمن دراستنا لتكميل 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 proprieties of ferrite-perlitic X70 steel after welding.

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

Introduction Générale : .....	1
-------------------------------	---

### Chapitre I : Généralité sur le soudage et la métallurgie

I.1 Introduction: .....	3
I.2 Définition de soudage : .....	4
I.3 Les procédés de soudage : .....	5
I.3.1 Soudage par pression : .....	7
I.3.2 Soudage par fusion : .....	7
A. Soudage a l'arc électrique : .....	8
B. Soudage a l'arc électrique sous gaz de protection (TIG) : .....	8
C. Soudage sous protection gazeuse MIG ou MAG : .....	9
D. Soudage avec les électrodes enrobées : .....	10
I.5 La Soudabilité : .....	12
I.6 Les Aciers : .....	13
I.7 Les Aciers HSLA : .....	14
Aciers résistants à la corrosion : .....	14
Aciers lamines a structure perlitique : .....	14
Aciers à ferrite aciculaire : .....	14
Aciers dual-phase : .....	15
Aciers a forme d'inclusion contrôle : .....	15
Aciers a ferrito-perlitique : .....	15

### Chapitre II: Etude thermique et métallurgique de soudage

II.1 Introduction : .....	16
II.1.1 Rôle de la métallurgie : .....	16
II.1.2. Rôle de la métallurgie du soudage : .....	16
II.2 Comprendre le comportement métallurgique : .....	17
II.3 Caractères généraux de l'opération de soudage : .....	18
II.3.1 Aspect thermique : .....	18
II.3.1.1 Cycle thermique du soudage mono passe: .....	19
II.3.1.2 Cycle thermique du soudage multi passes : .....	21
II.3.2 Aspect chimique : .....	22
II.3.3 Aspect thermomécanique : .....	24

II.3.4 Aspect constructif :	24
II.4 Types de joints :	25
II.4.1 Généralités	25
II.4.2 Préparation des joints :	26
II.4.3 Méthodes de réalisation d'un joint soudé :	26

### Chapitre III: Les traitements thermique appliqué aux soudures

III.1 Introduction :	31
III.2 Cycle d'un traitement thermique :	32
III.2.1 Chauffage des pièces :	32
III.2.2 Refroidissement des pièces :	34
III.3 Diagramme d'équilibre :	35
III.3.1 Le diagramme d'équilibre fer-carbone :	35
III.4 TRAITEMENTS THERMIQUES DES SOUDURES :	36
III.4.1 Classification selon l'objet :	36
III.4.2 Modes de mise en œuvre :	37
A) Traitement global :	37
B) Traitement local simultané :	37
III.4.3 Gammes des traitements thermiques :	38
III.4.3.1 Le recuit :	38
a) Le recuit d'adoucissement :	40
b) Recuit de normalisation :	40
c) Le recuit de détente :	41
d) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :	41
III.4.3.2 La Trempe :	42
➤ Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe :	43
➤ Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations de phases :	43
➤ Choix du milieu de trempe :	43
III.4.3.3 Le revenu :	44
a) Revenu de relaxation ou de détente :	45
b) Revenu de structure ou classique :	45
c) Revenu de durcissement :	45
➤ Comportement des caractéristiques mécaniques après traitement thermiques :	46

EN résumée : .....	46
III.4.3.3 La normalisation : .....	47
Conclusion : .....	48

#### Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1 Introduction : .....	49
IV.2 Les matériaux utilisés : .....	49
➤ Métal de base : .....	49
➤ Composition chimique : .....	49
IV.3 Procédure de soudage : .....	50
IV.3.1 Préparation des échantillons : .....	50
Les paramètres de soudage : .....	50
IV.3.2 Découpage des Eprouvettes : .....	51
IV.3.3 Traitement Thermique : .....	52
IV.3.4 Métallographie Optique : .....	53
➤ Enrobage : .....	53
➤ Polissage : .....	54
➤ Attaque Chimique : .....	55
IV.3.5 Microscopie Optique : .....	55
IV.4 Caractérisation Mécaniques : .....	56
IV.4.1 Essai de Traction : .....	56
IV.4.2 Essai de Résilience : .....	57
IV.4.3 Essai de Dureté : .....	58
IV.4.4 Essai de Pliage : .....	60
IV.5 Résultats Et Discussion .....	61
IV.5.1 L'évolution de la Microstructure: .....	61
IV.5.2 La dureté : .....	67
IV.5.3 Traction : .....	68
IV.5.4 La résilience : .....	69
IV.5.5 le pliage : .....	70
Conclusion Générale : .....	71

**Liste des abréviations**

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.

$\sigma_{max}$  : Contrainte maximale.

$\sigma_{min}$  : Contrainte minimale.

SMAW : Procédé de soudage a l'arc électrique.

$\gamma$  : Phase austénitique.

$\alpha$  : Phase ferritique.

$\varepsilon$  : Phase martensitique.

E : Module d' Young du matériau.

Rm : La contrainte maximale a la rupture.

Re : La contrainte élastique.

HSLA : Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique.

TTT : transformation temps température.

Hv : dureté Vickers.

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le transport pétrolière et gazière s'impose depuis les années trente, reconnu comme le moyen le plus sûr et économique, il se développe d'avantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie et l'apparition de nouveaux consommateurs d'hydrocarbures sur le marché. L'ouverture de nouveaux champs de production a exigé l'expansion, l'entretien et le développement des parcs des pipelines qui se feront en fonction des augmentations des prix d'hydrocarbures, des tubes en acier et en fonction des progrès technologiques en construction et en soudage des pipelines.

Les procédés de soudage conduisent à des modifications des microstructures et induisent des contraintes et distorsions résiduelles jouant un rôle important sur la tenue mécanique des assemblages. Le soudage présente alors deux grandes familles de problématiques :

■ **Métallurgiques :**

L'opération de soudage induit des modifications métallurgiques au niveau du joint soudé par son apport énergétique et parfois par l'apport de métal. La réalisation d'un ensemble soudé passe en général par la fusion locale des jonctions à assembler. L'existence même d'une zone fondue est à l'origine de modifications radicales de l'état interne de l'assemblage. La solidification de cette zone produit une microstructure particulière, distincte de l'état initial. Ces modifications vont affecter les microstructures de la zone fondue et des zones affectées thermiquement.

■ **Mécaniques :**

D'autre part, la zone affectée thermiquement appelée ZAT, siège de modification métallurgique, peut induire à des fragilités, des baisses de résistance mécanique, des manques de ductilité... Les modifications métallurgiques influent sur la tenue mécanique du joint soudé.

Du fait, ce dernier est soumis à diverses problématiques résultantes qui sont:

- Fragilisation par l'hydrogène: phénomène de fissuration à froid.
- Apparition de fissurations à chaud (liquation) en cours de solidification : retassures et fissurations inter granulaires.
- Tenue à la corrosion différente du métal de base: essentiellement due aux phénomènes de ségrégation.

Sous l'impulsion de l'industrie, un grand nombre de recherches destinées à prévoir les structures métallurgiques et à optimiser le mode opératoire de l'opération de soudage ont été conduites.

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 une revue bibliographique ayant trait à la généralité sur le soudage et la métallurgie. Dans le second chapitre on a présenté de façon succincte les défauts de soudage.

Nous entamons le troisième chapitre, par une partie consacrée au traitement thermique appliqué aux soudures (généralités, différents types des traitements, conditions, et application).

Le dernier chapitre est scindé en deux parties. En premier lieu, nous avons effectué une 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 microdureté 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 la présente étude clôt ce mémoire.

# **CHAPITRE 1**

**Généralité sur le**

**Soudage et la**

**Métallurgie**

## I.1 Introduction:

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

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

L'intérêt de la connaissance métallurgique de l'opération de soudage est de permettre l'interprétation aussi quantitative que possible des phénomènes métallurgiques que cette opération engendre, et par suite de prévoir ces phénomènes pour en tenir compte dans le choix du métal de base, des procédés et des modes opératoires [1].

Le soudage est né à la fin du 19ème siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique oxyacétylénique, puis avec celles du soudage à l'arc et du soudage par résistance.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au chalumeau oxyacétylénique, qui a rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout en USA et en Angleterre). L'introduction massive de Soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile.

Parmi les nouveaux procédés on peut citer :

- le soudage avec électrode de tungstène : 1924 – USA.
- le soudage sous flux : 1935 – USA.
- le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.
- le soudage sous la protection gazeuse : 1950 –1960.
- le soudage avec fils fourrés : 1950 –1960.
- le soudage par explosion : 1950-1960.
- le soudage par bombardement électronique : 1956 – France.
- le soudage par laser : 1965 [2].

## I.2 Définition de soudage :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, par intervention de pression, ou par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est de même ordre de grandeur que celle du matériau de base [3].

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

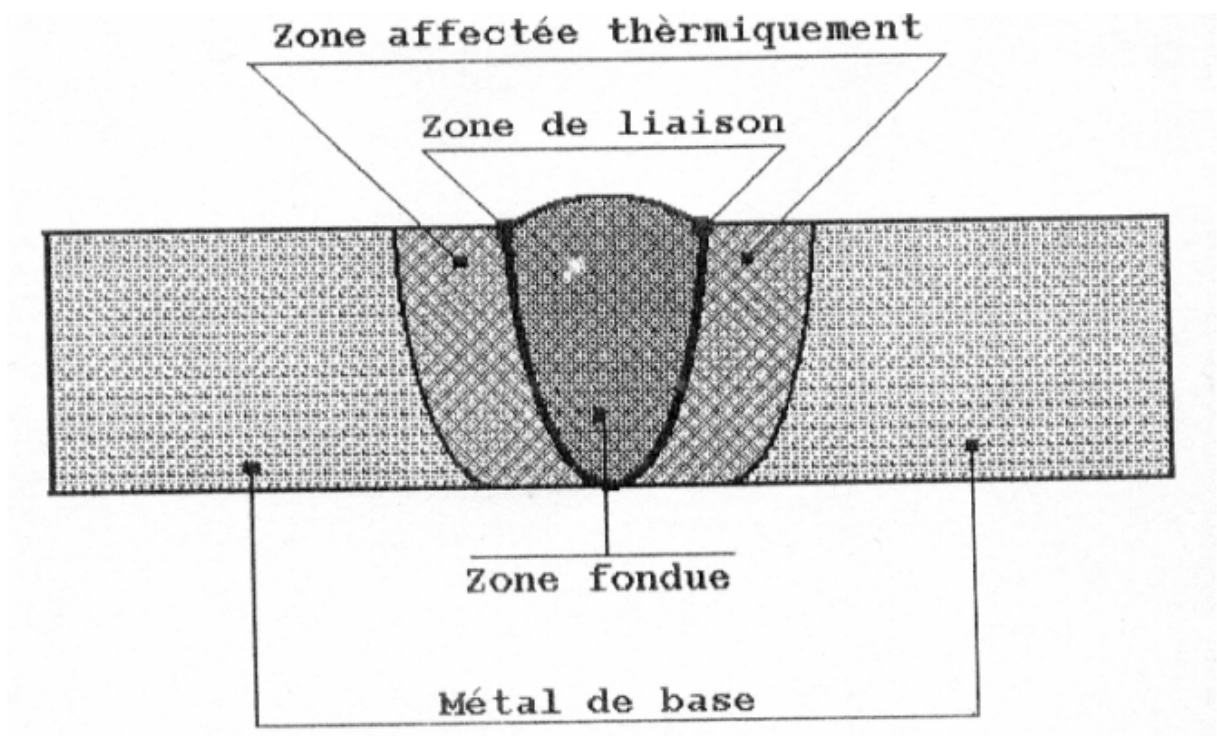


Figure I.01 : les zones de la soudure

➤ **Métal de base (MB) :**

Le métal de base, est la partie l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.

➤ **Zone affectée thermiquement (ZAT) :**

La zone affectée thermiquement est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.

➤ **Zone de liaison (ZL) :**

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.

➤ **Zone fondue (ZF) :**

Elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification. [4]

### **I.3 procédés de soudage :**

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

- Le type d'énergie mise en œuvre.
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur).
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide).
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de réaliser [4].

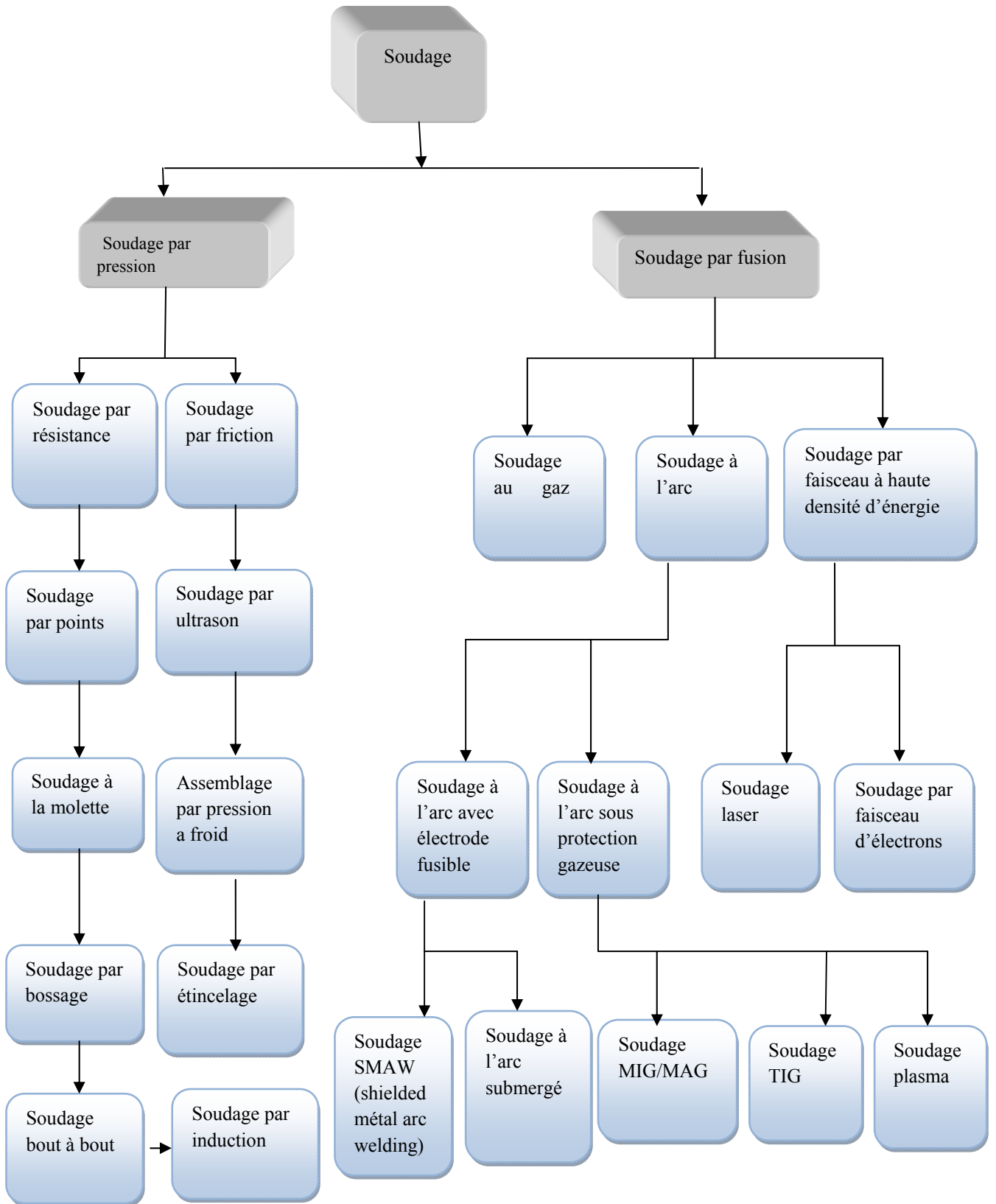


Figure I.02 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

- D'une manière très globale on classe les procédés de soudage des aciers sous deux importantes catégories :

### I.3.1 Soudage par pression :

Les pièces à assembler sont maintenues en contact par un effort de compression puis soudées par recouvrement ou bout à bout sans métal d'apport. La fusion est provoquée par effet Joule : courant de forte intensité ( $I > 2000 \text{ A}$ ) sous basse tension. Après coupure du courant, l'effort de compression «forge» la soudure.

De nombreux procédés de soudure par résistance existent, nous allons voir le plus caractéristiques : le soudage par points. Très utilisé en grande et petite série, rapide, il est réalisé entre deux électrodes. La fusion se produit à la frontière entre les deux pièces à souder.

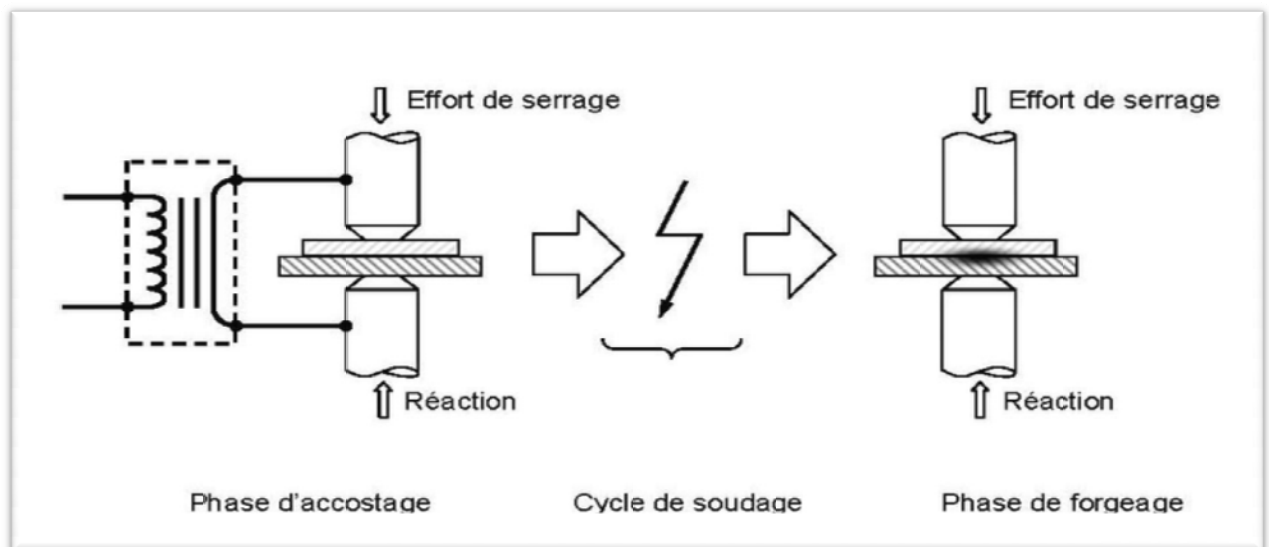


Figure I.03 : Principe de soudage par pression [5].

