

Liste des abréviations

SMAW : soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

U_0 : tension à vide du générateur.

TIG : soudage tungstène Inert Gas.

HF : haute fréquence.

Lift-arc : amorçage Par contact.

E_1 : l'énergie linéaire de soudage (J/mm).

I : intensité de soudage en ampères (A).

U : tension de soudage en volts (V).

v : vitesse d'avance de l'arc électrique(mm/s).

ZF : zone de fusion.

ZL : zone de liaison.

ZAT : zone affectée thermiquement.

MB : métal de base.

ZFP : zone de fusion partielle.

t_r : température de refroidissement.

V_r : vitesse de refroidissement.

I.I.S : l'Institut International de Soudure.

IRSID : l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française.

F : force en newton (N).

S_0 : section initiale d'éprouvette de traction normalisée (mm²).

S_u : section minimale après rupture.

L_0 : longueur initiale entre repères.

L_u : Longueur ultime après rupture.

L_c : longueur de la partie calibrée.

JIS: Japanese Industrial Standard.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

V_{MAX} : La vitesse maximale de l'essai de traction (mm/mn), ou (N/mm²/s).

Skin-pass : laminoir destiné à donner à la tôle sa planéité, ses caractéristiques mécaniques, et son état de surface.

R_e : La limite d'élasticité en (MPa).

ReL : La limite d'élasticité inférieure en (MPa).

Ap : l'allongement en %.

σ_{\max} : Contrainte maximale.

σ_{\min} : Contrainte minimale.

TTT : Température, Transformation, Temps.

CFC : Cubique Face Centrée.

FC : Face Centrée

E : Module de Young du matériau.

Rm : La contrainte maximale à la rupture.

Re : La contrainte élastique.

Z : la résistance à la striction.

K : résilience.

A : ductilité.

H : dureté.

γ : Phase austénitique.

α : Phase ferritiques.

ε : Phase martensitique.

ASME: American Society of Mechanical Engineers.

EE : soudage a l'électrode enrobé.

Tt : température de trempe.

Tr : température de revenu.

RE : refroidissement à l'eau.

RA : refroidissement a l'air.

RH : refroidissement à l'huile.

HRC : dureté Rockwell type C.

A% : l'allongement.

SOMMAIRE

- i. Remerciements
- ii. Dédicaces
- iii. Résumé
- iv. ملخص
- v. Abstract
- vi. Liste des figures
- vii. Liste des tableaux
- viii. Liste des notations
- ix. Introduction générale

Chapitre1 : Généralités sur le soudage à l'arc

1. Introduction	2
2. Histoire de soudage	2
3. Définition de soudage	3
4. Soudage à l'arc électrique.....	4
4.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	4
4.1.1. Définition	4
4.1.2. Principe du procédé	5
4.1.3. Définition de l'électrode enrobée.....	5
4.1.4. Rôle de l'enrobage	6
4.1.5. Différents types d'enrobage.....	6
4.1.6. Avantages et inconvénients	7
4.2. Soudage TIG (GTAW)	7
4.2.1. Définition	7
4.2.2. Générateurs et méthodes d'amorçage	8
4.2.3. Les différents courants	9
a) Courant continu	9
b) Courant continue pulsé	10
c) Courant alternatif.....	11
4.2.4. Electrodes utilisées	11
4.2.5. Les gaz de protection	13
4.2.6. Paramètres de soudage	13
a) Pour les aciers et aciers inoxydables	13
b) Pour les aluminiums et alliages	13
4.2.7. Avantages et inconvénients	13
5. Métallurgie de soudage	14
5.1. Introduction.....	14
5.2. Les aciers	14
5.2.1. Définition de l'acier	14

5.2.2.	Classification des aciers.....	15
a)	Les aciers ordinaires ou aciers au carbone	15
b)	Les aciers de traitements thermiques.....	16
c)	Les aciers à outils	16
d)	Les aciers inoxydables	16
5.3.	Soudabilité des métaux	17
5.3.1.	Introduction.....	17
5.3.2.	Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage.....	17
a)	Quantité de chaleur transférée	18
b)	Température initiale de la pièce	18
c)	Vitesse de refroidissement du métal	18
d)	Température atteinte dans la ZAT	18
e)	Énergie linéaire.....	19
5.3.3.	Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés.....	19
5.3.4.	Définition de la zone affectée par le cycle thermique de soudage	21
a)	La zone fondue (ZF)	21
b)	La zone de liaison (ZL) ou zone de fusion partielle (ZFP)	22
c)	La zone affectée thermiquement (ZAT)	22
d)	Interface ZF/ZFP	22
e)	Le métal de base	22
f)	La zone non mélangée.....	22
5.4.	Cycle thermique de soudage.....	22
6.	Conclusion	25

Chapitre2 : Propriétés mécaniques des matériaux

1.	Propriétés mécaniques des matériaux	26
1.1.	Introduction	26
1.2.	Fragilité	26
1.2.1.	Définition	26
1.2.2.	Factures influençant la fragilité	26
1.3.	Ductilité	27
1.3.1.	Définition	27
1.3.2.	Condition de ductilité	27
1.4.	Ténacité	28
1.4.1.	Définition.....	28
1.4.2.	Détermination expérimentale	28
1.5.	Malléabilité	29
	Définition	29
1.6.	L'élasticité.....	29
	Définition	29

1.7. Dureté	30
1.7.1. Définition	30
1.7.2. Processus de mesure de la dureté.....	30
2. Essais mécaniques	30
2.1. Introduction	30
2.2. Essai de traction	31
2.2.1. Définition	31
2.2.2. Description générale d'une machine de traction	32
2.2.3. Les éprouvettes	32
2.2.4. Prélèvement de l'éprouvette	33
2.2.5. Dimension des éprouvettes	33
2.2.6. Principe de l'essai	34
2.2.7. Exploitations de l'essai	34
a) Interprétation qualitative.....	34
b) Le Processus thermomécanique.....	35
c) Influence de la température	36
d) Limite d'élasticité	36
e) Module de Young	38
2.3. Essais d'indentation	38
2.3.1. Définition	38
2.3.2. Essai de Macro dureté	39
a) Essai Vickers	39
b) Essai Brinell	40
c) Essai Rockwell HRC	41
3. Conclusion	42

Chapitre3 : traitements thermiques des aciers

1. Introduction	43
2. Cycle d'un traitement thermique	43
2.1. Chauffage des pièces	44
2.2. Refroidissement des pièces	45
2.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone	45
3. Traitements thermiques des soudures	46
3.1. Introduction	46
3.2. Modes de mise en œuvre	47
3.2.1. Traitement global	47
3.2.2. Traitement local simultané	47
3.3. Gammes des traitements thermiques	48
3.4. Trempe	48
3.4.1. Technologies de chauffe	49
3.4.2. Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe	50
3.4.3. Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations de phases ..	50

3.4.4. Choix du milieu de trempe	50
3.5. Le revenu	51
3.5.1. L'objectif du revenu	51
3.5.2. Différents types de revenu	52
a) Revenu de relaxation ou de détente	52
b) Revenu de structure ou classique	52
c) Revenu de durcissement.....	52
3.5.3. Cycle thermique du revenu.....	53
3.5.4. Transformations structurales au cours du revenu	53
4. Conclusion	54

Chapitre4 : Partie expérimentale

1. Introduction	55
2. Métal de base	55
2.1. Métal de base	55
2.2. Métaux d'apport	56
3. Procédure de soudage	56
3.1. Préparation des tôles.....	56
3.2. Paramètres de soudage	57
3.3. Exécution des joints soudés	58
3.4. Découpages des éprouvettes	59
4. Traitement Thermique	60
4.1. Cycle de traitement effectué	60
4.2. Etapes de traitement thermique	60
4.2.1. Trempe	60
4.2.2. Revenu	61
5. Polissage	62
6. Caractérisations mécaniques	62
6.1. Essai de traction	62
6.1.1. Eprouvettes de traction	63
6.1.2. Exécution de l'essai	63
6.2. Essai de dureté	64
6.2.1. Eprouvettes	64
6.2.2. Exécution de l'essai	64
7. Conclusion	65

Chapitre5 : Résultats et discussions

1. Introduction	66
2. Résultat d'essais de traction	66
2.1. Caractérisation des soudures	66
2.2. Effets de milieux de la trempe sur le comportement mécaniques des pièces soudées	67

a. Epreuve de soudure EE.....	67
b. Epreuve de soudure TIG	68
c. Conclusion.....	68
2.3. Effets des différents revenus sur le comportement mécanique des pièces soudées..	
.....	69
a. Epreuve de soudure EE.....	69
b. Epreuve de soudure TIG	71
3. Résultat d'essais de dureté	72
3.1. Effets de milieux de la trempe sur le comportement mécaniques des pièces soudées	
.....	72
3.2. Effets des différents revenus sur le comportement mécanique des pièces soudées	
.....	73
4. Conclusion.....	74
Conclusion Générale.....	75
Références bibliographie	

Introduction générale

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés et les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différentes 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 l'amélioration ou l'obtention des propriétés jugées importantes vis à vis des conditions de service, ou d'élimination ou simplement la réduction des contraintes résiduelles.

Le but de notre travail est l'étude du comportement des pièces en acier S235JR soudées et traitées afin de déterminer le type de traitement adéquat pour une utilisation rationnelle des pièces en question et la vulgarisation dans le domaine industriel.

L'étude illustrée dans ce mémoire se compose de cinq chapitres :

- Le premier chapitre : généralités sur le soudage à l'arc,
- Le deuxième chapitre : Propriétés mécaniques des matériaux,
- Le troisième chapitre : traitements thermiques des aciers,
- Le quatrième chapitre : étude expérimentale a été réalisée ;
 - Assemblages de pièces par soudage en EE et en TIG,
 - Traitements thermiques et des essais de traction et de dureté.
- Le cinquième chapitre : présentation des différents résultats,
- Conclusion générale.

Chapitre 1

Généralités sur le soudage à l'arc

1. Introduction

Les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire révolution. Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblage à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle, le soudage a compté parmi les modes d'assemblage les plus répandus en industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique tel que : les bateaux, trains, aviation, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. [1]

2. Histoire du soudage

Avant la naissance du soudage au 19^{ème} siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux s'est fait par forgeage. Les premières techniques utilisaient l'électricité comme source d'énergie tel que le soudage à l'arc en acier jusqu'à l'invention d'arc enrobé en 1904 ou soudage par résistance. Dans la même période, l'arrivée de l'oxyacétylénique utilisant l'acétylène et l'oxygène (soudage au gaz) pour produire une flamme aller jusqu'à 3100°C permet de constituer un joint entre les parties à souder après la solidification du bain de fusion. [2]

En 1930, l'arrivée du soudage à électrode fusible facilite l'automatisation de dévidage, surtout ce qui concerne le soudage à l'arc submergé. Dès 1940, les scientifiques d'États-Unis ont essayé de protéger l'arc par un gaz inerte dont ils sont réussis à amorcer l'arc sans fusion de l'électrode de tungstène (sans matériau d'apport), le procédé est appelé TIG (Tungstène Inert Gas). Le procédé MIG (Métal Inert Gas) est apparu quelques années plus tard en 1950, il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continue et l'argon ou l'hélium comme gaz de protection, dont leur remplacement par CO₂ donne la naissance du procédé MAG (Métal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons en 1958, permet de réaliser une pénétration étroite et profonde, vient associer avec le procédé laser en 1980, le soudage devenu majoritaire à côté du rivetage. [2]

3. Définition du soudage

Le soudage consiste à assembler deux pièces en réalisant la continuité de la matière qui les compose. Le joint qui en résulte est la soudure.

Le soudage est dit autogène lorsque les bords adjacents des pièces sont portés à fusion et participent à la formation du joint. Il est souvent nécessaire, pour former le joint soudé, d'ajouter au métal de base un métal d'apport, identique au précédent ou différent, mais de toute façon étranger au métal de base. Le métal d'apport et le métal de base doivent pouvoir former un alliage. [3]

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

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

Certains procédés de soudage ont donné naissance à des techniques connexes fortes importantes telles que le coupage thermique (coupage aux gaz ou oxycoupage, coupage à l'arc au plasma), le soudobrasage et la métallisation (aux gaz, à l'arc, au plasma). Ces techniques utilisent les mêmes sources d'énergie que le procédé de soudage dont elles dérivent et nécessitent l'usage de matériels analogues. [3]

4. Soudage à l'arc électrique

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

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

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

4.1.1. Définition

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur (U_0) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts. [21]

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

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

4.1.2. Principe du procédé

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder. Le Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW), et illustré sur la figure 1.1.