### I.3.2 Soudage par fusion :

Dans cette classe l'assemblage se fait par la fusion locale du métal. Cette fusion est assurée par les différents types d'énergie électriques ou chimique...

Les principaux procédés contenus dans cette catégorie sont :

- Soudage à l'arc électrique.
- Soudage à l'arc sous gaz de protection.
- Soudage par jet de plasma.
- Soudage sous flux [6].

### **A. Soudage a l'arc électrique :**

On appelle arc de soudage une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeurs ionisé entre deux électrodes et qui est caractérisée par une densité de courant élevée et par une faible différence de potentiel.

Par une décharge électrique on entend le passage du courant électrique à travers un milieu gazeux. Il ya plusieurs formes ou types de décharges électrique : en arc, à lueur, par étincelles, décharge orageuse (éclair) et autre elles par leurs durée, tension, intensité de courant et autres paramètres [7].

### **B. Soudage a l'arc électrique sous gaz de protection (TIG) :**

Procédé de soudage mis au point aux Etats-Unis. Il s'apparente au soudage à l'arc, mais en lui apportant des améliorations conséquentes en matière de facilité de mise en œuvre et de qualité de soudure.

Après le soudage à l'arc électrique et électrode enrobée, c'est le procédé le plus répandu. La chaleur nécessaire à créer la soudure est apportée par un arc électrique. Cet arc électrique est transmis au métal de base par une électrode en tungstène et le bain de soudure est protégé par un flux de gaz inerte.

L'arc électrique généré est stable, précis, capable de souder des métaux très réactifs comme l'Aluminium ou le Titane.

La soudure se fait sous protection de gaz inerte (ne présentant pas de danger, pas de risque explosif)

#### **➤ Différents types de gaz utilises :**

- Argon pour l'acier
- Argon- Hélium (mélange binaire) pour l'aluminium
- Argon- Hélium- Oxygène [7].

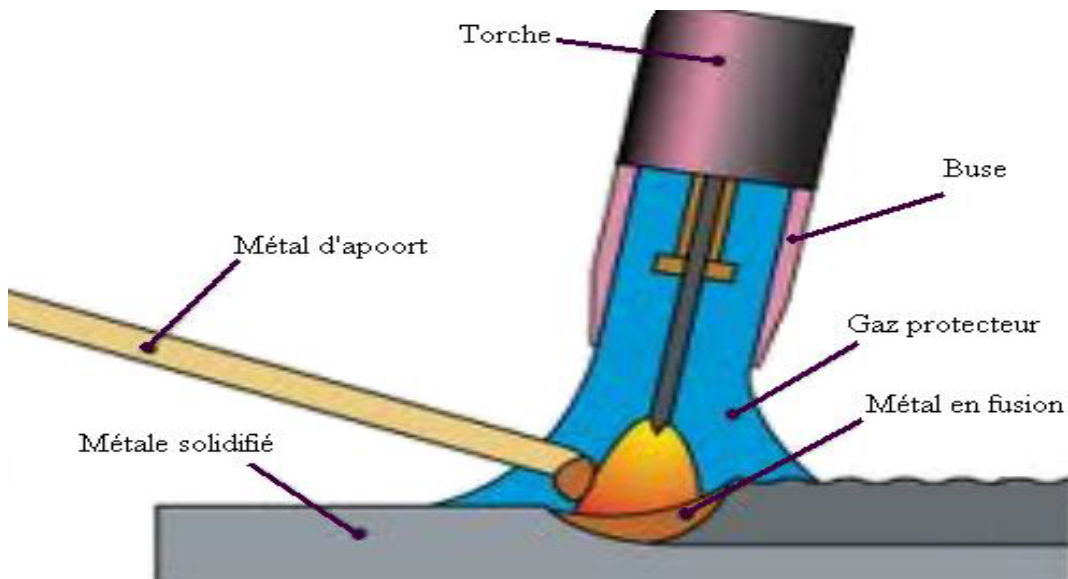


Figure I.04 : Principe de soudage TIG.

### C. Soudage sous protection gazeuse MIG ou MAG :

L'arc est protégé entre un fil consommable et les bords de la pièce à souder. Le fil en fusion et le bain de soudure est protégé de l'oxydation de l'air par un flux de gaz inerte (le procédé se dénomme alors M.I.G= métal inerte gaz) ou actif (procédé M.A.G= métal active gaz). Le déroulement du fil à vitesse constant permet d'alimenter en métal d'apport le bain de fusion. Ces différentes fonctions de protection et d'amenée de métal sont remplies par une installation qui comprend :

- le générateur de courant continu.
- une source de gaz protecteur.
- un système de refroidissement de torche.
- la torche ou pistolet [8].

#### ➤ gaz de protection :

On distingue les gaz inertes et les gaz actifs.

- Les gaz inerte à base d'argon, pour ou mélange à l'oxygène, ou d'hélium sont surtout utilisés pour les métaux léger et les aciers inoxydables ;
- Les gaz actifs servent au soudage des aciers au carbone ou faiblement alliés (aciers à tube). Le gaz carbonique, parfois mélangé à l'oxygène, est le gaz actif le plus fréquemment utilisé. Il permet d'obtenir une pénétration plus importante et augmente la concavité du cordon [8].

**D. Soudage avec les électrodes enrobées :**

Le soudage à l'arc électrique est le plus répandu comme procédé d'assemblage des pièces métalliques. Une fusion rapide localisée fait que les déformations des pièces soudées à l'arc sont peu importantes. Cette localisation de la chaleur implique une grande rapidité de soudage et un rendement important, avantages indéniables de ce procédé, même sur des tôles de faible épaisseur. Cette rapidité de soudage est encore accentuée par l'emploi d'électrode à haut rendement [9].

➤ **Grace à la simplicité de son principe, le soudage manuelle présente les avantages suivant :**

- Possibilité de soudage d'un large éventail de matériaux sous réserve de trouver l'électrode correspondante,
- Le soudage manuel permet l'assemblage :
  - Des aciers faiblement et fortement alliés.
  - Des fontes.
  - Des alliages de nickel.
  - Des alliages de cuivre.
  - Et éventuellement des alliages d'aluminium.
- Possibilité de souder également une large gamme d'épaisseur (quelques mm à plusieurs centimètres).
- Possibilité de s'adapter à des travaux très divers-artisanat-construction de hautes caractéristiques (appareil à pression par exemple-rechargement).

➤ **Par contre ce type de soudage présente les inconvénients suivants :**

- Productivité réduite (nécessité de changer l'électrode, taux de dépôt faible).
- Nécessité d'une main d'œuvre qualifiée.

Le schéma de principe du soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée est présenté par la Figure I.05.

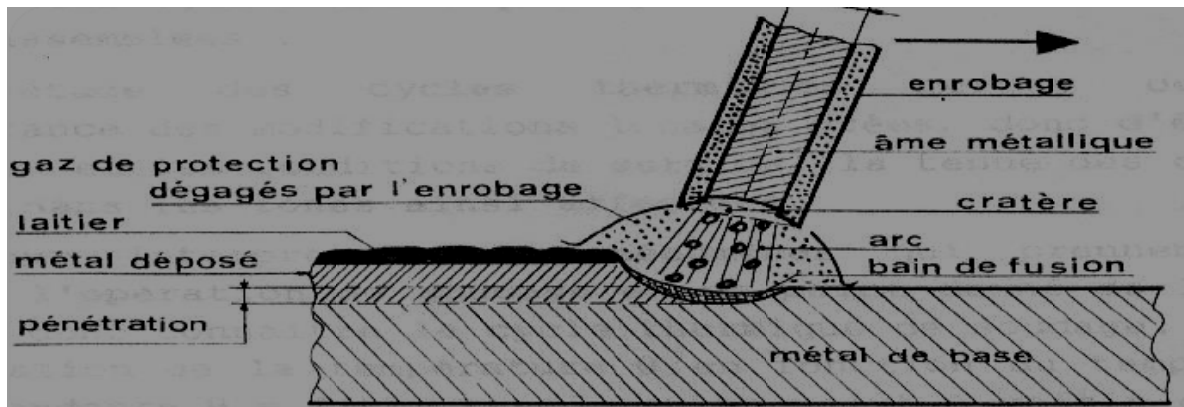


Figure I.05. Schéma de principe du Soudage a l'arc électrique.

- **Source d'énergie** : Un générateur de courant électrique, alternatif ou continu, produit un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et les deux pièces à assembler [10].
- **Métal d'apport** : Le métal d'apport se présente sous forme d'une électrode enrobée, caractérisée par le diamètre de l'âme métallique et la nature chimique de l'enrobage.
- **Les électrodes** : Les électrodes de soudages sont constituées par :  
Une âme métallique dont le rôle est de conduire le courant est dont fusion forme le métal déposé.

Un enrobage concentrique à l'âme dont la composition permet de remplir plusieurs rôles :

- Stabilité électrique de l'arc ;
- Protection du métal en fusion ;
- Apport d'éléments dans le métal déposé [10].

Parmi Les enrobages les plus utilisés on a :

- L'enrobage cellulosique ;
- L'enrobage basique ;
- L'enrobage rutile.

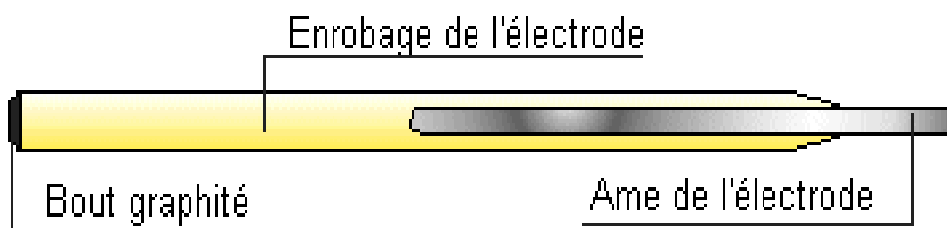


Figure I.06 : L'électrode enrobée.

➤ **Les paramètres de soudage par l'électrode :**

- Nature et épaisseur des pièces métalliques à souder.
- L'environnement dans lequel sera réalisée la soudure (en atelier ou sur un chantier en extérieur).
- Le savoir-faire de l'opérateur.
- L'intensité du courant de soudage, laquelle a une incidence directe sur la vitesse de fusion du métal.
- L'ampérage de courant de soudage maximum que peut délivrer un générateur joue donc un rôle déterminant dans l'épaisseur de métal qui pourra être soudée.
- Le diamètre de l'électrode.
- La position de soudage.
- La nature de l'âme de l'électrode.

**I.5 Soudabilité :**

En considère qu'un matériau métallique est soudable a un degré donné par un procédé et pour un type d'application donné, lors qu'il se prête, moyennant les précaution correspondant a ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de la qu'elle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joint soudé qui , par leurs caractéristiques locales il est conséquences globales de leur présence , satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement.

En voit apparaitre la notion fondamentale de "continuité de la nature de matériau assemblé " et plus particulièrement de "continuité métallique".

Cette exigence implique la mise en jeu, entre les éléments à assembler, de forces de liaison interatomique de type métallique (pour les métaux).

L'intervention de ces dernières exige l'absence de tout corps étranger susceptible de constitué une barrière a leur action.

Ces considérations permettant déjà de noter que :

- l'identité chimique des métaux assemblés n'est pas fondamentalement nécessaire.
- les technique d'assemblage mécaniques (rivetage, boulonnage, agrafage ....) ou par adhésion (collage) ne répondent pas a la définition de soudage.

Dans les travaux de recherches en soudage on s'intéresse beaucoup plus par :

- les conditions d'installation de la liaison métallique.

- les phénomènes métallurgiques mise en jeu et à leurs conséquences.
- les définitions de la soudabilité.
- les essais permettant d'apprécier la soudabilité métallurgique.
- les possibilités d'actions postérieures au soudage permettant d'améliorer les performances de l'assemblage, Pour finir par des considérations sur la soudabilité métallurgique des différents métaux [11].

## **I.6 Les Aciers :**

L'acier est un alliage à base de fer qui contient jusqu'à 2% de carbone. Suivant la destination on distingue les aciers de construction contenant de 0.02 à 0.85% de carbone et les aciers à outils dont la teneur en carbone varie entre 0.65 et 1.4%. Les aciers de construction, utilisés pour les éléments de construction et l'armature de béton armé, ainsi que dans les constructions mécaniques ont une bonne plasticité et une basse fragilité. L'augmentation de la teneur en carbone dans les aciers à outils leur confère une haute dureté, mais en même temps les rend plus fragiles (Résistance à la chaleur, à l'usure par abrasion et à la corrosion) sont améliorées par l'addition du nickel, du chrome, du wolfram, du molybdène, du cobalt, du cuivre, de l'aluminium, etc., que l'on appelle éléments d'alliages et l'acier eux-mêmes, aciers alliés. Suivant les quantités d'additions on distingue les aciers à faible alliage contenant jusqu'à 2% d'éléments d'alliages, les aciers moyennement alliés contenant de 2 à 10% d'éléments d'alliages et les aciers hautement alliés qui en contiennent plus de 10%. Dans la construction on utilise largement les aciers à faible alliage. L'acier inoxydable est un acier hautement allié [12].

### ➤ **Types des aciers :**

Les aciers ont été classés en fonction de deux critères; la composition et le niveau de qualité. Ainsi on distingue les aciers non alliés (<1% d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage < 5 %) ou très alliés  $\geq 5$  %. Selon la garantie donnée aux propriétés d'usage, les aciers de base, de qualité ou les aciers spéciaux. Ces derniers sont placés dans trois familles :

- les aciers de construction mécanique (peu ou non alliés)
- les aciers à outils (peu ou très alliés)
- les aciers inoxydables.

L'industrie gazo-pétrolière qui représente le moteur d'économie mondiale, exige du métallurgiste des aciers possédant une bonne combinaison de résistance, ténacité et soudabilité pour les besoins de transport de leur produits.

Ces critères ont conduit au développement d'aciers à bas carbone appelé HSLA (acier à haute limite élastique).

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre des limites d'élasticité plus supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé.

Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone laminés. D'ailleurs, parce que la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [13].

### **I.7 Aciers HSLA :**

Les aciers HSLA, ont été développés dans une large gamme de limite d'élasticité, de niveau 315 à 700 MPa en laminé à chaud et de niveau 240 à 355 MPa en laminé à froid. Ce sont des aciers doux et extra doux auxquelles on ajoute de faibles quantités des éléments notamment (Nb, Ti, V, Al) afin de piéger le Carbone et l'Azote sous formes de carbures et nitrures, et pour cela sont dénommés les aciers micro-allié [14].

Les aciers H.S.L.A peuvent être divisés en six catégories :

➤ **Aciers résistants à la corrosion :**

Contenant du cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la corrosion, le durcissement est obtenu par solution solide et l'affinement du grain ; ils sont les premiers à être développés.

➤ **Aciers laminés à structure perlitique :**

L'addition de quantités modérées d'un ou plusieurs éléments autres que le carbone augmente les propriétés mécaniques ainsi que la soudabilité de ces aciers.

➤ **Aciers à ferrite aciculaire :**

À la différence de la structure ferritique polygonale, la ferrite aciculaire est caractérisée par une haute densité de dislocation et des grains fins très déformés, ce qui confère à l'acier une limite d'élasticité très élevée, est une très bonne ténacité combinée à une bonne soudabilité.

➤ **Aciers dual-phase :**

Ils ont une microstructure composée de (80 à 90%) de ferrite et (10 à 20%) de martensite. Les aciers Dual-phase peuvent être produits à partir des aciers à faible teneur en carbone de trois manières:

- L'austénitisation inter critique des aciers de carbone-manganèse a suivi du refroidissement rapide.
- un laminage à chaud avec des éléments favorisant la formation de ferrite tels que le silicium et les éléments qui retardent la transformation tels que le chrome, le manganèse, et/ou le molybdène.
- Le recuit continu de l'acier laminé à froid de carbone-manganèse a suivi de trempage et adoucissement.

Actuellement ils sont de plus en plus délaissés au profit d'autres types d'aciers HSLA [14].

➤ **Aciers a forme d'inclusion contrôle :**

Le contrôle de la forme des inclusions qui détermine la plasticité de ces derniers, s'exécute par des petites additions d'éléments de terre rare (Or, Ce.), de Zr, de Ca ou du Ti [15].

➤ **Aciers a ferrito-perlitique :**

Ce sont des aciers types C-Mn qui contiennent de faibles quantités d'éléments susceptibles de former des carbures et carbonitrures tels que le V et Nb.

- Les divers types des aciers micro alliés ferrito-perlitique incluent :
  - Les Aciers micro alliés au vanadium.
  - Les Aciers micro alliés au niobium.
  - Les Aciers micro alliés au niobium-molybdène.
  - Les Aciers micro alliés au niobium-vanadium.
  - Les Aciers micro alliés au vanadium-azote.
  - Les Aciers micro alliés au titane.
  - Les Aciers micro alliés au niobium-titane.

# **CHAPITRE 2**

**Etude thermique**

**Et métallurgique**

**De soudage**

### II.1 Introduction :

L'étude de la métallurgie nous apprend que les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa structure (nature, dimension, morphologie, et répartition des constituants) et de sa composition chimique.

La structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier.

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

Au cours de la soudure, une grande quantité de chaleur est apporté localement à la pièce soudée.

Cet apport calorifique engendre une phase de chauffage très rapide (jusqu'à une température comprise entre la température initiale du métal et sa température de fusion, suivant la distance du point considéré à la zone fondue), à laquelle succède une phase de refroidissement dont la cinétique dépend essentiellement des conditions de soudage (procédé de soudage, rendement thermique du procédé, géométrie du joint soudé, paramètres de soudage,...etc.). On peut considérer deux zones distinctes dans le joint soudé : la zone fondue et la zone affectée par la chaleur (ZAC), appelée aussi : zone affectée thermiquement (ZAT).

#### II.1.1 Rôle de la métallurgie

En amont de toute fabrication, la conception fait le choix des matériaux potentiellement le plus apte à supporter les conditions de service auxquelles sera soumis le produit fabriqué.

En pratique, ce sont principalement les propriétés mécaniques des matériaux, qui guident les concepteurs dans ce choix. Les propriétés d'un matériau dépendent de sa structure métallurgique (arrangement interne de la matière).

Aussi le rôle principal de la métallurgie est-il de comprendre le fonctionnement d'un matériau, sa structure métallurgique, afin de maîtriser ses propriétés.

#### II.1.2. Rôle de la métallurgie du soudage

Lors d'une opération de soudage, en terme métallurgique, tout est remis en question ; les structures des pièces à assembler tendent à évoluer lors de soudage. En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage, les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique.

De plus, s'il s'agit de soudage par fusion :

- d'une part, les matériaux assemblés peuvent prendre une nouvelle composition chimique s'ils sont mélangés à une composition chimique différente, par ex : celle du métal d'apport.

- Et dans tout les cas, ils quittent la structure du métal de base pour passer (au moins dans un premier temps).

Par une structure brute de solidification, de type produit moulé (dans la région ou ils sont fondus puis à nouveau solidifiés).

Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau soudé dans les régions ou il est modifié par le soudage (région soudées), et ce dans le but de maîtriser les propriétés d'une soudure.

### II.2 Comprendre le comportement métallurgique :

Pour comprendre le comportement métallurgique d'un métal de base au soudage il faut connaître et étudier (figure II.01) :

- avant toute chose, le fonctionnement métallurgique du matériau qui va être soudé ; ce matériau est appelé par la métallurgie de soudage : métal de base (**MB**)

- la façon dont une soudure chauffé et refroidit dans le temps et dans l'espace (traitement thermique au soudage), ainsi que les facteurs d influence (énergie, épaisseur soudé..) ; on parle d aspect thermique de l'opération de soudage.

- les modifications subies par le métal de base dans les régions ou il a chauffé et refroidi sans fondre ; cette région est appelée : Zone Affecté Thermiquement (**ZAT**). Et il s'agit de soudage par fusion.

- les modifications subies par le métal de base dans les régions ou il a chauffé, fondu, refroidi (après solidification) et éventuellement modifié chimiquement (s'il y a eu utilisation d'un métal d'apport) ; Cette région est appelée : Zone Fondue (**ZF**).

- les modifications particulières qui peuvent s'opérer à la frontière de la ZF et de la ZAT ; cette région est appelée la Zone de Liaison (**ZL**).

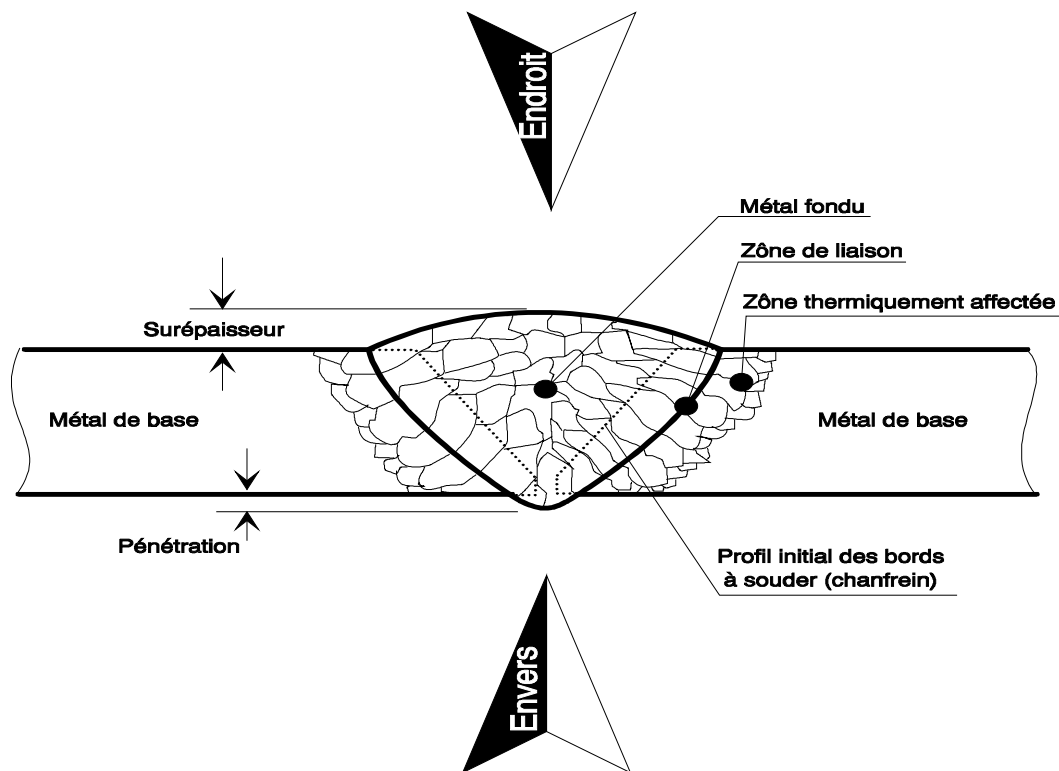


Figure II.01 Structure d'une soudure.

### II.3 Caractères généraux de l'opération de soudage :

Pour présenter les caractères généraux de l'opération de soudage, il faut en examiner trois aspects, à savoir :

- l'aspect thermique.
- l'aspect chimique.
- l'aspect thermomécanique.

Mais il ne faut pas perdre de vue le fait que l'objet d'une soudure est de réunir les éléments d'une construction. La continuité ainsi établie confère à la construction soudée un caractère particulier sur lequel il convient aussi de s'arrêter.

#### II.3.1 Aspect thermique :

Caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent en mouvement, parfois immobile (exemple : soudage par résistance, le soudage par points) dont la nature et la puissance spécifique qu'elle peut atteindre déterminent les possibilités pratique 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 [3].

### II.3.1.1 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
- Te de procédé
- Epaisseur de la pièce

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

$$\frac{\theta_1 - \theta_2}{t_1 - t_2}$$

- Vitesse moyenne
- Vitesse à une température donnée :  $(d\theta / dt) \theta = \theta_1$
- 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 500C°
- Le temps écoulé entre 700 C° et 300C°

Ces deux paramètres de refroidissement déterminent la microstructure figure II.02. 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 [9] [10].

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).

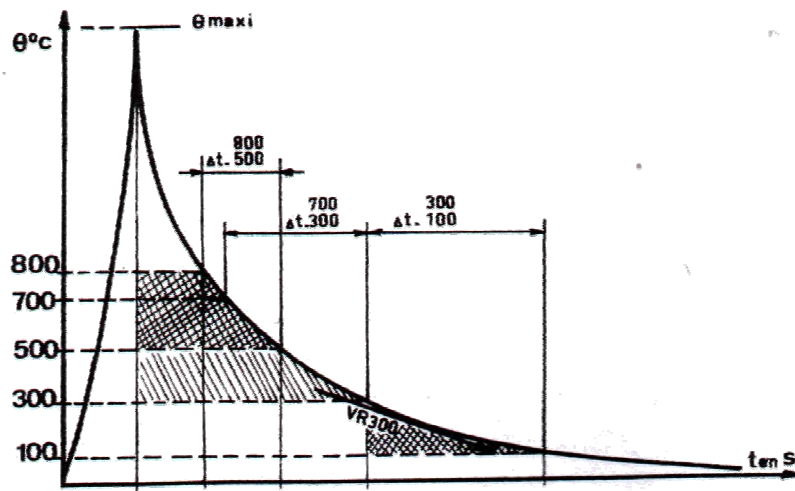


Fig. Paramètres de refroidissement des soudures.

Figure II.02 : Paramètres de refroidissement des soudures.

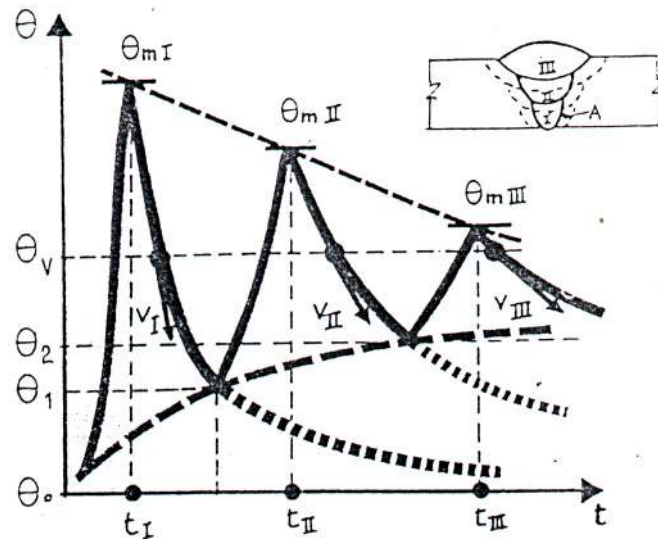


Figure II.03. Cycle thermique pour le soudage multi passes.

### II.3.1.2 Cycle thermique du soudage multi passes :

Au voisinage de 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, figure II.03 la température minimale au point A augmente à chaque passe.

Suivant la disposition des passes, une même température (exemple : A3 dans les aciers) 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 Figure II.04 représentant les modifications dues au cycle thermique pour le soudage multi passes [4].

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 [3].

La notion de pré et post chauffage, qui concerne essentiellement la première et la dernière passe, doit être complétée 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 [4] [5].

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

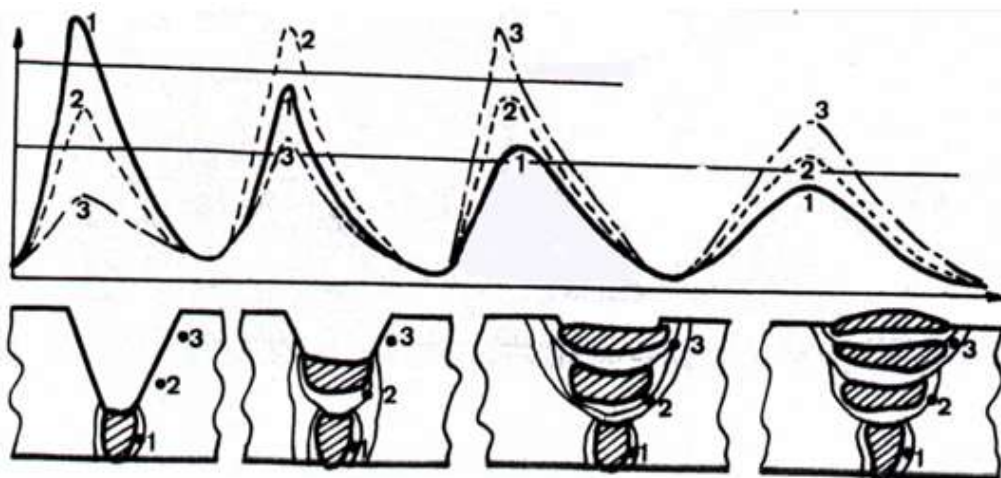


Figure II.03 : Modification dues à l'action thermique, en fonction du nombre de passes.

### ➤ 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.

### ➤ 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 [6].

### II.3.2 Aspect chimique :

C'est à juste titre que, aux différences près dues à la brièveté de l'opération de soudage, à tout le moins le soudage par fusion, a pu être comparé à une opération d'élaboration, en raison de l'évolution qui se produit dans la composition chimique du métal fondu. On peut citer les causes d'évolution de la composition chimique du métal fondu soit par le comportement de ses éléments constitutifs soit au contact du milieu qui l'entoure

(gazeux ou liquide) soit encore en présence du milieu solide constitué par le métal de base lui même.

**a)** Au niveau du métal fondu proprement dit et de ses éléments constitutifs, la température élevée atteinte durant l'opération peut être à l'origine d'une perte en éléments par volatilisation, perte qui doit être compensée par les additions ou par un mode opératoire approprié. D'autre part, durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques sont susceptibles de se produire entre éléments présents, qu'ils proviennent du métal de base lui même ou du métal d'apport mis en œuvre. De telles réactions se traduisent par une évolution des propriétés, mécaniques ou autres et éventuellement par une altération de la compacité, s'il y a formation de composés insolubles ou dégagement de gaz.

**b)** Dans le même temps le métal fondu est susceptible d'être chimiquement influencé par le milieu gazeux qui l'entoure, si un tel milieu existe. C'est bien, à l'origine, le souci de protéger le métal fondu contre l'action néfaste de l'oxygène et de l'azote de l'air qui a conduit à l'élaboration des enrobages et des flux, qui produisent un laitier liquide qui sépare le métal fondu de l'atmosphère, puis à l'utilisation de gaz complètement protecteurs tels que l'argon, ou partiellement protecteurs, tels que l'anhydrite carbonique ou les mélanges de ce gaz avec de l'argon.

En fait, les gaz énumérés ci-dessus ne sont les seuls à intervenir, et nous aurons en particulier à examiner, à d'autres points de vue, le rôle de l'hydrogène dans le soudage de l'acier ou d'autres alliages.

**c)** La recherche d'une protection de bain de fusion contre l'atmosphère environnante, ainsi que d'un moyen d'y incorporer des éléments susceptibles d'intervenir, a conduit à la mise au point, des enrobages d'électrodes et des flux qui, au moment de la fusion produisent une phase liquide nommée laitier qui réagit au contact du bain de fusion et en fait évoluer la composition. Il y a donc bien élaboration, mais comme on l'a dit, il s'agit d'une opération rapide, hors des conditions normales d'équilibre.

**d)** Enfin, on a déjà mentionné le fait qu'au contact du métal de base solide qui lui sert de support, une proportion plus ou moins importante de métal de base s'incorpore, par sa propre fusion, au métal fondu. Ainsi se trouve définie la dilution, dont la valeur dépend d'une part du procédé de soudage, par la pénétration qui lui est propre, d'autre part, pour chaque procédé, du mode opératoire.

### II.3.3 Aspect thermomécanique :

Le caractère localisé de l'opération de soudage et le passage par l'état fondu suivi d'une solidification font intervenir deux comportements physiques importants à savoir le retrait à la solidification et la dilatation thermique qui agissent simultanément pour engendrer déformations et contraintes au niveau des joints soudés.

La prévention des déformations globales provoquées par le soudage et qui sont associées au retrait à la solidification et au refroidissement, pose des problèmes technologiques, mais il faut noter que tout empêchement à la déformation se traduit par la naissance de contraintes résiduelles supplémentaires. Les remèdes à la déformation sont donc, chaque fois que cela est possible, à rechercher dans un mode opératoire qui en réduit l'amplitude, plutôt que dans un effet de bridage des pièces à assembler.

Quant aux contraintes résiduelles, qui naissent au niveau des zones localement déformées à chaud, c'est-à-dire plastiquement, elles s'établissent au cours de refroidissement, affectent un métal redevenu élastique, ce qui leur assigne une valeur maximale égale à la limite d'élasticité de ce métal. D'autre part, mais ceci ne concerne que certains aciers particulièrement trempant, il y a lieu de tenir compte des contraintes associées à la déformation martensitique [3].

### II.3.4 Aspect constructif

La question qui est posée ici, dans le cadre des caractères généraux du soudage, est de savoir si la continuité établie par les joints soudés entre les éléments assemblés pour constituer une construction implique une exigence particulière à l'égard du métal de base, indépendamment de celles qui résultent des effets métallurgiques et thermomécaniques directs du soudage.

En effet, la continuité assurée par les soudures confère à la construction un caractère monolithique qui n'est pas sans risque ; on comprend aisément que, si en un point quelconque de la construction et pour une cause qui n'est pas forcément associée à la qualité des soudures, une rupture s'amorce, aucune discontinuité n'est susceptible de l'arrêter dans sa propagation, si le métal de base ou les soudures elles-mêmes ne s'y opposent pas. Il suffit, pour illustrer ce propos, d'évoquer les ruptures spectaculaires qui ont affecté dans le passé des constructions soudées telles que navires ou ponts et l'usage qui a été fait de lignes de rivets pour créer des obstacles à une telle propagation (appelés à l'époque « crack arrestors »).

## II.4 Types de joints :

### II.4.1 Généralités

Sur les structures, on trouve une grande variété de joints soudés : ils sont fabriqués à partir des quatre configurations de base représentées figure 2-7 que l'on peut classer de la manière suivante :

- joints bout à bout.
- joints en T.
- assemblages à recouvrement.
- joints en angle.

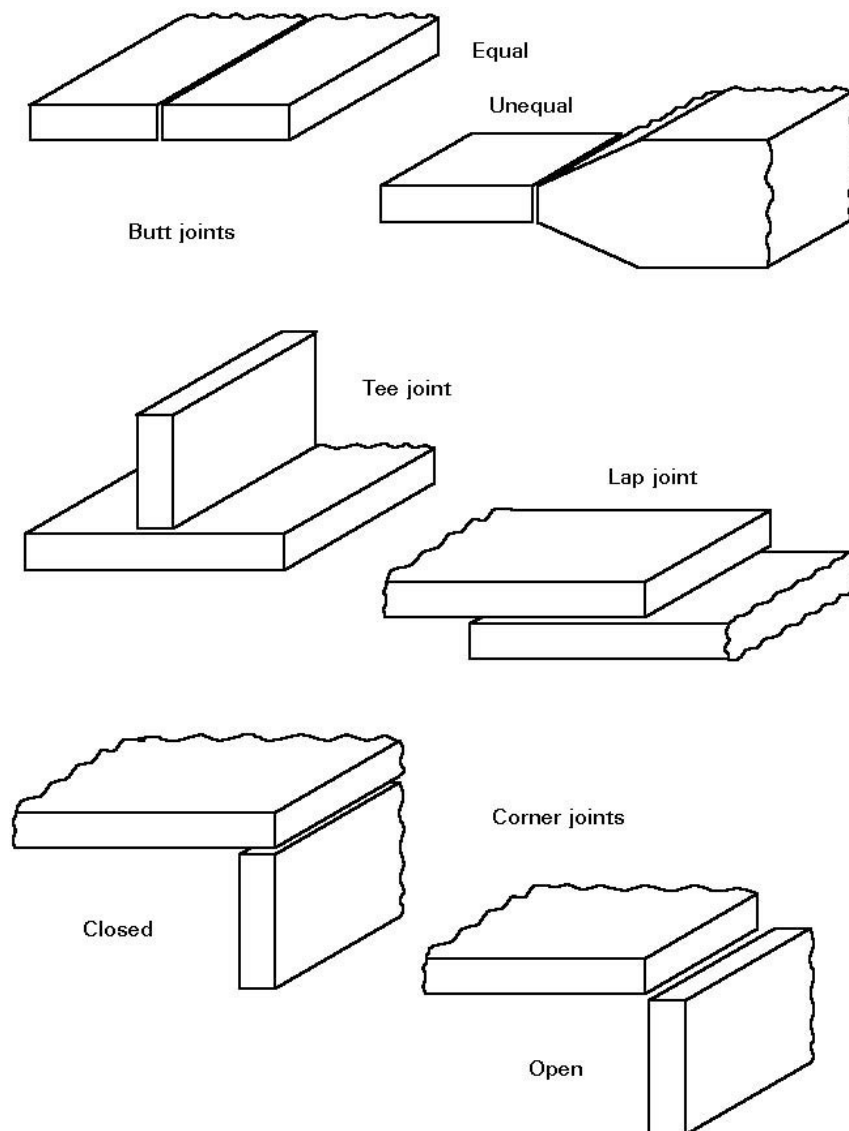


Figure II.07 types de joints

### II.4.2 Préparation des joints :

L'application permet de souder tous les types de joints. Toutefois, il est important de savoir que généralement, on n'utilise pas de baguette d'apport pour le soudage des plaques minces. Dans ce cas, on privilégie un joint à bords relevés pour permettre un assemblage par fusion des bords seulement.