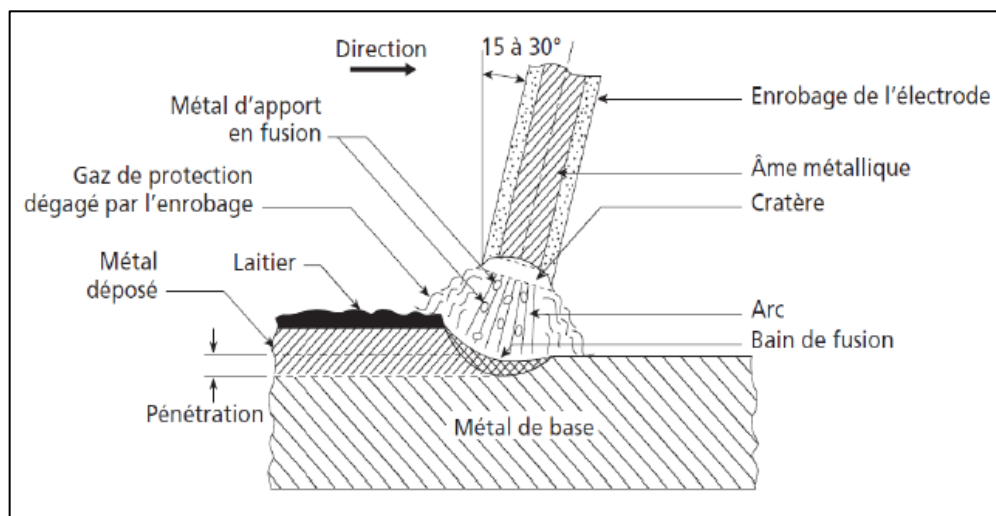


Figure 1.1 : Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). [4]

4.1.3. Définition de l'électrode enrobée

L'âme : fil métallique plein de nature voisine du métal de base (aciers non alliés et inoxydable), exception pour le soudage des fontes (âme en Ni).

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

La figure 1.2, représente les composants d'électrode enrobée.

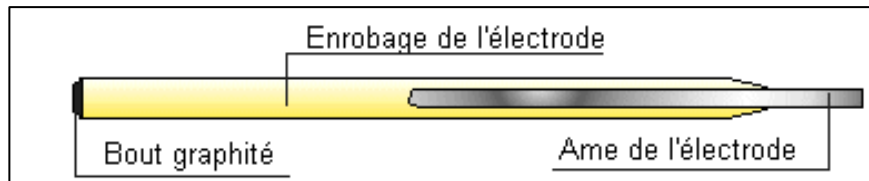


Figure 1.2 : Composant de l'électrode enrobée

4.1.4. Rôle de l'enrobage

- Rôles mécaniques : La fusion de l'enrobage a un certain retard sur celui de l'âme ce qui crée un cratère qui guide l'arc. La solidification du laitier en premier permet le maintien du banc (coffrage) donc possibilité de souder en position. La volatilisation d'une partie de l'enrobage crée un souffle sur le bain de fusion, cela permet les soudures au plafond.
- Rôle métallurgique : Protection contre l'oxydation, Désoxydant du bain de fusion, compensation de la volatilisation, apport d'éléments, Diminution de la vitesse de solidification et de refroidissement.

4.1.5. Différents types d'enrobage

Le tableau 1.1 : représente les différents types d'enrobage.

Symbole	Désignation	Caractéristiques et utilisation
R	Enrobage rutile (la plus répandue)	<ul style="list-style-type: none"> - Polarité directe - Toutes positions sauf verticale descendante - Tps d'amorçage faible Laitier auto détachable - Bonne vitesse de fusion - Bonne caractéristique mécanique pour les aciers non alliés. - Deux fois moins cher que le basique.
B	Enrobage basique	<ul style="list-style-type: none"> - Polarité inverse - Electrodes à étuver donc risque de fissuration à froid faible. - Soudage en toutes positions sauf au plafond - Laitier dense et vitreux.
C	Enrobage cellulosique	<ul style="list-style-type: none"> - Polarité directe. - Soudages en toutes positions. - Forte pénétration. - Soudure subaquatique.
A	Enrobage acide	<ul style="list-style-type: none"> - Polarité directe. - Très bel aspect de cordon. - Soudage à plat uniquement (risque de fissuration si utilisée en d'autres position).

4.1.6. Avantages et inconvénients

- Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, et permet une grande autonomie avec l'équipement requis peu dispendieux.
- Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient ; le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire. [4]
- Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

4.2. SOUDAGE TIG (GTAW)

4.2.1. Définition

Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin. TIG est un acronyme de Tungstène Inert Gas, où Tungstène désigne l'électrode, Inert Gas c'est le type de gaz utilisé. L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de gaz rare tels que l'argon et l'hélium. De fait, l'arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l'arc s'appuie sur l'élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d'un courant électrique alternatif ou continu. [22]

Le soudage s'effectue le plus souvent en polarité directe (pôle - du générateur relié à l'électrode) pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivreux, titane, nickel...) sauf dans le cas des alliages légers d'aluminium ou du magnésium, où l'on soude en polarité alternée. Il n'est pas possible de souder en polarité inverse (pôle + relié à l'électrode) car cela détruirait cette électrode en la faisant fondre. [22]

La soudure TIG est une soudure de qualité, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur. Les domaines d'application les plus courants sont : L'aéronautique, L'automobile, La tuyauterie industrielle, et l'agroalimentaire.