Le type de préparation du joint pour un travail donné dépend principalement des facteurs suivants:

- propriétés requises pour le cordon de soudure;
- coût de préparation du joint et du dépôt de la soudure;
- nature du métal de base;
- dimensions, forme et apparence de l'assemblage à souder.

Il faut aussi tenir compte des considérations suivantes pour le choix du type de joint:

- nombre de points de soudage et dimensions de ces points.
- possibilité de réaliser une purge.
- distance entre les plaques, profondeur et angle du chanfrein, s'il y a lieu.
- nombre de passes requises.
- diamètre de la baguette d'apport.
- méthode d'amorçage de l'arc.
- position de soudage.
- possibilité de renforcement du joint (bridage).
- type d'électrode employée.
- type de poste de soudage.
- Tolérances de l'assemblage.

### II.4.3 Méthodes de réalisation d'un joint soudé :

Comme on peut le voir sur la figure II.08, un joint soudé s'obtient en faisant fondre des plats en acier ou des profilés (métal de base) le long de la ligne du joint. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal fondu qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base, comme

on le voit sur la figure II.09. Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint.

Deux types de soudure sont d'usage commun : les soudures bout à bout et les cordons d'angle. Dans le premier cas, le métal fondu est généralement celui du profilé des éléments à souder ; dans le second le métal fondu déposé est extérieur aux éléments à souder.

Bien évidemment, on ne peut pas faire en même temps toute la longueur du joint. En pratique, la source de chaleur utilisée pour fondre une petite surface est ensuite déplacée le long de la ligne du joint, faisant fondre progressivement le métal de base sur le bord avant du bain de fusion, comme on le voit sur la (Figure II.10).

Au même moment, le métal du bord arrière du bain de fusion se solidifie. La source de chaleur la plus souvent utilisée, pour des travaux sur des structures est constituée d'un arc de faible voltage (15 à 35 V), d'intensité élevée (50 à 1 000 A). Comme on le voit sur le schéma de la Figure II.11, l'arc se développe entre le bout de l'électrode en acier (barreau) et la pièce à souder ; il fait fondre à la fois le métal de base et l'électrode ; le métal fondu provenant de l'électrode est ainsi ajouté au bain de fusion.

L'acier fondu du bain de fusion absorbe volontiers l'oxygène et l'azote de l'air, ce qui peut rendre poreuse la soudure solidifiée et conduire éventuellement à des problèmes métallurgiques.

La Figure II.12 montre comment on peut éviter ceci en couvrant le bain avec un flux en fusion, comme dans le soudage à l'arc manuel et le soudage à l'arc sous flux en poudre ou en remplaçant l'air autour de l'arc par un gaz inerte, comme dans le soudage MAG ou le soudage par électrode enrobée.

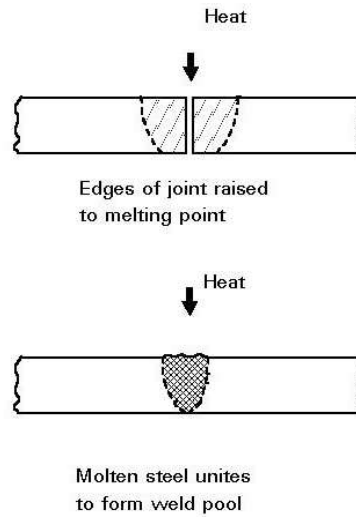


Figure II.08 Formation d'une piscine de la soudure

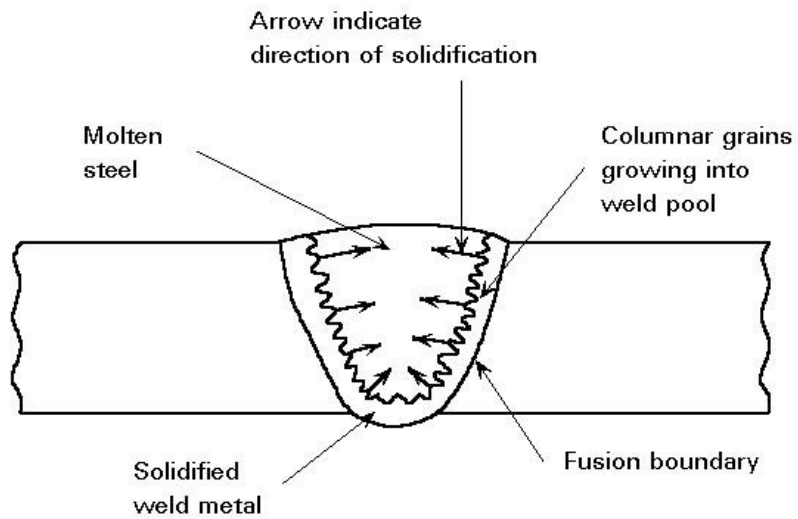


Figure II.09 Solidification de métal de la soudure

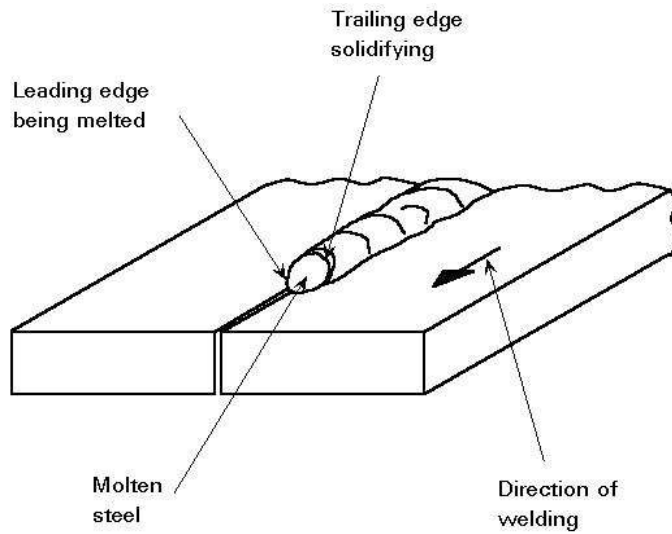


Figure II.10 Fusion progressive et solidification

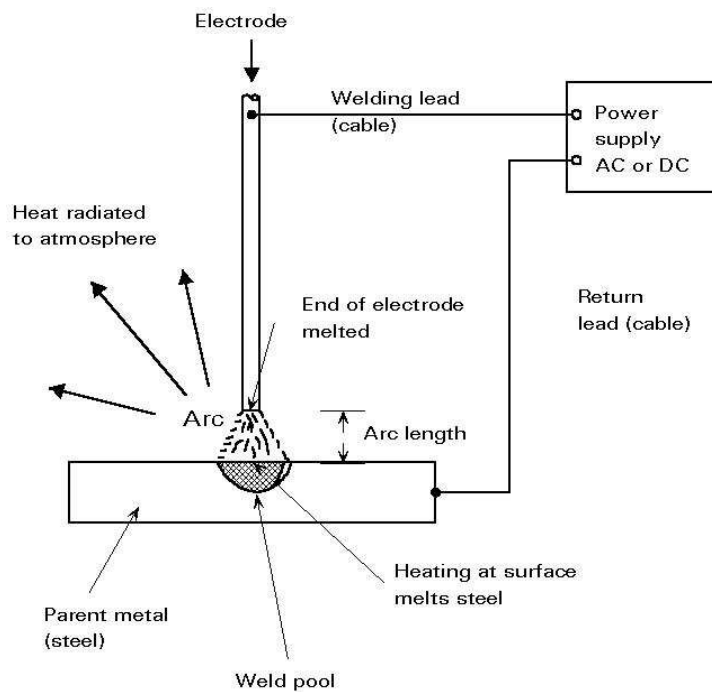


Figure II.11 Soudure par arc

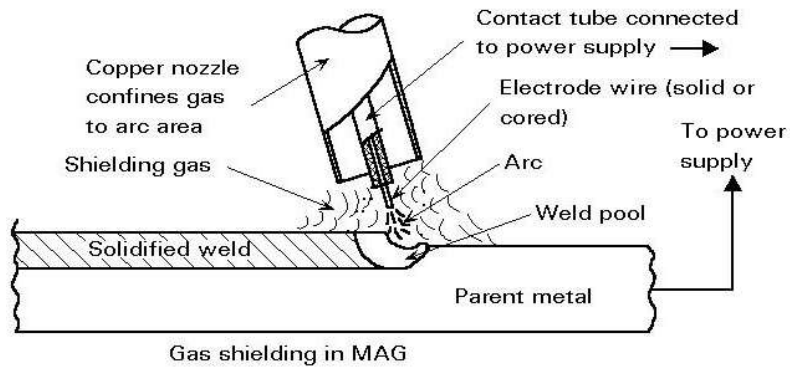
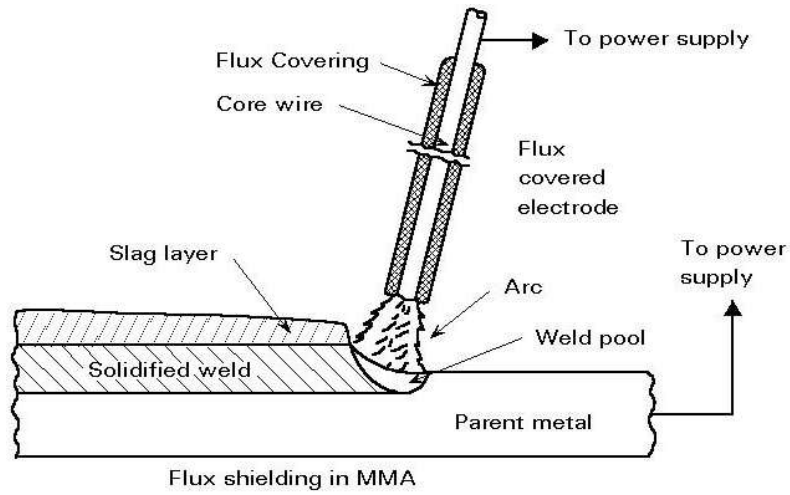


Figure II.12 méthode de protection

# **CHAPITRE 3**

**Les traitements**

**Thermiques**

**Appliqués aux**

**Soudures**

### **III.1 Introduction :**

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

a. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A$  % en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

### III.2 Cycle d'un traitement thermique :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (Figure III.01).

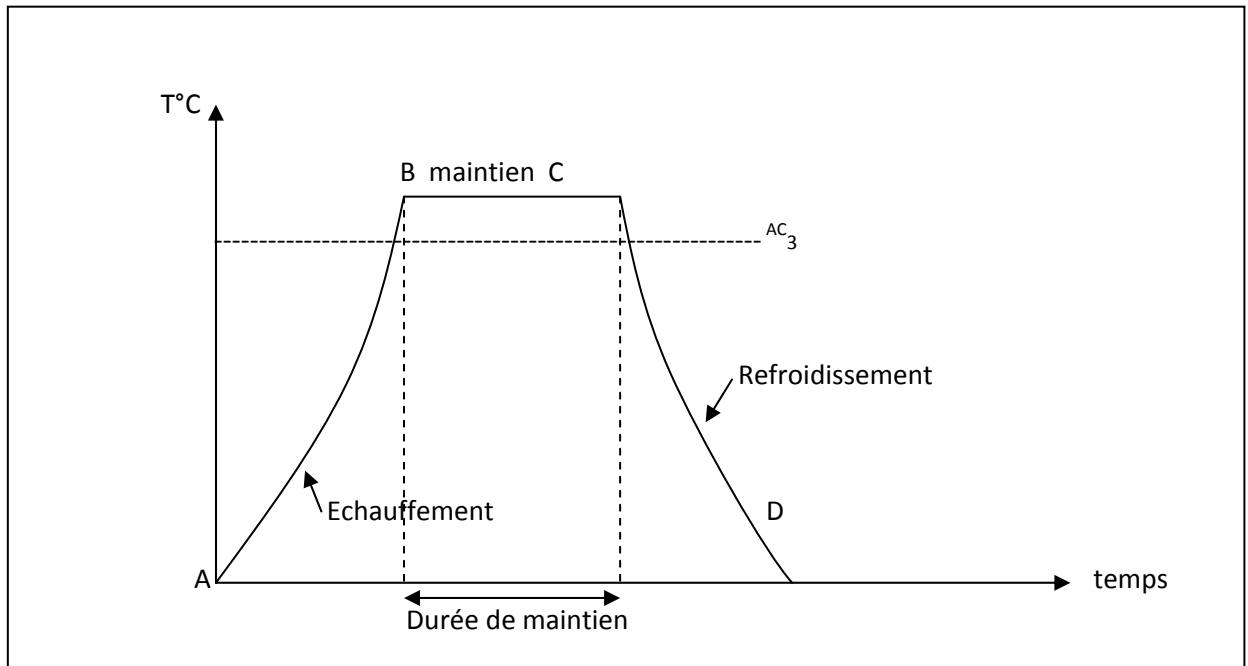


Figure III.01 : Cycle d'un traitement thermique.

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC<sub>3</sub>).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
  - lente (dans le four, à l'air).
  - Assez rapide (dans l'huile).
  - Très rapide (dans l'eau) [26].

#### III.2.1 Chauffage des pièces :

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. La figure 3 représente la courbe de

chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce, la courbe est simplifiée comme une droite.

Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

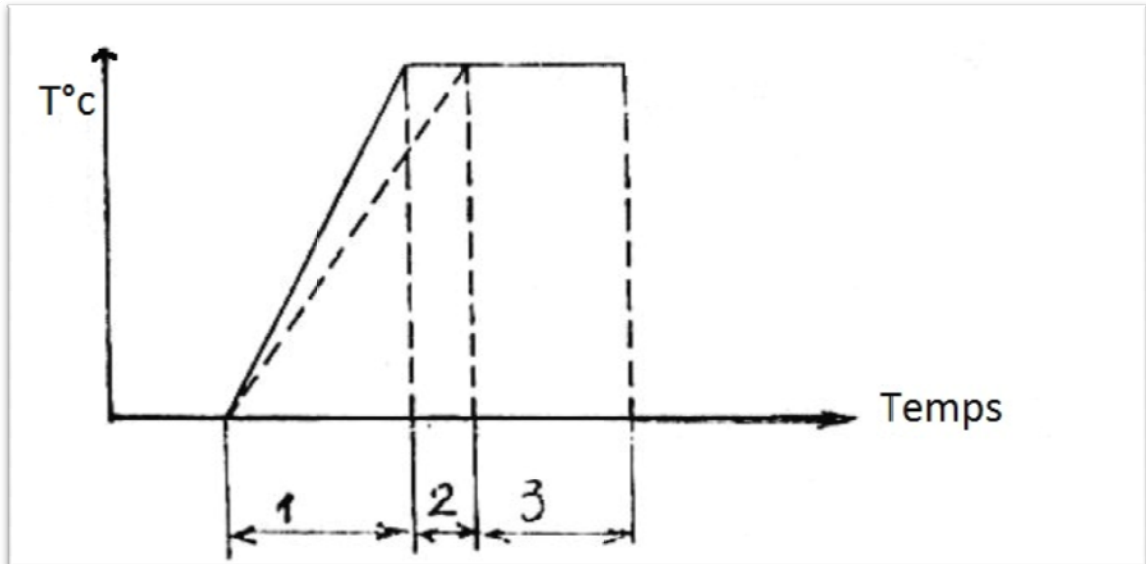


Figure III.02 : Chauffage des pièces

1. Durée de préchauffage : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale est atteinte à la surface de la pièce.
2. Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation : C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.
3. Durée de maintien : C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent.

$$C_{\text{équivalent}} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + V + \frac{Si-0.5}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Ti}{5} + \frac{Al}{10} \quad [26].$$

Pour des teneurs maximales jusqu'à : 0,9 % C, 1,1 % Mn, 1,8 % Cr, 0,5% Mo, 5,0 % Ni, 0,25% V, 1,8% Si, 2% W, 0,4 %Ti, 2% Al, et selon RUHFUS et PLFAUME, il est possible de déterminer la durée de chauffage de la pièce en dépendance de son diamètre et du carbone équivalent (C eq).

Les paliers représentés sur les courbes (Figure III.03) ont pour but de diminuer la différence de température entre le cœur et la couche extérieure de la pièce (égalisation de la température) [26].

Ces courbes sont valables pour des chauffages de trempe et de recuit de normalisation.

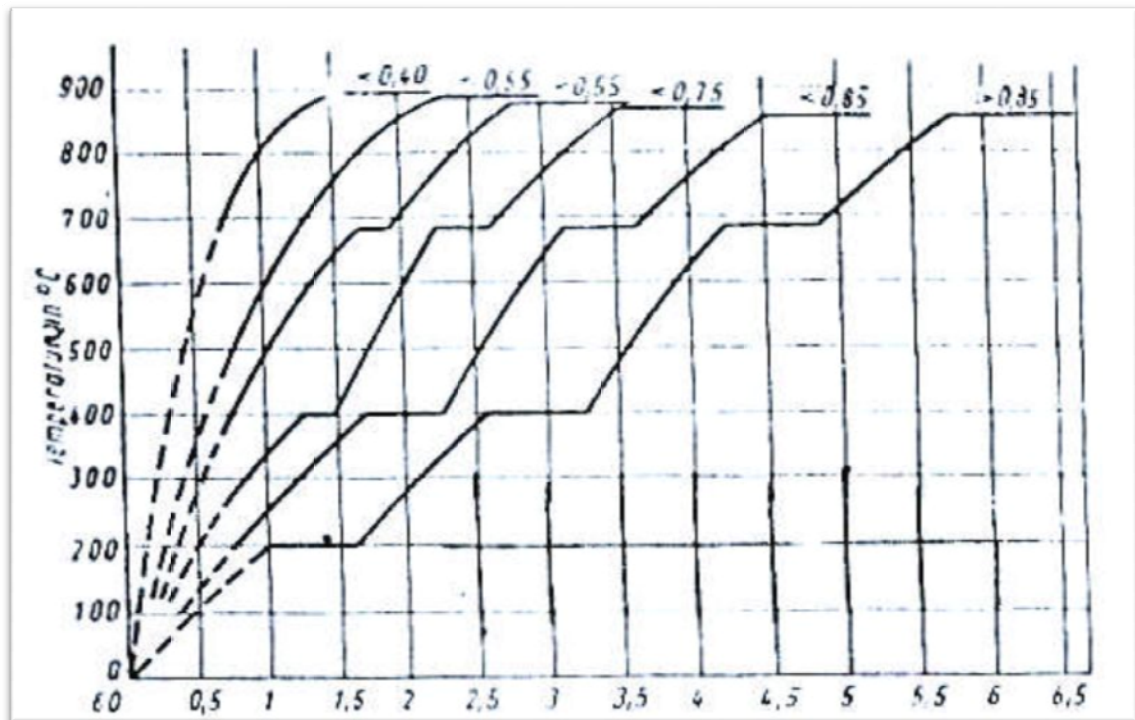


Figure III.03 : Temps de chauffage en min, recommandés pour revenu normal et trempe en dépendance de Ceq pour une pièce de diamètre 60 mm.

Pour les différents chauffages, on peut choisir les vitesses suivantes :

- Chauffage lent : 3 à 10°C/min.
- Chauffage technique conventionnel (normal) : 50°C/s.
- Chauffage rapide : > 50°C/s [26].

### III.2.2 Refroidissement des pièces :

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps). Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile,

dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac [26].

### III.3 Diagramme d'équilibre :

#### III.3.1 diagramme d'équilibre fer-carbone :

Le diagramme d'équilibre est fabriqué à partir des courbes de refroidissement des différents alliages de fer et de carbone. Dans la courbe de refroidissement, chaque changement d'état de structures cristallines ou de solubilités apparaissent comme une discontinuité.

Lorsqu'on définit les traitements thermiques, particulièrement les températures de traitement, il est important de connaître les températures de transformations [25].

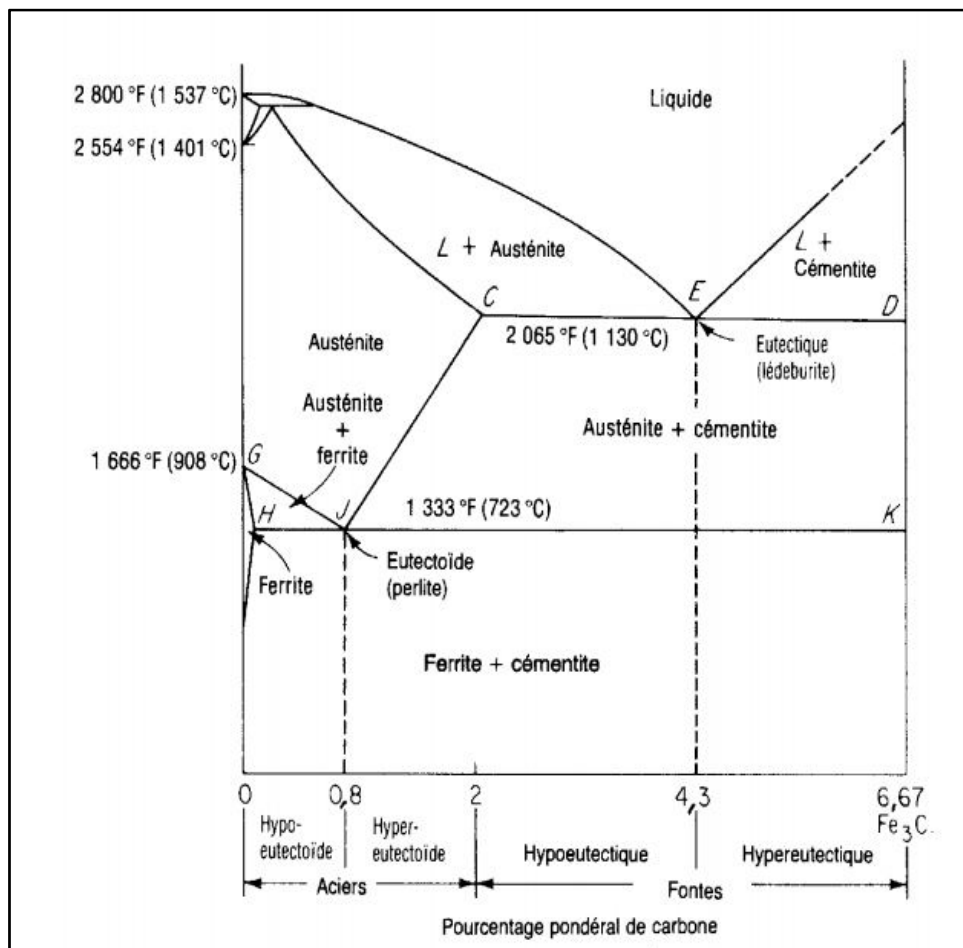


Figure III.04: Le diagramme de phase fer-carbone

La ligne HJK, correspond à la transformation eutectoïde. Lorsque l'alliage refroidit, il traverse cette ligne. À ce moment, la solution solide de fer gamma, austénite (CFC), se transforme en solution solide de fer alpha, ferrite (CC). Puisque la solubilité maximum du

carbone passe de 2 % dans le fer gamma à 0,025 % dans le fer alpha, il y a rejet de carbone sous forme de cémentite. Donc lors du passage de la ligne HJK, l'austénite se transforme en perlite (agrégat de ferrite et de cémentite). Si on désire modifier la microstructure (et ainsi les propriétés mécaniques) de l'alliage, on doit modifier les transformations qui surviennent normalement dans l'alliage [25].

### **III.4 Traitements thermiques des soudures :**

#### **III.4.1 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 [24].

### **III.4.2 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) Traitement global :**

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 [24].

#### **B) Traitement local simultané :**

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.

Lors du traitement thermique 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 [24].

### **III.4.3 Gammes des traitements thermiques :**

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- Le recuit.
- La trempe.
- Le revenu et le vieillissement.
- La normalisation.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement [26].

#### **III.4.3.1 Recuit :**

Les aciers possèdent un caractère apte d'acquérir grâce à des traitements thermiques variés, toute une gamme de propriétés très différentes. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en

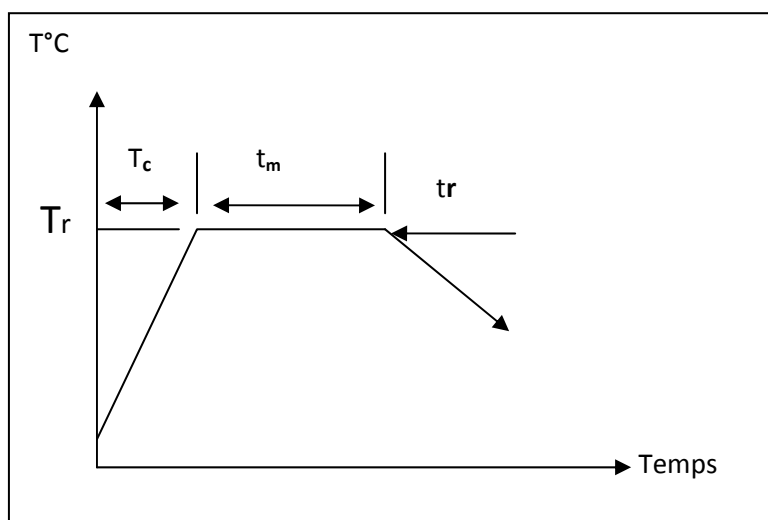
faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

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

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes [26].

➤ **Cycle thermique d'un recuit comprend :**

- a. Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- b. Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- c. Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit, voir (Figure III.05) [26].



Tr: température de recuit.  
tc: temps de chauffage.  
tm: temps de maintien  
tr : temps de refroidissement.

Figure III.05 : Cycle Thermique d'un Recuit

➤ **Différents types de recuit :**

En pratique, on distingue quatre types élémentaires de recuits :

- Le recuit d'adoucissement
- Le recuit de normalisation
- Le recuit de détente (stabilisation).
- Recuit d'homogénéisation (recuit de diffusion).

Il existe des nuances même de ces types de recuits, ce qui fait que l'on rencontrera d'autres dénominations. Ces quatre familles étant déterminées en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre [27].

**a) Recuit d'adoucissement :**

Ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage (chauffage à  $A_1+80$ ) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air (ou au four), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine.

Une deuxième variante de ce recuit se nomme « recuit de coalescence » conduisant à la structure globulaire des carbures dans une matrice ferritique [27].

**b) Recuit de normalisation :**

Le recuit de normalisation à pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes.

Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit  $AC_3+50^\circ$  pour les aciers hypoeutectoïdes et  $AC_{Cm}+50^\circ$  pour les aciers hypereutectoïdes.
- Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.
- Refroidissement en général à l'air calme.

Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de  $A_3$  suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Ce recuit (appelé également perlitisation) à pour objectif de produire une structure perlitique à grains fins régulièrement repartis, ce qui, pour un acier perlitique, correspond aux propriétés mécaniques optimales. Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage [27].

**c) Recuit de détente :**

On peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à  $A_1$ . Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques.

Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier.

Les températures sont très variables selon la nature de l'état d'origine de même que les temps de maintien. Les contraintes sont décroissantes du temps et de la température et ne disparaissent entièrement qu'au moment où la pièce atteint la température de recristallisation de la ferrite.

Cette opération visant à supprimer les contraintes résiduelles est également nommée relaxation. Ce recuit peut être effectué en plusieurs phases alternées avec des opérations d'usinage [27].

**d) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :**

Les pièces coulées en acier sont soumises en général à une vitesse de refroidissement relativement rapide. Elle conduit en effet à une hétérogénéité chimique, où les éléments d'alliages ne sont pas répartis d'une façon régulière dans la structure. On est donc en présence du phénomène de ségrégation qui peut avoir une incidence négative sur les propriétés des aciers.

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

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

A la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains [27].

#### **III.4.3.2 Trempe :**

La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite.

La trempe consiste à un chauffage de l'acier à une température de 30 à 50°C au dessus de la ligne GOSK supérieure à celle de  $AC_3$ , pour les aciers hypoeutectoïde et supérieure à  $AC_1$ , pour les aciers hypereutectoïdes.

A cette température l'acier est maintenu jusqu'à l'achèvement du chauffage complet c'est à dire jusqu'à la transformation des phases, ensuite l'acier subit un refroidissement rapide avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de la trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau et pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'autre nature).

Le but du refroidissement rapide et d'obtenir une structure martensitique, donc éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se termine dans le domaine de la martensite.

Donc la trempe permet de donner un maximum de dureté à l'acier  $HV = 700$  à  $800Kp/mm^2$  ou  $HRC = 60$  à  $65$ , ce qui donne une structure convenable pour le traitement de revenu.

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif, le plus souvent elle est suivie d'un revenu destiné à diminuer la fragilité et les contraintes internes afin de donner à l'acier les propriétés mécaniques appropriées [26] [27].

➤ **Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe :**

Pour estimer la vitesse de refroidissement, on utilise la relation entre la température et le temps :  $T = f(\log t)$  représenté graphiquement. L'échelle logarithmique permet un étalement convenable des courbes de refroidissement rapide. La vitesse critique de trempe martensitique est soit :

- mesurée à 700°C.

- exprimée dans un gradient de température généralement compris entre 700 et 300°C

$$\left( \overline{V}_{700}^{300} \right) \quad [26].$$

Le refroidissement doit se réaliser à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe. Celle-ci étant la vitesse limite qui assure la transformation totale de l'austénite en martensite.

➤ **Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations de phases :**

**A. vitesse de refroidissement lente :**

- Transformation austénite-ferrite par germination-croissance transformation diffuse.
- Déplacements atomiques permettant la création de germes et leur croissance.

**B. vitesse de refroidissement rapide :**

- La force motrice de transformation devient très grande en-dessous de 550°C, mais la diffusion ne peut plus intervenir...
- La transformation austénite-ferrite se fait par un mécanisme displasif, c'est à dire par une modification locale de la maille sans déplacement de matière.

➤ **Choix du milieu de trempe :**

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que : tapures, déformations, gauchissement, contraintes résiduelles etc.

Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température  $A_1$ – $M_s$ . Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite sur fusionnée dans le domaine des transformations : perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique  $M_s$ – $M_f$ .

Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures.

Généralement, on utilise pour les bains de trempe, des liquides qui peuvent bouillir tels que l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, les huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur protège les pièces et empêche le refroidissement. Une fois que l'agent refroidissant se met en ébullition, la gaine se rompt et l'évacuation de la chaleur s'accélère.

Pour les aciers au carbone, on utilise le plus souvent de l'eau comme milieu de trempe, alors que pour les aciers alliés, on utilise soit de l'huile, soit un bain de sel [26].

### III.4.3.3 Revenu :

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à  $AC_1$ , (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante (Figure III.06).

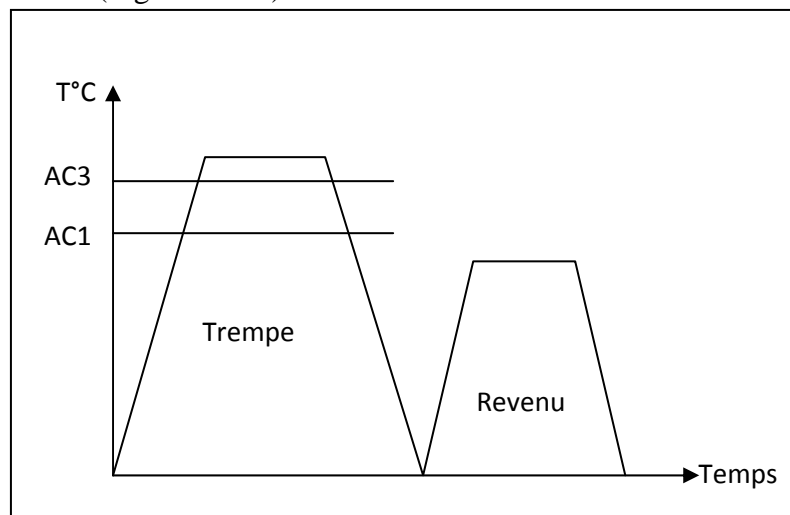


Figure III.06 : Cycle de Revenu.

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

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

La vitesse de refroidissement après revenu, a une influence faible sur l'état des contraintes résiduelles. Néanmoins plus le refroidissement est lent, plus les contraintes résiduelles sont faibles. Un refroidissement rapide dans l'eau à partir de 600°C produit des contraintes thermiques nouvelles [26].

➤ **Différents types de revenu :**

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

- Revenu de relaxation ou de détente,
- Revenu de structure ou classique,
- Revenu de durcissement.

**a) Revenu de relaxation ou de détente :**

Il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle [27].

**b) Revenu de structure ou classique :**

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et  $A_{c1}$ . On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers [27].

**c) Revenu de durcissement :**

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [27].

➤ **Comportement des caractéristiques mécaniques après traitement thermique :**

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (Figure III.07)

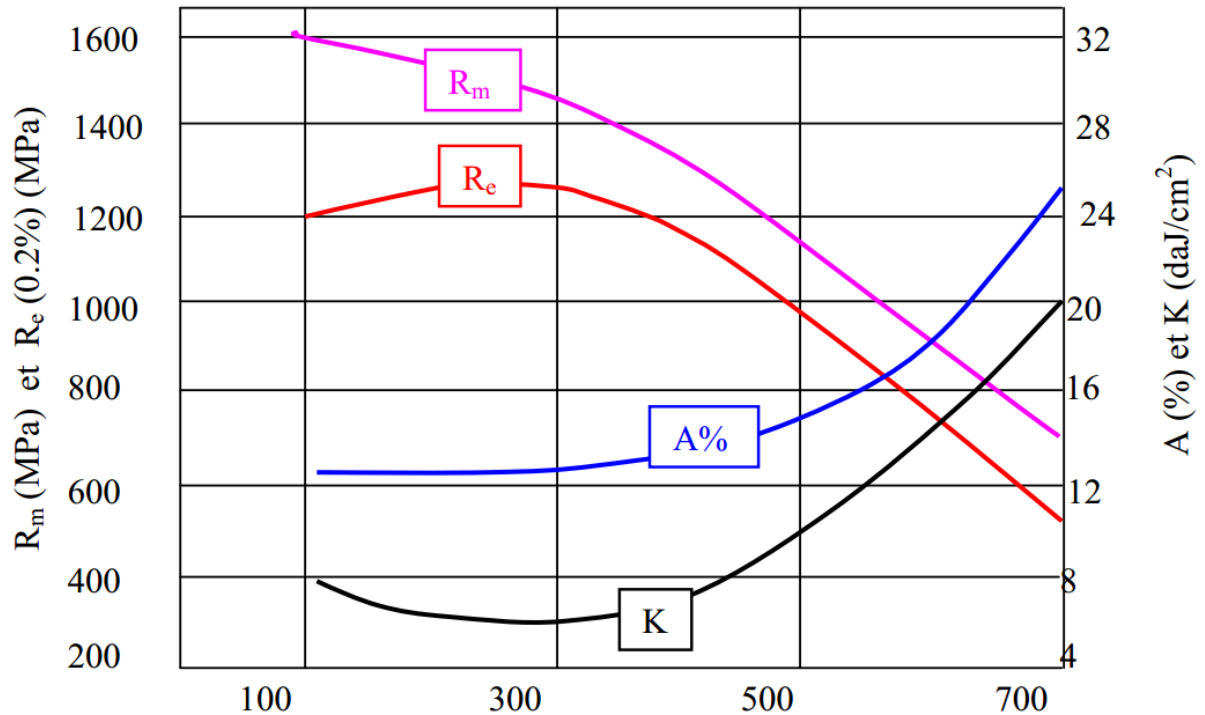


Figure III.07 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu sur les aciers [27].

**EN résumée :**

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

#### III.4.3.4 Normalisation :

C'est un traitement thermique qui consiste à :

- Un chauffage de l'acier hypoeutectoïde à  $(AC3 + 50^{\circ}C)$ .
- Un chauffage de l'acier hypereutectoïde à  $(Acm + 50^{\circ}C)$ .

C'est à dire un chauffage jusqu'au domaine austénitique :

- Un maintien (assez court) à cette température jusqu'à son échauffement complet.
- Un refroidissement à l'air libre.

La normalisation provoque la recristallisation aussi de l'acier et affine donc la structure à gros grains obtenue par coulée ou laminage (forgeage estampage). Ce traitement s'emploie largement en remplacement de la trempe et du revenu pour améliorer les propriétés des pièces moulées en acier.