La figure 1.3 ci-dessous représente le principe de soudage TIG ;

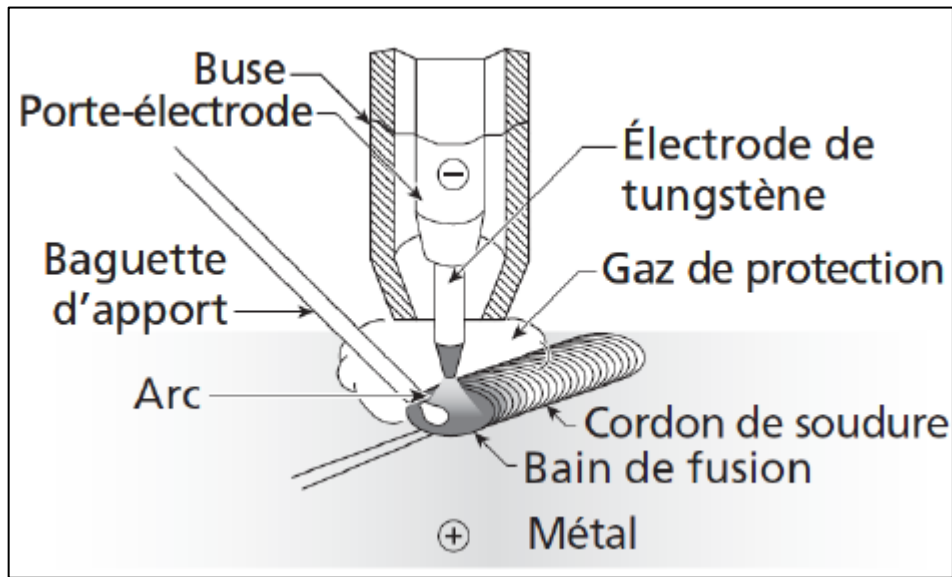


Figure1.3 : Principe du procédé TIG (GTAW). [7]

4.2.2. Générateurs et méthodes d'amorçage

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

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

- Par court-circuit (grattage manuel) : L'arc s'amorce en grattant l'électrode sur le matériau. Il est conseillé d'amorcer sur un cuivre afin d'éviter d'abîmer le tungstène et de contaminer la soudure.

4.2.3. Les différents courants

Le soudage des métaux dits « lourds » de type métaux ferreux, cuivre et alliage nickel ...) s'effectue en courant continu. Le soudage des métaux dits « légers » de type aluminium et alliages s'effectue en courant alternatif. [20]

a) Courant continu

L'arc électrique est alimenté par une source à tension continue. L'atmosphère inerte est assurée par de l'argon ; l'électrode réfractaire est en tungstène théorique, peuvent contenir des substances additionnelles. Dans ce cas, la substance utilisée est l'oxyde de thorium. Le courant continu peut fonctionner en deux polarités, directe ou indirect. [20]

- Polarité directe (- à l'électrode) : le sens électronique n'ayant pas changé c'est maintenant l'anode (+) qui est bombardée par les électrons émis par la cathode (-). On constate alors un échauffement anormal de l'électrode et la zone de fusion est dans ce cas très large et peu profonde, (figure1.4).

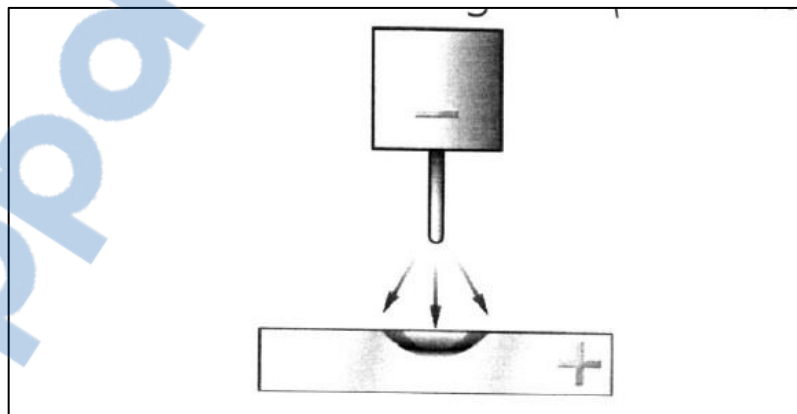


Figure1.4. Principe de courant continue, polarité directe. [20]

- Polarité indirecte (+ à l'électrode) : le sens électronique du courant allant du pôle - au pôle + à l'extérieur d'un générateur (à l'inverse du sens conventionnel du courant électrique), les électrons vont donc se déplacer de l'électrode (cathode) vers la pièce (anode) et bombarder celle-ci. Dans ce cas, la zone de fusion est profonde et étroite, (figure1.5).

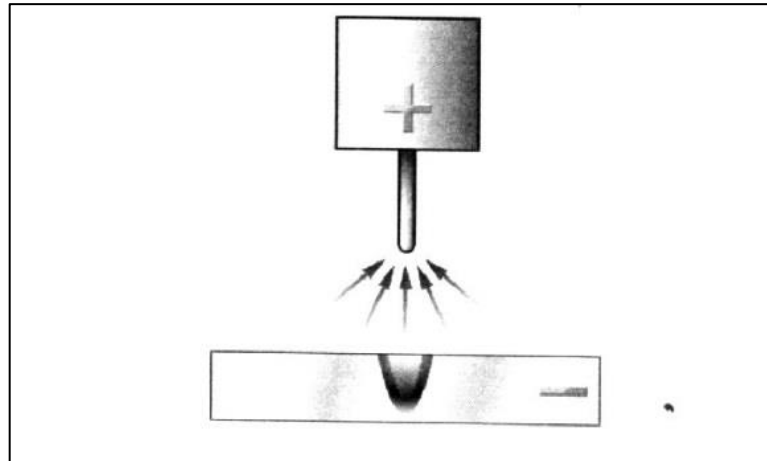


Figure1.5. Principe de courant continue, polarité indirecte. [20]

Pour le soudage des métaux lourds la polarité négative à l'électrode permet d'obtenir des cordons de soudure étroits et bien pénétrés.

b) Courant continue pulsé

Le courant pulsé est une variante du courant continu dont l'objet est de maîtriser l'énergie apportée à la pièce. Le courant pulsé engendre une succession de temps froids avec maintien de l'arc et de temps chauds (pics d'intensité, figure 1.6) qui assurent la pénétration.

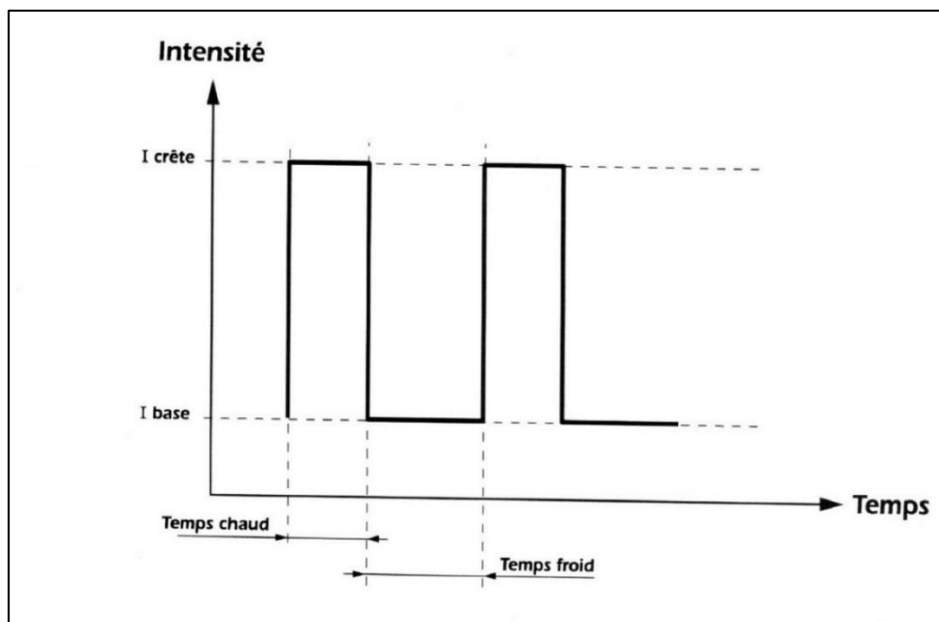


Figure1.6. Courbe temps intensité montrant le courant continu pulsé. [20]

c) Courant alternatif

L'arc électrique est alimenté par une source à tension alternative ; l'atmosphère inerte est assurée par de l'argon. Ce type de courant est utilisé spécialement pour le soudage d'aluminium, Lors de l'alternance de polarité, le jaillissement des électrons de la tôle vers l'électrode détruit la couche d'alumine protectrice. [20]

- A l'alternance suivante, la polarité inverse assure la pénétration comme il est illustré sur la figure 1.7.

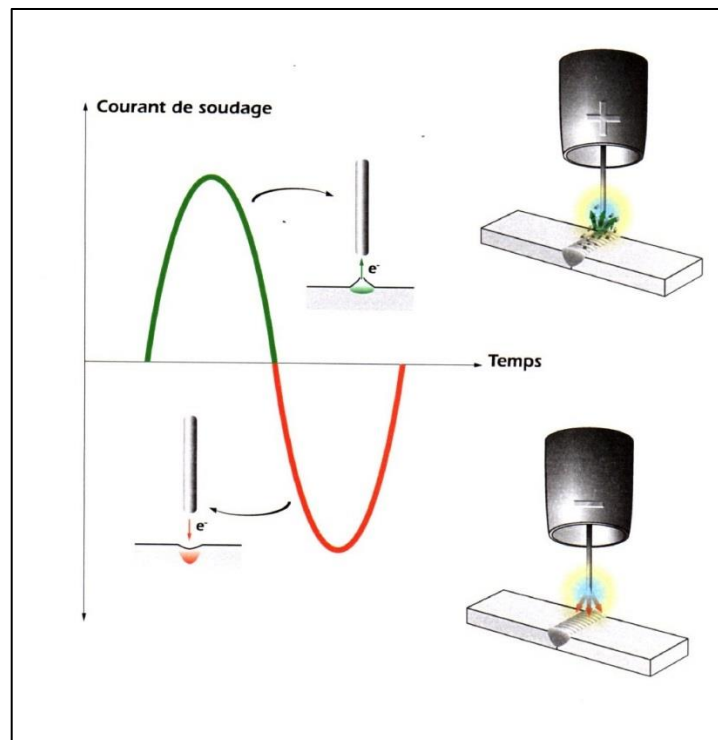


Figure1.7 : Principe de soudage TIG, courant alternatif. [20]

4.2.4. Electrodes utilisées

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

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

du thorium (ThO_2), du cérium (CeO_2), du lanthane (La_2O_3), du zirconium (ZrO_2) ou d'yttrium (Y_2O_3) finement dispersés dans la phase W.

- Pour le soudage de l'aluminium et ces alliages on trouve des électrodes en tungstène pur.
- Pour le soudage d'Acier, Inox en CC et intensité élevées on trouve des électrodes en Thorium.
- Pour le soudage d'Acier, Inox, Alu, titane, Nickel, Cuivre, Magnésium, en CC et CA on trouve des électrodes en Lanthane.
- Pour le soudage de l'aluminium et Magnésium en CA en fortes intensités et pour un arc très stables on trouve des électrodes en zirconium.
- Pour le soudage d'Acier, Inox, alliages de nickel, titane en faibles CC on trouve des électrodes en cérium.

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

- WTh 10 jaune : 0,80 à 1,20 % ThO_2 ,
- WTh 20 rouge : 1,70 à 2,20 % ThO_2 ,
- WTh 30 violet : 2,80 à 3,20 % ThO_2 ,
- WTh 40 orange : 3,80 à 4,20 % ThO_2 .

Tableau 1.2 : tableau des électrodes en tungstène pour le procéder de soudage TIG.

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

4.2.5. Les gaz de protection :

- **Argon** : Gaz inerte monoatomique, lourd, neutre, incolore et indolore, le plus utilisé, bon amorçage de l'arc électrique. [22]
- **Hélium** : Gaz inerte monoatomique, neutre, incolore et indolore, plus léger que l'air pour les alliages légers de fortes épaisseurs, cuivre et ses alliages. [22]
- **Hydrogène** : Gaz réducteur n'est jamais utilisé pur et il est généralement additionné pour former un gaz binaire ou ternaire avec l'argon ou l'hélium pour la protection endroit et l'azote pour la protection envers duplex, augmente la tension d'arc, l'apport de chaleur, augmente la vitesse de soudage et des valeurs de pénétration pour certains aciers martensitiques, ferritiques. [22]
- **Azote** : Gaz diatomique, paresseux, incolore et indolore. Ce gaz instable peut générer une instabilité de l'arc et une détérioration accélérée de l'électrode tungstène, Généralement utilisé pour la protection envers des aciers inoxydables du fait de son faible coût. [22]

4.2.6. Paramètres de soudage

a. Pour les aciers et aciers inoxydables :

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

b. Pour les aluminiums et alliages :

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

4.2.7. Avantages et inconvénients

- Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

- Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.
- La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.
- Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.
- Les défauts de soudures sont rares avec le procédé de soudage TIG.