Un refroidissement accéléré à l'air conduit à la décomposition de l'austénite aux températures plus basses et augmente ainsi la dispersion de la structure ferrite-cémentite ainsi que la quantité de la perlite ou plus précisément, de quasi eutectoïde du type sorbite ou troostite. Ceci augmente de 10 à 15 % la résistance et la dureté de l'acier normalisé à haut et moyen carbone par rapport à l'acier recuit. Le but de la normalisation varie en fonction de la composition de l'acier.

Pour les aciers à bas carbone, la normalisation étant une opération bien plus simple, elle s'emploie au lieu du recuit en augmentant quelque peu la dureté. La normalisation assure en coupe un meilleur état de surface.

Pour un acier à teneur moyenne en carbone, la normalisation remplace la trempe et le revenu à haute température. Les propriétés mécaniques obtenues sont plus faibles, mais l'opération produit une déformation bien moindre que celle due à la trempe et la probabilité d'apparition des formes n'existe pratiquement pas.

Dans le cas d'un acier à haut carbone (hypereutectoïde), la normalisation est appliquée pour éliminer le réseau de cémentite qui peut apparaître lors d'un refroidissement lent dans l'intervalle de température entre  $A_{cm}$  et  $A_1$ . La normalisation suivie de recuit d'adoucissement ( $600$  à  $650^{\circ}C$ ) est appliquée souvent au lieu du recuit complet pour corriger la structure des aciers alliés, la productivité de ces deux opérations étant plus élevée que celle du recuit tout seul. Donc la normalisation est destinée non seulement à la régénération d'un acier surchauffé (affinage du grain, homogénéisation de la structure), mais aussi à :

- Supprimer les effets de la trempe.
- Supprimer l'écrouissage et les tensions internes [26].

**Conclusion :**

Les différents traitements thermiques appliqués aux constructions soudées dépendent :

- du matériau soudé.
- de l'état initial de la structure (recuit, trempé, écroui,...).
- du but recherché.

Les principaux traitements utilisés sont les suivants (Tableau III.01) :

- les traitements de normalisation pour détruire les effets du soudage sur les structures de la ZAT et de la zone fondue (grossissement du grain, trempé,...).
- les traitements de trempe-revenu pour obtenir une structure aux propriétés plus favorables du point de vue utilisation [34].

Traitement et température	Mode	Conséquences	
		Positive	Négative
Normalisation $Ac_1 < T < Ac_3$	Après recuit	Abaissement de la température de transition $T_r$ / au recuit	Adoucissement
	Direct après soudage	Abaissement de la température $T_r$ dans la ZAT et la ZF relaxation	Adoucissement
Normalisation $T > Ac_3$	Local	Régénération des structures dans la ZAT et la ZF	-Risque de durcissement. -Création des contraintes -Adoucissement local
	Global	Régénération des structures dans la ZAT et la ZF	Risque de déformation
Trempe – Revenu $T > Ac_3$		Régénération des structures dans la ZAT et la ZF	Risque d'hétérogénéités entre la ZF et le métal de base

Tableau III.01 : Traitement thermique des soudures [34].

# **CHAPITRE 4**

## **Partie**

### **Expérimentale**

### IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure et nous avons essayé de mettre en évidence 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.

### IV.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 :

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

Tableau IV.01 : Composition chimique de l'acier grade API X70.

#### ➤ 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.

	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
E6010	0.20	1.20	1.00	0.035	0.040	0.30	0.20	0.30	0.08
E7010	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10

Tableau IV.02 : Composition chimique du matériau d'apport (E7010 et E6010).



Figure IV.01 : Métal d'apport utilisé (E6010) et (E7010)

**IV.3 Procédure de soudage :**

**IV.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 (FigureIV.02).

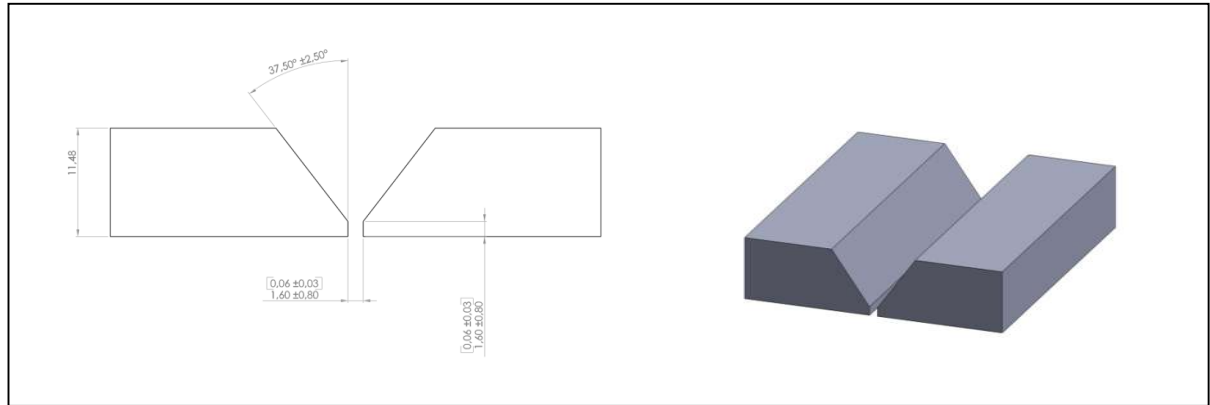


Figure IV.02 : les pièces à assemblés (chanfreinage)

➤ **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.

Passes	1 <sup>er</sup>	2 <sup>eme</sup>	3 <sup>eme</sup>	4 <sup>eme</sup>	5 <sup>eme</sup>	6 <sup>eme</sup>	7 <sup>eme</sup>
Type d'électrode	E 6010	E 7010	E 7010	E 7010	E 7010	E 7010	E 7010
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)	20/40	15/30	15/30	15/30	15/30	15/30	15/30
Vitesse de soudage (mm/s)	6	8	8	8	8	8	8

Tableau IV.03: Paramètres de soudage

IV.3.2 Découpage des éprouvettes :

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



Figure IV.03 : Une tronçonneuse (Struers Discotom) au niveau de CRTI



Figure IV.04 :4 Eprouvettes de pliage



Figure IV.05 :4 Eprouvettes de traction



Figure IV.06 :4 Eprouvettes de résilience



Figure IV.07 :4 Eprouvettes de microstructure

IV.3.3 Traitement Thermique :

➤ Cycle de traitement effectué :

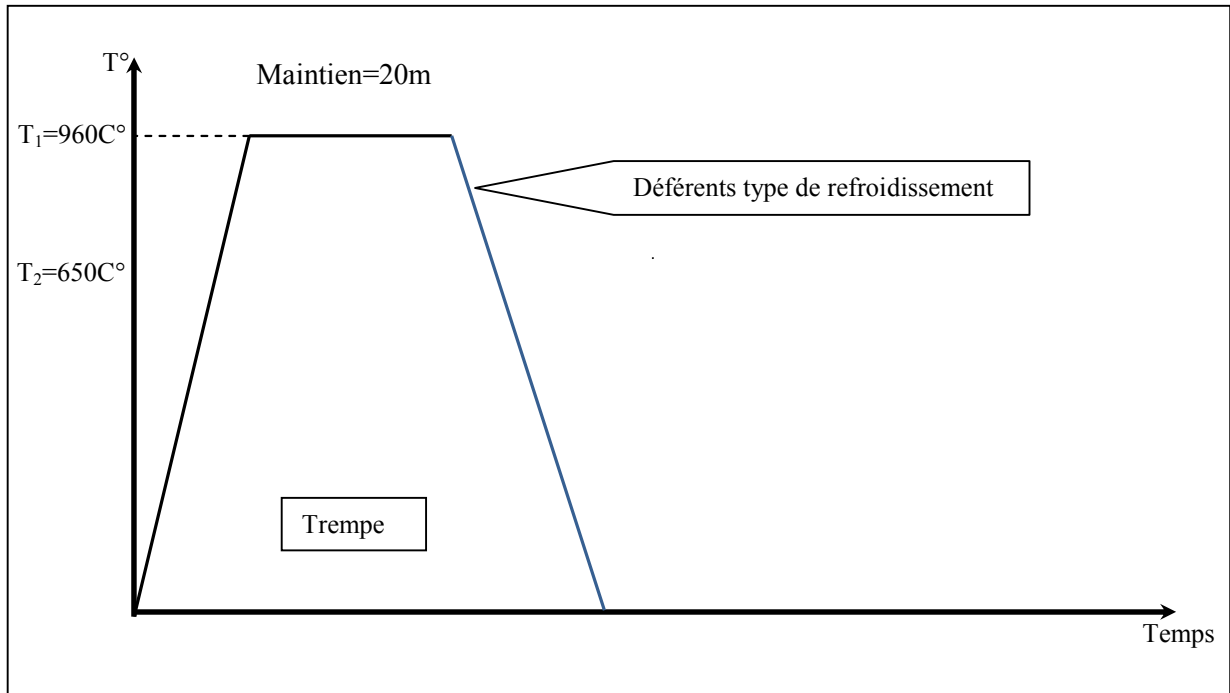


Figure IV.07 : Cycle effectué pour 12 éprouvettes.



Figure IV.08 : Les éprouvettes dans le four au niveau de CRTI

- **Etapes de traitement thermique :** Le cycle de traitement thermique effectué c'est un cycle de trempe réalisé par ces étapes :
- Chauffage des éprouvettes dans le four jusqu'à  $960^\circ\text{C}$  pour mettre l'acier dans le réseau cristallin cubique à face centrée correspondant au Fer  $\gamma$ , avec une vitesse d'échauffement égal  $16^\circ\text{C}/\text{min}$ .

- b. Maintien pendant 20 minutes à 960°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).

### IV.3.4 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 suit, nous donnons le détail de chaque opération.

#### ➤ Enrobage :

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



Figure IV.09 : 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].

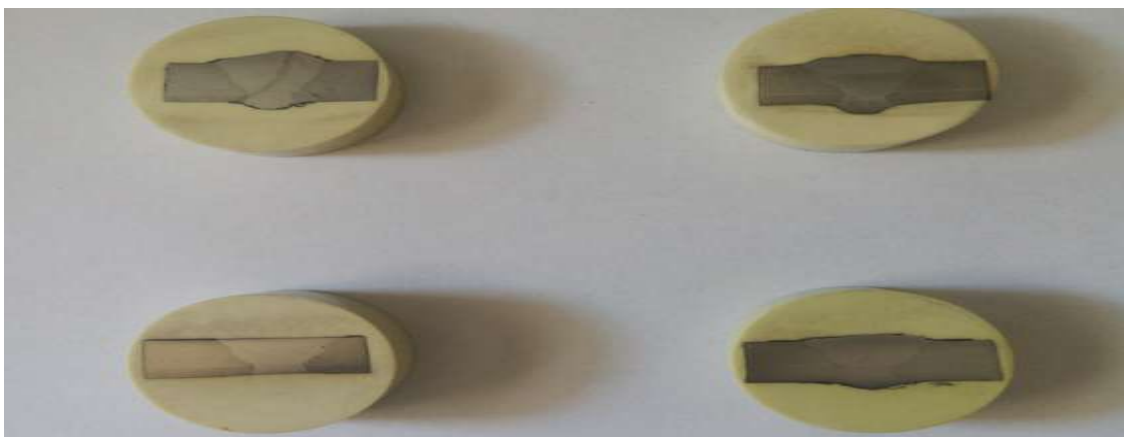


Figure IV.10 : Les échantillons après l'enrobage

### ➤ 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 granulométrie des grains abrasif 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'adition de la pate 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].

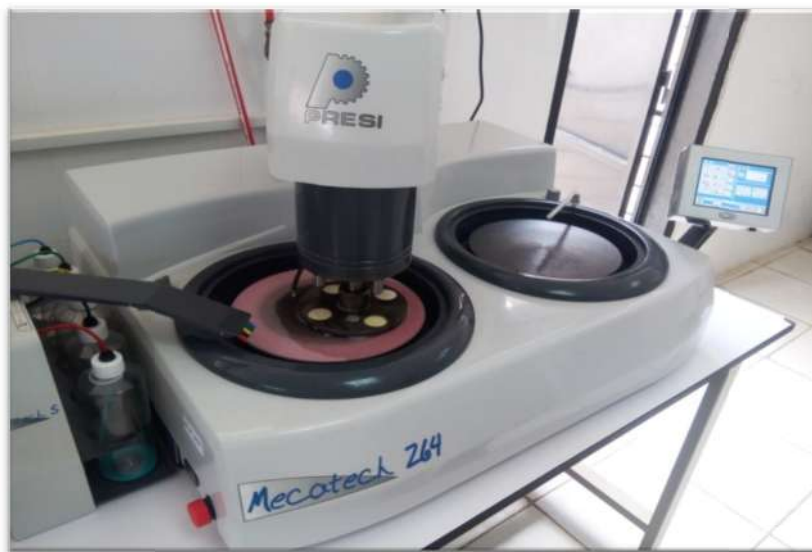


Figure IV.10: Polisseuse au niveau de CRTI.

### ➤ 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 utilisé 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].

### IV.3.5. 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].

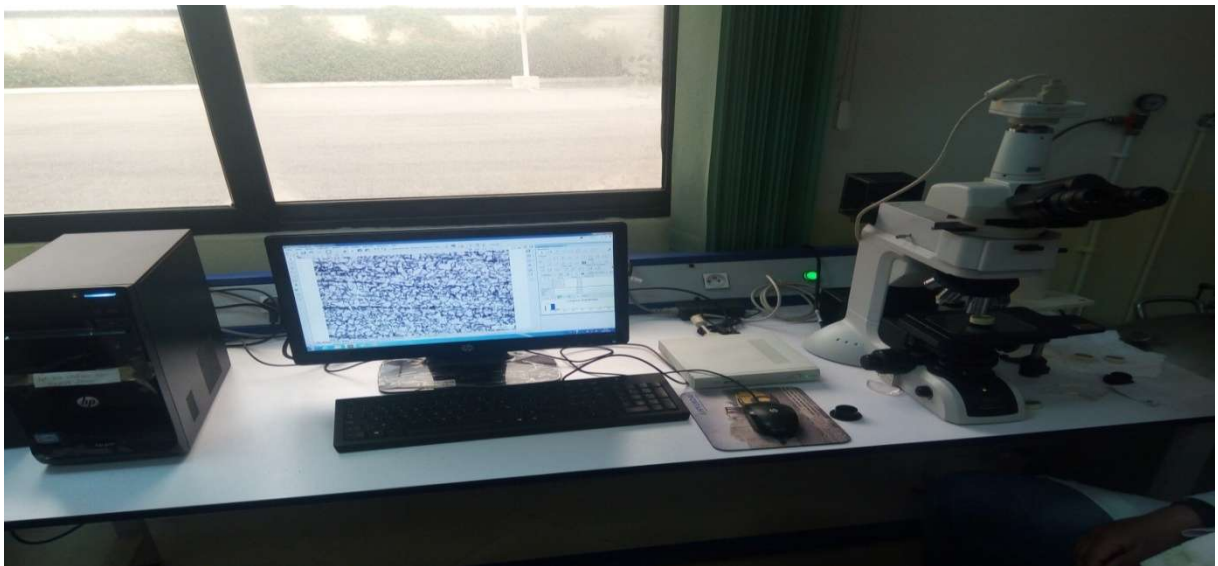


Figure IV.11: Microscope optique au niveau de CRTI.

### IV.4 Caractérisation mécaniques :

#### IV.4.2 Essai de traction :

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

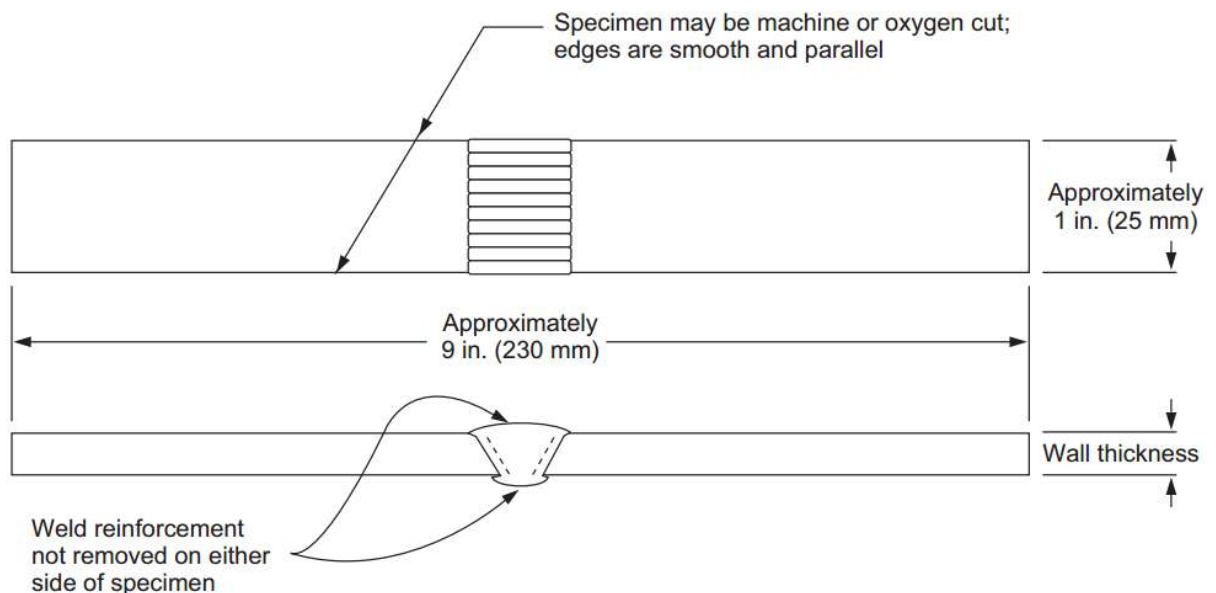


Figure IV.12 : Dimension de l'éprouvette de traction [33].

##### ➤ 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.

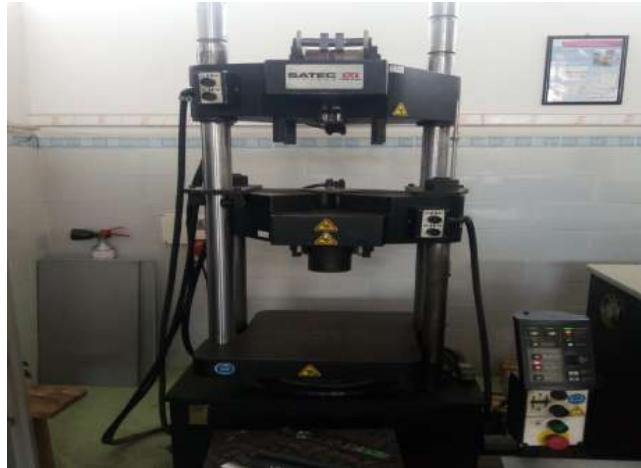


Figure IV.13 Machine de traction au niveau de CRTI.