5. Métallurgie de soudage

5.1. Introduction

Le succès d'un procédé soudage implique la notion fondamentale de continuité métallique des éléments à assembler. La mise en jeu de forces de liaison interatomiques de type métallique, cycle thermique de soudage, hors présence de corps étranger, est donc fondamentale. [23]

5.2. Les aciers

5.2.1. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage ; il est considéré alors comme un acier allié. [6,7]

5.2.2. Classification des aciers

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général,
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non,
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables

a) Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Les aciers ordinaires sont des aciers standards d'usage général qui sont parfois improprement appelés aciers au carbone. Ils sont utilisés tels quels, sans traitement ultérieur, constituent environ 80 % de la production des aciers (tableau 1.3). Outre le carbone, ces aciers contiennent des éléments d'addition et des impuretés dont la présence découle de leur mode d'élaboration : Manganèse (1.2 %), silicium (0.6 %), soufre (0.06 %), phosphore (0.06 %). Ces pourcentages présentent les teneurs limites de ces éléments dans ces aciers. [7]

Tableau 1.3 : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés. [7]

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Résistance R_m (MPa) État recuit	Emplois
Extra-doux	$C < 0,15$	330-420	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, Pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	370-460	Charpente métallique, profilés, construction Mécanique courante, boulons, fils ordinaires
Demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480-550	Pièces de machines pour applications Mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
Mi-dur	$0,30 < c < 0,40$	550-650	Petit outillage, éléments de machines agricoles, Organes de transmission
Dur	$0,40 < C < 0,60$	650-750	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et Traitées
Extra-dur	$0,60 < c$	>750	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

Bien qu'on puisse les obtenir avec des propriétés mécaniques variées, les aciers ordinaires ne répondent pas à toutes les exigences d'utilisation. Les principales propriétés des aciers au carbone susceptibles d'être améliorées sont les suivantes :

- La résistance mécanique à l'état normalisé ou à l'état recuit,
- La trempabilité,
- La soudabilité
- La tenue à chaud,
- La résistance à l'usure et à la corrosion.

b) Les aciers de traitements thermiques

On définit les aciers de traitements thermiques par rapport à leur composition chimique, car elle permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés désirées. Les aciers de traitements thermiques sont soit des aciers au carbone sans autres éléments d'additions que des éléments standard Mn et Si, soit des aciers alliés contenant en proportions variables d'un ou plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, V, etc.). [8]

c) Les aciers à outils

Les aciers à outils ont une importance technologique primordiale, aucune étape de la fabrication et quel que soit le procédé employé ne peut se passer d'outil. La production mondiale de ce genre d'acier ne représente qu'un faible pourcentage ~ 0.1 %, mais compte par exemple en Amérique plus de 75 nuances. Chacune de ces nuances est destinée à une fonction bien spécifique. [8]

d) Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité. D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance

aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires). [8]

Entre autres, on distingue:

- Aciers inox martensitiques,
- Aciers inox ferritiques,
- Aciers inox austénitiques,
- Aciers inox Duplex (Austéno-ferritique).

5.3. Soudabilité des métaux

5.3.1. Introduction

La plupart des procédés de soudage entraînent le réchauffement, puis le refroidissement du métal. Ces variations de température ont un impact sur la structure du métal dans la zone soudée. La zone périphérique au bain de fusion, également touchée par cet accroissement de la température, est appelée « zone affecter thermiquement » ou ZAT.

On peut distinguer quatre étapes importantes lors de l'application d'un procédé de soudage à l'arc :

- **Le chauffage** : est un résultat direct des transferts d'énergie survenant entre l'arc électrique et le métal.
- **La fusion** : En le chauffant, le métal atteint la température de son point de fusion et fond, créant un bain de fusion dans lequel l'ajout du métal d'apport ou la réunion des bords formera la soudure proprement dite.
- **La solidification** : par la suite on assiste à la solidification de la zone qui reste cependant encore chaude.
- **Le refroidissement** : finalement, ont refroidi la pièce.

5.3.2. Facteurs de détermination des effets des opérations de soudage

On compte quatre principaux facteurs qui déterminent les effets des opérations de soudage et qui entrent en considération dans le choix d'un procédé :

- Quantité de chaleur transférée,
- Température initiale de la pièce,
- Vitesse de refroidissement du métal,
- Température atteinte dans la ZAT,
- L'énergie linéaire.

a) Quantité de chaleur transférée

La quantité de chaleur transférée dépend essentiellement du procédé de soudage utilisé (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 : Coefficients de transmission thermique des procédés de soudage. [9]

Procédé de soudage	Coefficients de transmission de la chaleur dans la pièce (%)
Soudage à l'arc submergé (SAW)	90 à 99
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec fil fourré de flux (FCAW)	65 à 85
Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	50 à 85
Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode réfractaire de tungstène (GTAW)	20 à 50

b) Température initiale de la pièce

La température initiale détermine la vitesse de refroidissement de la pièce et l'humidité qu'elle contient. Un préchauffage approprié permet de diminuer la vitesse de refroidissement et d'assécher les pièces, ce qui atténue les risques d'absorption d'hydrogène. [9]

c) Vitesse de refroidissement du métal

La vitesse de refroidissement dépend de la différence de température entre la pièce et le milieu de refroidissement, plus l'écart est élevé, plus le refroidissement sera rapide. Plus les zones de contact entre le cordon de soudure et le milieu de refroidissement sont étendus, plus le refroidissement sera rapide. [9]

d) Température atteinte dans la ZAT

La température atteinte dans la ZAT modifie la structure finale du métal dans cette zone. La figure 1.8 ; illustre l'influence de la température atteinte dans la ZAT dans le cas de l'acier. On remarque que la grosseur des grains est proportionnelle à la chaleur atteinte dans la ZAT.

La conductivité thermique du métal détermine la vitesse à laquelle le métal transfère la chaleur depuis la ZAT, donc la taille des zones atteintes par la chaleur.