### IV.4.3 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 [29].

#### ➤ Echantillons :

Les échantillons que l'on va utiliser pour effectuer les essais sont des échantillons normalisés C'est à dire que leurs caractéristiques sont indiquées par une norme. Pour réaliser l'essai, il est nécessaire de faire une entaille normalisée [30].

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

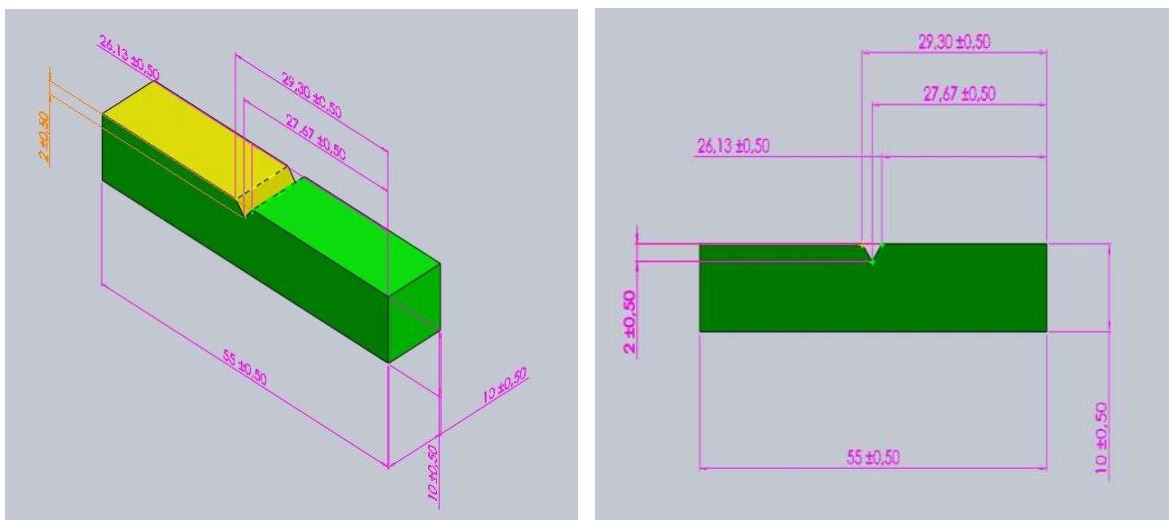


Figure IV.14 : échantillons de résilience.

### ➤ Exécution de l'essai :

Un marteau de masse  $m$  est fixé à l'extrémité d'un pendule (Figure IV.04). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette 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 IV.15: Machine d'essais de résilience au niveau de CRTI

### IV.4.4 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 :

$$Hv = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

$F$  : Niveau de la charge appliquée.

$d$  : Diamètre de l'empreinte. [31].

### ➤ Eprouvettes :

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des 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'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à, l'écrouissage. L'épaisseur de l'éprouvette 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 [29].

### ➤ 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 IV.16 : Appareils de mesure de dureté au niveau de CRTI

### IV.4.5 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. [32]

#### ➤ 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 IV.17 Eprouvettes de pliage



Figure IV.18 Machine d'essais de pliage (CRTI)

### IV.5 Résultats Et Discussion

#### IV.5.1. Evolution de la microstructure:

L'analyse micrographique suivante permet d'étudier les microstructures du matériau de base avant et après les trois traitements :

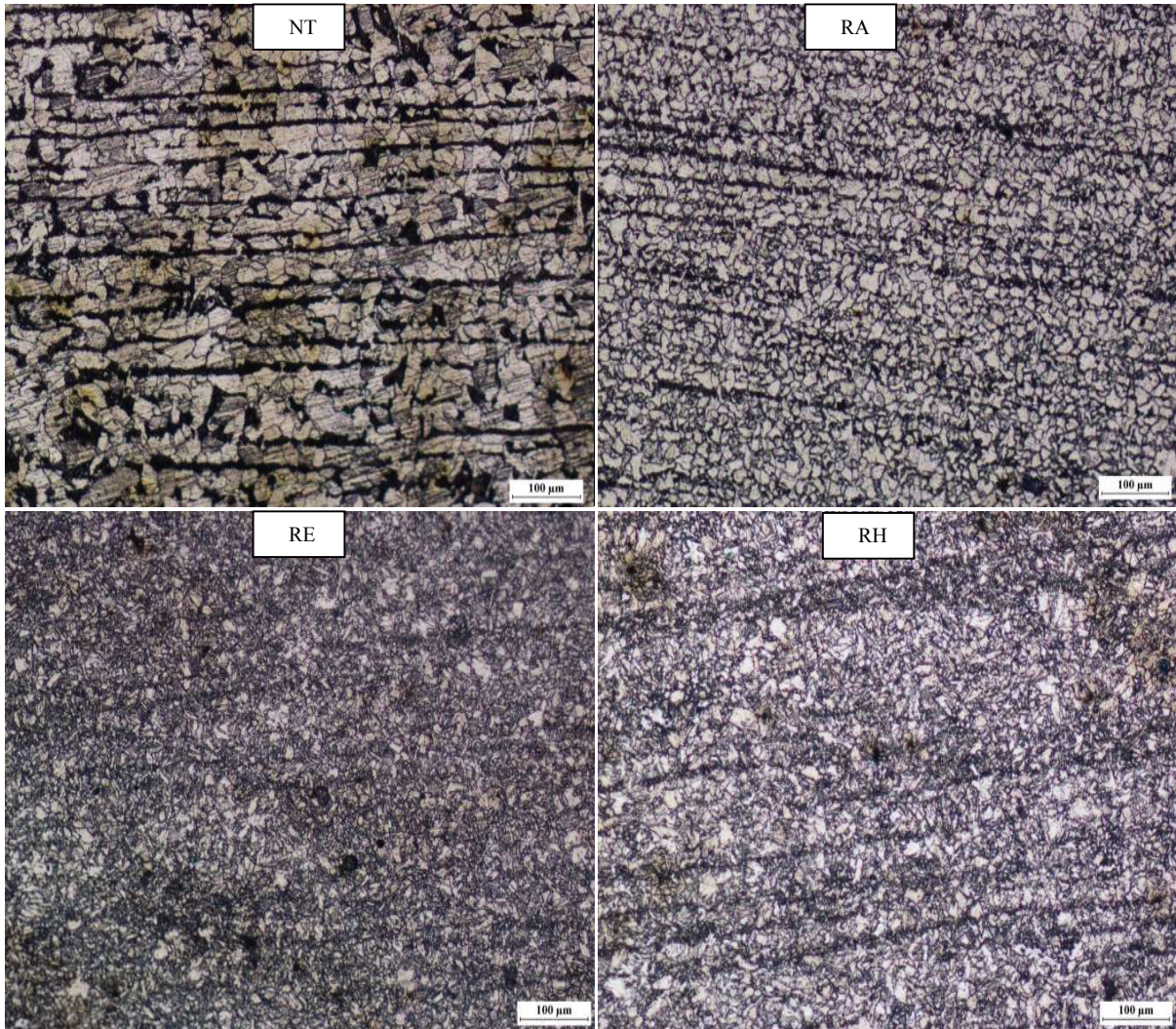


Figure IV.19 les microstructures du matériau base (MB) avant et après traitements.

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 tremp 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 alliés, en examinant le diagramme (Fe-C) en parallèle avec les températures maximales atteintes dans un joint soudé.

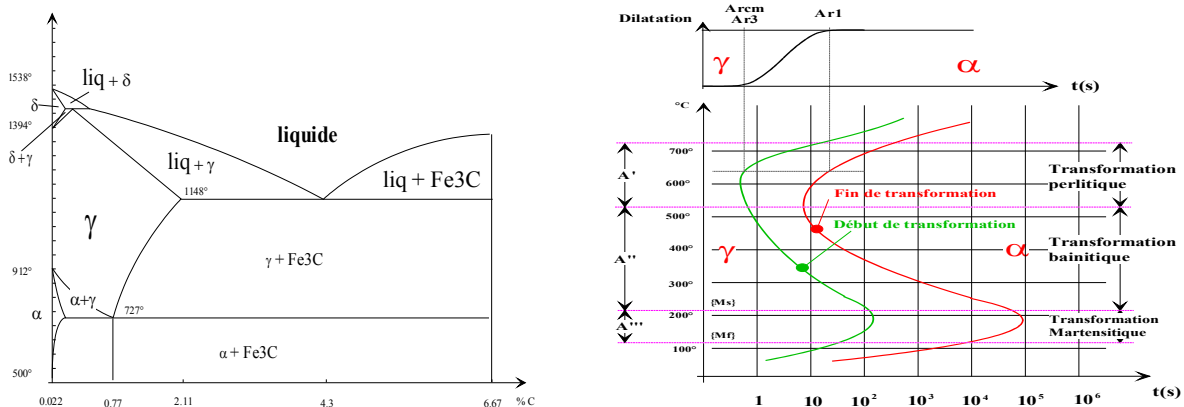


Figure IV.20 Schématisation du diagramme d'équilibre (à gauche) et diagramme TTT (à droite) pour le système binaire Fe-C

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 l'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 différents milieux. Malgré l'austénitisation (960°C) englobant 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.

On peut distinguer trois états :

- Trempe à l'huile : Dans le matériau de base, il s'agit d'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 transformée 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 multiphasée constituée principalement de : la ferrite, la bainite et de martensite.

## Chapitre IV : Partie expérimentale

---

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

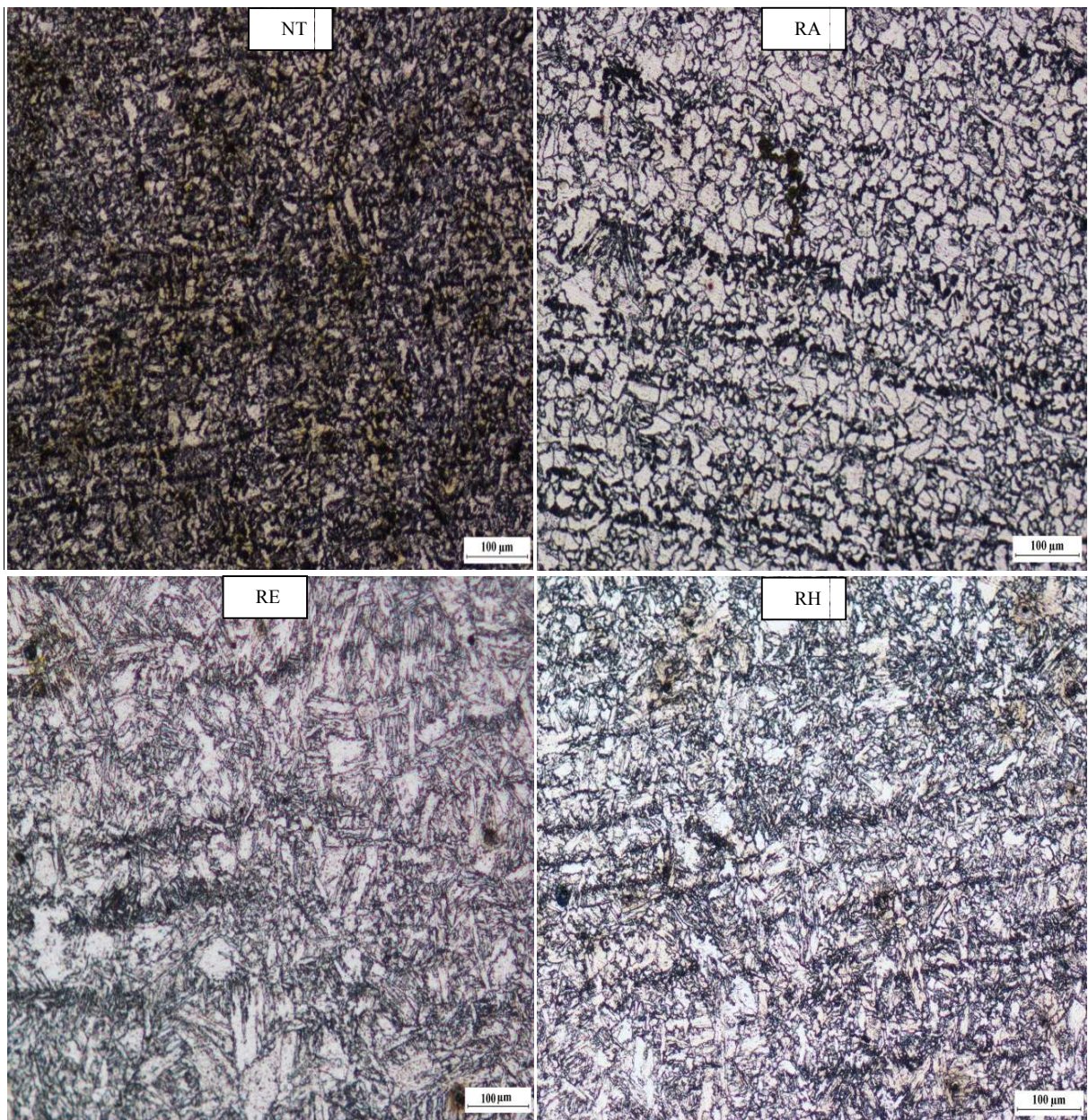


Figure IV.21 les microstructures de la zone affectée thermiquement avant et après traitement (ZAT).

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

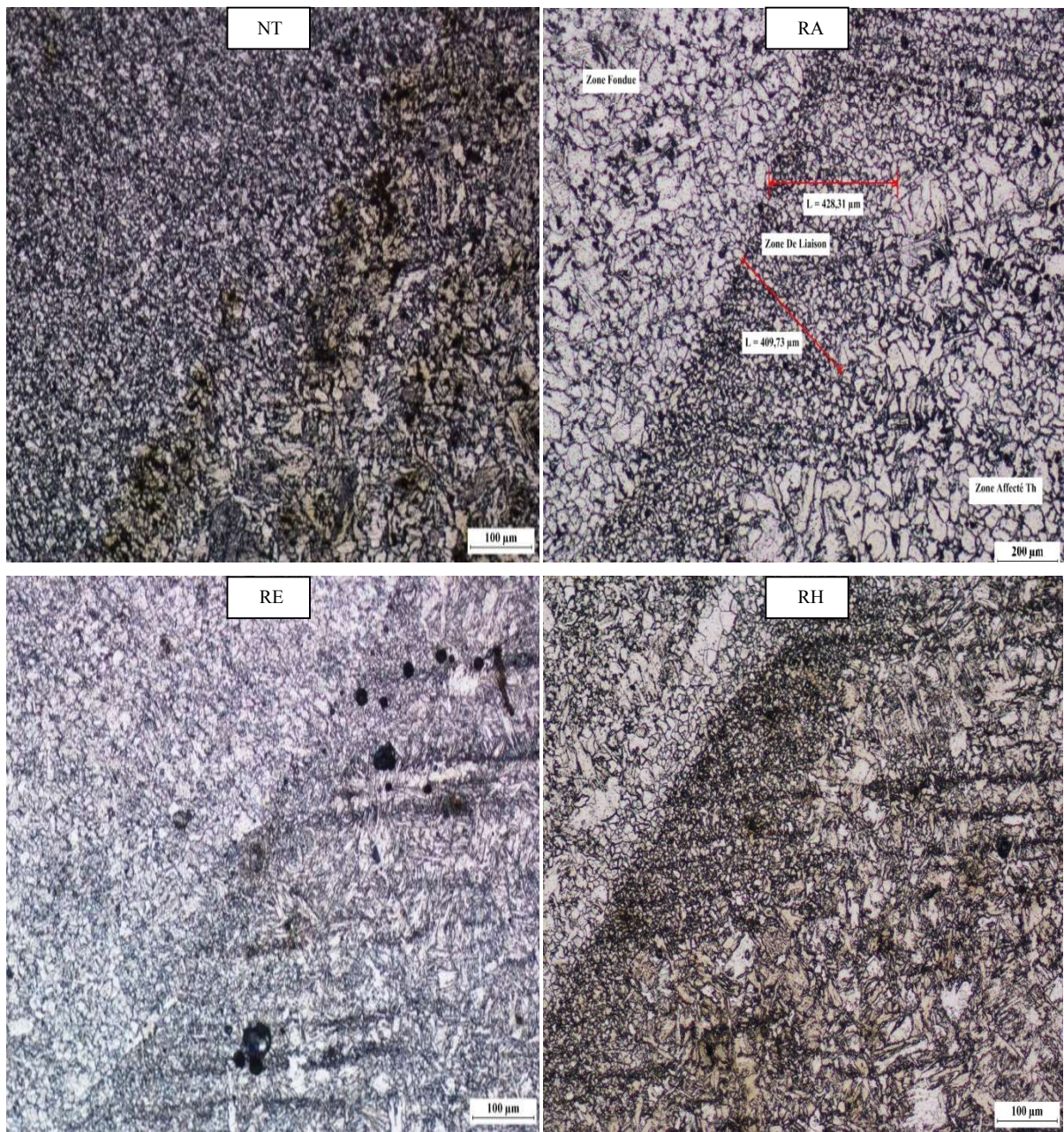


Figure IV.22 les microstructures des zones de la soudure (ZAT, ZL, ZF).

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

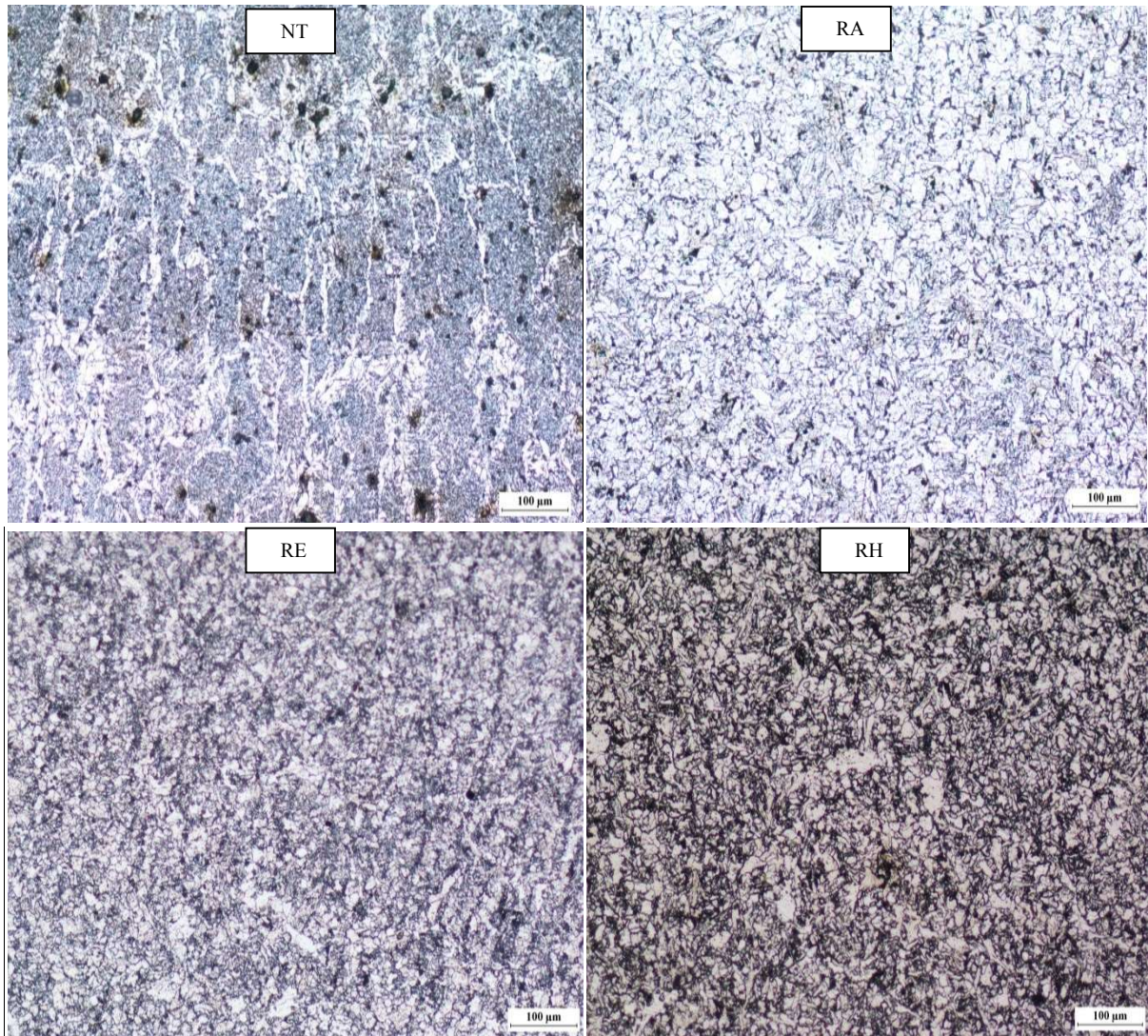


Figure IV.23 les microstructures de la zone fondue (ZF) avant et après traitements.

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'apparaissions 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 zone fondue du (RE) est plus grande que celle du matériau de base (RE). Portant l'influence des

éléments d'addition est légèrement faible dans (RA) car la cinétique de la trempe est très lente par rapport (RE) et (RH).

### IV.5.2 Dureté :

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

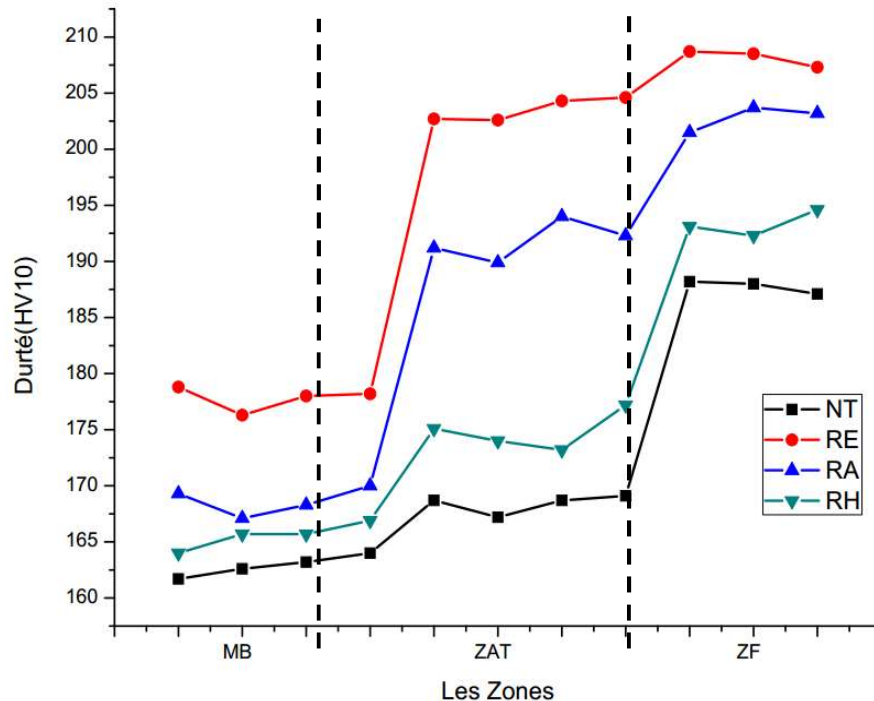


Figure IV.24 les courbes de dureté.

#### ➤ 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 (MB), (ZAT) et (ZF) (Figure IV.24).

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) a une grande dureté par rapport les autres traitements, cela est relié au la dominance de la phase martensitique dans (RE).
- La dureté dans le graphe (RA) a subit une diminution par rapport les échantillons traités puisqu'il comprend de microstructure combinée principalement de trois phases (ferrite, bainite, et martensite).

### IV.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 IV.25). Les caractéristiques conventionnelles sont reportées dans le tableau ci-dessous :

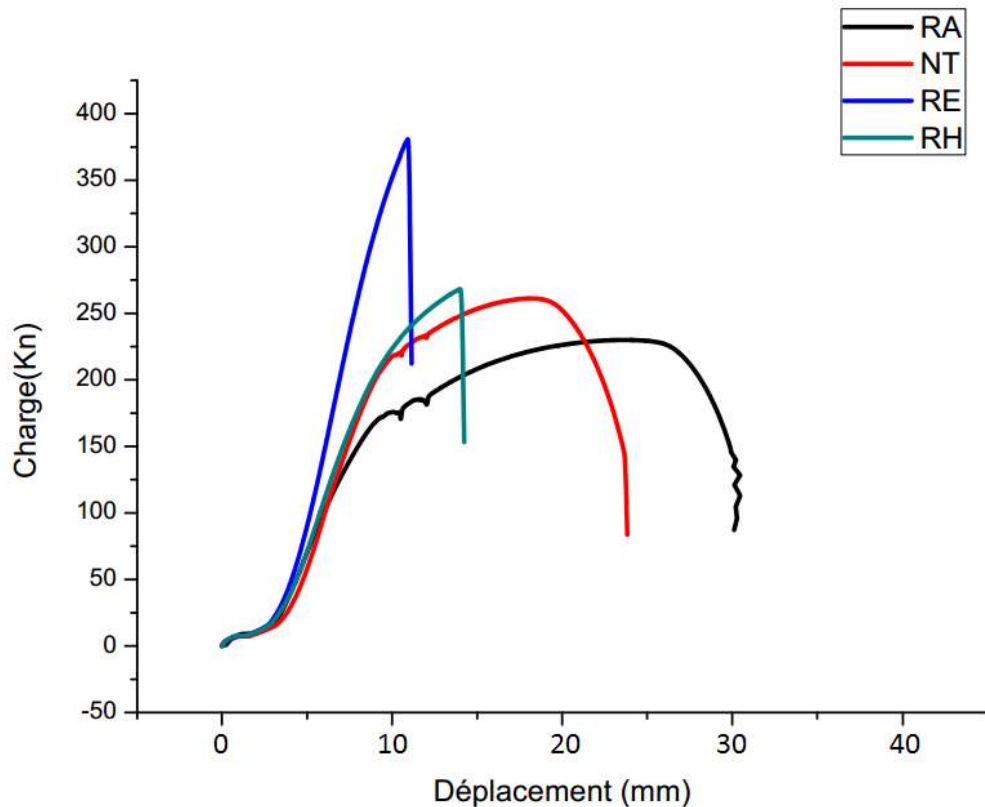


Figure IV.25 Les courbes de traction.

#### ➤ Discussion des résultats :

Les résultats des essais des tractions sont représentés par des courbes (Figure IV.25), dont l'allure générale des traitements du trempé laisse apparaître une élévation dans Re et Rm avec une baisse de la déformation totale du traitement par rapport l'état non traité.

La (Figure IV.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.

### IV.5.4 Résilience :

L'histogramme suivant exprimé l'énergie de rupture pour chaque éprouvette :

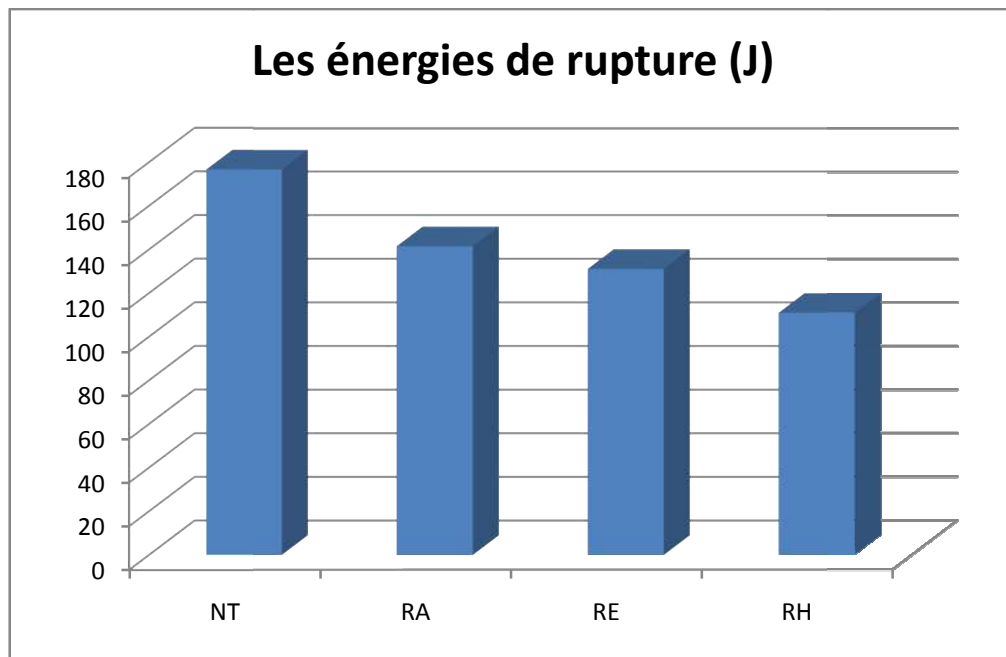


Figure IV.26 Les énergies de rupture exprimées en joule.

#### ➤ 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 IV.26), 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.

### IV.5.5 Pliage :

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

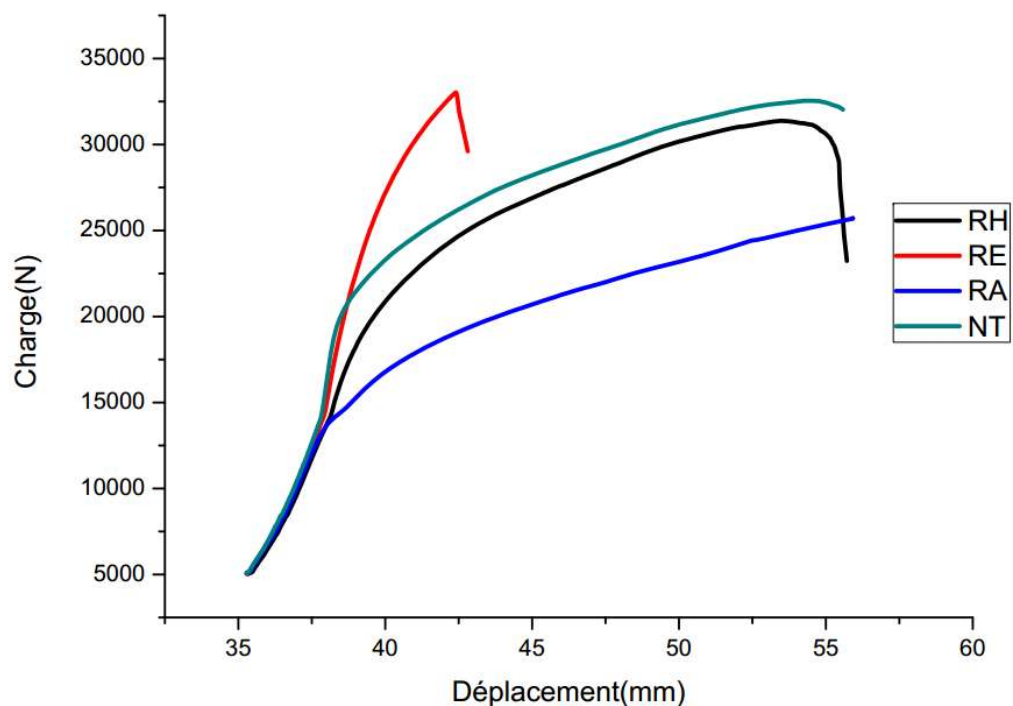


Figure IV.27 : Les courbes de pliage

#### ➤ Discussion des résultats :

Enfin, 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

---

## Conclusion Générale Et Perspectives

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 défini 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 trempage 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.

## Conclusion Générale

---

- 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 à une température inférieure 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 multiphasé constitué 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).

### **Perspective :**

Ce travail ne constitue qu'une modeste contribution à la compréhension des différents phénomènes rencontrés lors du soudage SMAW de structures métalliques en acier X70. Afin de compléter nos résultats, plusieurs directions d'études pourraient être suivies. A ce jour, deux principales voies peuvent être envisagées:

- Introduire le traitement de revenu après trempe à l'air pour réduire l'effet fragilisant de la trempe et donc améliorer la ténacité et la plasticité des soudures
- vérifier les cycles thermiques lors du soudage (par thermocouples, infrarouge...etc) pour estimer la longueur de la ZAT et prévoir les caractéristiques métallurgiques, comportements mécaniques et les aspects thermomécaniques des soudures.

## Conclusion Générale

---

- Travailler à l'échelle microscopique moyennant des caractérisations métallographiques plus fines (MEB, microsonde et TEM) afin d'identifier avec précision les différentes phases en présence et corrélérer la structure métallurgique au comportement vis à vis des essais de fatigue des interfaces soudées. L'utilisation des traitements thermiques à des temps de maintien plus élevés sera souhaitable afin de quantifier l'influence de ce paramètre sur la morphologie et la structure cristalline des cordons de soudure.
- Étudier le comportement électrochimique des cordons de soudure dans des milieux assez agressifs et corrélérer la structure métallurgique au comportement vis à vis de la corrosion des interfaces soudées.

## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [1] - MOUSSAI A. Toufik "Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des cordons de soudure", Université de M'sila, Mémoire Magister 2004.
- [2] - P.GROSTABUSSIAT Sophie, "Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux", INSA Lyon, Décembre 2000
- [3] - H.Granjon, "Bases métallurgiques de soudage", publications de soudage et de ses applications 1995.
- [4] - R.Baus. W, Chaprau, "Application de soudage aux constructions" ,1979.
- [5] - [www.soudage.com](http://www.soudage.com)
- [6] - R.Baus. W, Chaprau, Application de soudage aux constructions ,1979.
- [7] - V.RYBARCOV, « le soudage et le coupage des métaux».2eme edition.1983.edition mir.moscou.
- [8] - BENEDDEB Mostefa, "Étude les défauts de soudage des pipelines", Mémoire de Master, Université de Biskra 2012.
- [9]- B. Hichem, "Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers", Juin 2013
- [10] - Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; [www.angers.ensam.fr](http://www.angers.ensam.fr)
- [11] - [www.technique-injénieur.com](http://www.technique-injénieur.com).
- [12] - G.Beranger, G.Henry, G. Sanz. « livre de l'acier »,ED.Sollac, 1996.
- [2]: B. Zouidja, "Caractérisation mécanique et microstructurale d'un cordon soudure pour un acier X60 destiné à l' installation des hydrocarbures", Université Laghouat ,2012
- [13] - K. Hulka, "HSLA large diameter pipe plate from standard production to X80/X100", Niobium Information 13/39, 1997
- [14] - "High strength structural and high-strength lowalloy steels", Metals Handbook, Tenth edition, 1990.
- [15] - NOUREDDINE Mustapha, "Évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques de l'acier HSLA- x70 lors des réparations par soudage".
- [16] - Michel Colombié, "Matériaux Métalliques", Dunod. Paris, 2008.

## Références bibliographiques

---

- [17] - NOUREDDINE Mustapha, "Évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques de l'acier HSLA- x70 lors des réparations par soudage".
- [18] - BENEDEB Mostefa, "Étude les défauts de soudage des pipelines", Mémoire de Master, Université de Biskra 2012.
- [19] - HANIFA Marouf, "Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure NAXTRA70", Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou 2012.
- [20] - BERNARD Barthélémy. "Notions pratiques de mécanique de la rupture", Eyrolles 1980.
- [21] - Documents Yamani Institute of Technology, <http://www.yamani-institute.com/>
- [22] - Documents Technique COSIDER Biskra 2012.
- [23] - Document des défauts de soudage.
- [24] - ZAOUI Moussa, "Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées" Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2009.
- [25] - RAYMOND Langevin, Rémi Desgagnés, "Guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique", PERFORM (ISBN 978-2-922946-17-8) 2015.
- [26] - BENZAADA Said "traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes", Université de Biskra, 2003.
- [27] - ARFAOUI Ali, CHAKER Med Amir, "Matériaux Métalliques", ISET Kasserine 2010.
- [28] – DAHMOUNE Boukhalfa Sami, " Etude du comportement mécanique et métallurgique des soudures des aciers à hautes limites élastiques HSLA ", Université de Blida 2014.
- [29] - <https://www.technologuepro.com/cours-proprietes-des-materiaux/chapitre-1-caracterisation-mecanique-des-materiaux.pdf>
- [30] - <http://www.cours-et-exercices.com/2016/04/essai-de-resilience-les-essais.html>.
- [31] - OULBANI Said, "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.
- [32] - D. François, "Essais Mécaniques des Métaux- Détermination des lois de Comportement", Techniques de l'Ingénieur ,2004.
- [33] - API Standard 1104, Twenty-first edition, September 2013.
- [34] - PHILIP Claude, "Traitements des assemblages soudés", ENSAM (CER de Bordeaux)