L'épaisseur des pièces et l'énergie linéaire sont deux facteurs qui influent sur la vitesse de refroidissement et la taille de la ZAT. [9]

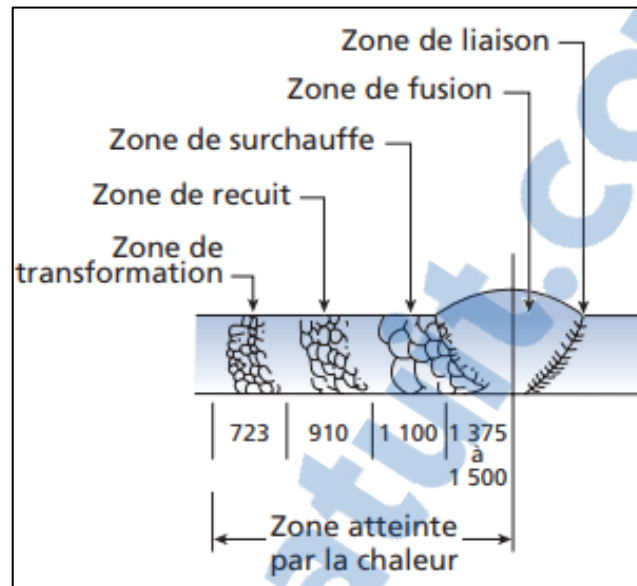


Figure 1.8 : Différentes zones atteintes par la chaleur. [9]

e) Énergie linéaire

L'énergie linéaire (El) correspond à l'énergie transférée au métal de base par unité de longueur de soudure. Elle dépend de la vitesse d'avance (v), de même que de la tension (U) et de l'intensité de courant (I) utilisées :
$$E1 = \frac{I \times U}{v}$$

Plus l'énergie linéaire est élevée, plus la ZAT sera grande et plus la vitesse de refroidissement sera lente. Par contre, l'épaisseur des pièces provoque l'effet inverse : plus elle est grande, plus la pièce refroidira rapidement et plus la ZAT sera petite. [9]

5.3.3. Soudabilité des aciers au carbone et faiblement alliés

La soudabilité des aciers dépend de la structure interne du métal dans la ZAT après le soudage. Afin de préserver les qualités du métal à souder, notamment en ce qui concerne la ductilité, le métal soudé doit retrouver une structure interne similaire à son état initial.

La (figure 1.9) illustre l'effet de la température sur les grains de l'acier. Remarquez la zone où on trouve de l'austénite, c'est dans cette zone que, dans le cas où le refroidissement est trop rapide, le métal se solidifie en martensite plutôt qu'en ferrite et en perlite, ce qui crée des tensions internes. [9]

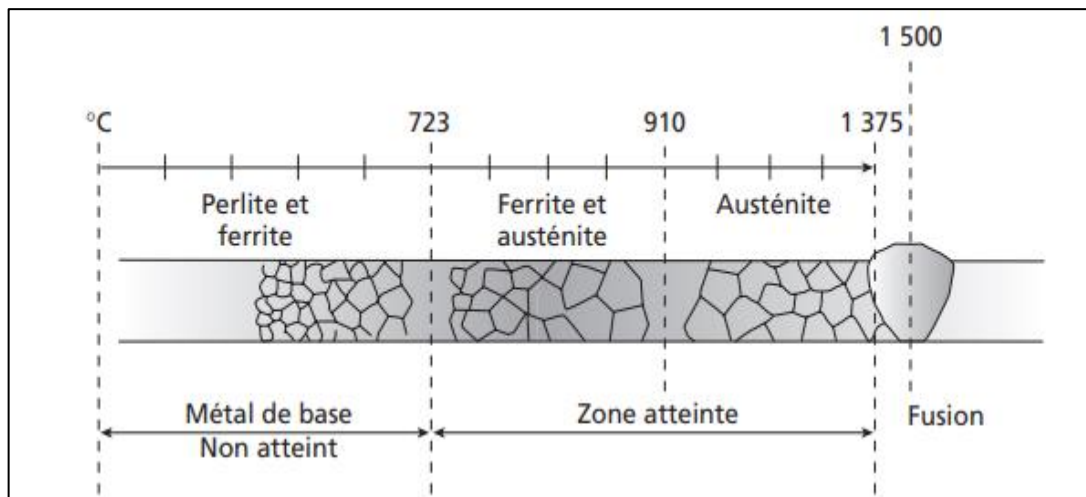


Figure 1.9 : Influence de la température sur les grains l'acier. [9]

Les principaux facteurs qui influent sur la soudabilité du carbone sont les suivants :

- **Trempabilité :** c'est le facteur principal. Il détermine le comportement des aciers lors du refroidissement rapide. Plus l'acier a tendance à adopter une structure martensitique, plus sa fragilité augmente et cela accroît d'autant les risques de fissures.
- **Carbone équivalent :** le carbone équivalent est une mesure qui détermine assez bien la trempabilité de l'acier, car plus la teneur en carbone est élevée, plus l'acier est susceptible de subir la trempé. La soudabilité d'un acier est donc dépendante de son carbone équivalent (Tableau 1.5).

Tableau 1.5 : présente l'Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier. [9]

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Préchauffage
< 0,40	Excellent	Aucun
0,40 à 0,50	Bon	De 100 à 300 °C
0,50 à 0,60	Moyen	De 100 à 300 °C De 200 à 400 °C
0,60 à 0,70	Médiocre	De 300 à 400 °C
> 0,70	Mauvais	Non soudable

- Les métaux suivants entrent dans le calcul du carbone équivalent : le carbone (C), le manganèse (Mn), le silicium (Si), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le vanadium (V), le nickel (Ni) et le cuivre (Cu). La formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Carbone équivalent} = C + \frac{Mn + Si + Cr}{6} + \frac{Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

5.3.4. Définition de la zone affectée par le cycle thermique de soudage

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas des métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 04 zones principale, représenté sur la figure 1.10. [1]

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

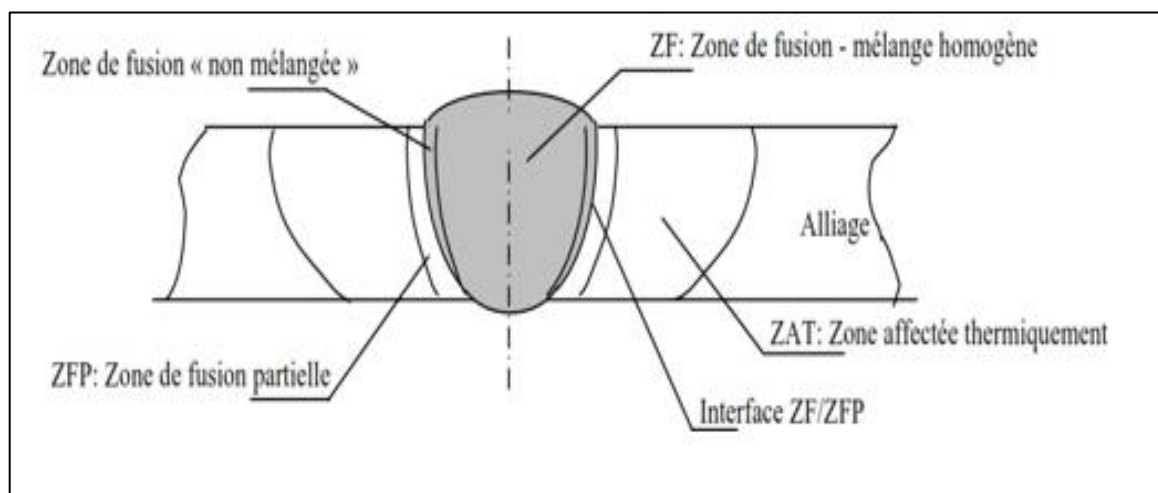


Figure 1.10 : Différentes zones constituant un joint de soudure. [1]

a) La zone fondue (ZF)

La région chauffée au-dessus de la température du liquidus (l'état liquide a été atteint). Sa composition chimique après solidification, dépend principalement de celles du métal de base et du métal d'apport et du cycle thermique subit. On peut distinguer au sein de cette zone des gradients de concentration (ségrégation) de la partie la plus chaude vers celle le moins. [1]

b) La zone de liaison (ZL) ou zone de fusion partielle (ZFP)

Cette zone directement adjacente à l'interface de soudure, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface de début de la solidification du métal fondu. [1]

c) La zone affectée thermiquement (ZAT)

Cette zone se trouve en bordure de la zone fondue, de largeur variable, ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique. [1]

d) Interface ZF/ZFP

C'est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée délimité le bain de fusion. [1]

e) Le métal de base

Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

f) La zone non mélangée

C'est la zone étroite à l'extrémité du bain de fusion dans laquelle la composition chimique est identique à celle du métal de base. Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente de celle du métal de base. [1]

5.4. Cycle thermique de soudage

Dans un très large intervalle de températures allant de la température ambiante jusqu'aux températures de vaporisation du métal, il se développe différentes actions physiques et chimiques telles que :

- La fusion du métal de base et du métal d'apport.
- Les réactions chimiques dans un bain liquide, échange métal-laitier.
- La cristallisation du métal fondu.

- Les modifications de structure et de volume dans le métal déposé et dans le métal de base au cours du chauffage et du refroidissement.

La connaissance du cycle thermique de soudage permet de prévoir les évolutions du métal de base et du métal fondu. Les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser le cycle thermique en condition de soudage sont (Fig.1.11) :

- Le $t_r 800/500$: temps de refroidissement entre 800 et 500°C, utilisé par (I.I.S),
- $\delta t 700/300$: temps de refroidissement entre 700 et 300°C utilisé par (I.R.S.I.D.),
- $\delta t 300/100$: temps de refroidissement entre 300 et 100°C utilisé par la plupart des Laboratoires japonais,
- $V_r 300$: vitesse de refroidissement instantanée à 300°C utilisée par certains aciéristes.

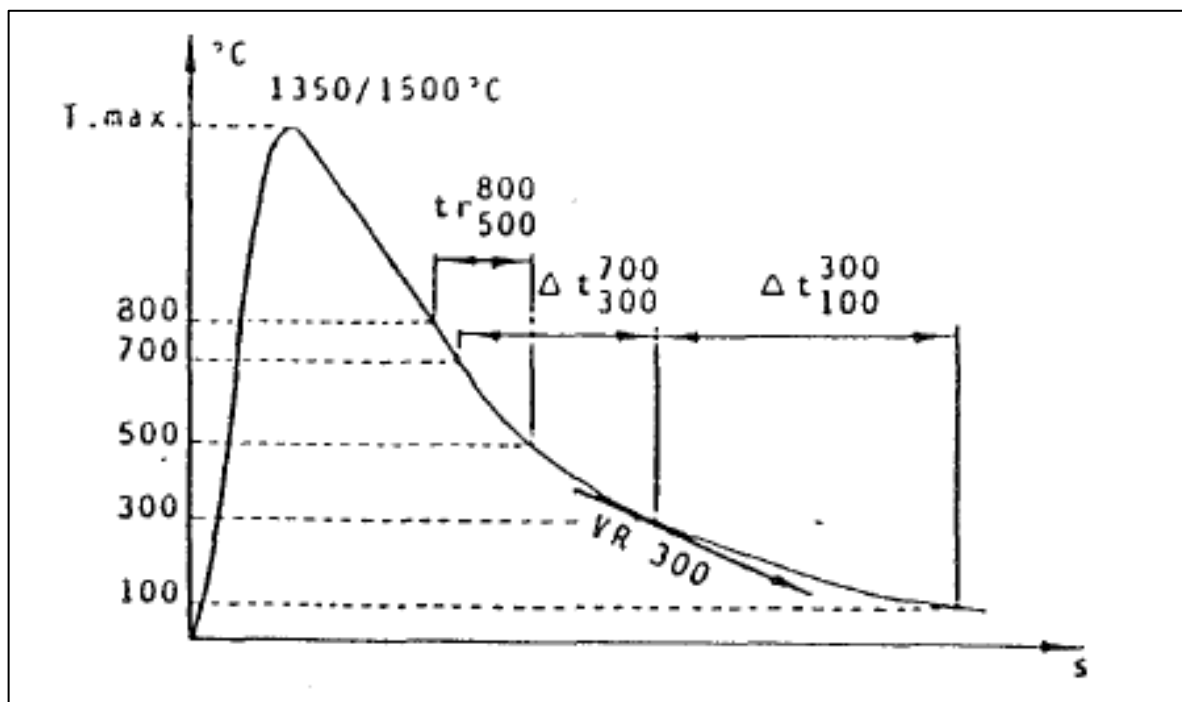
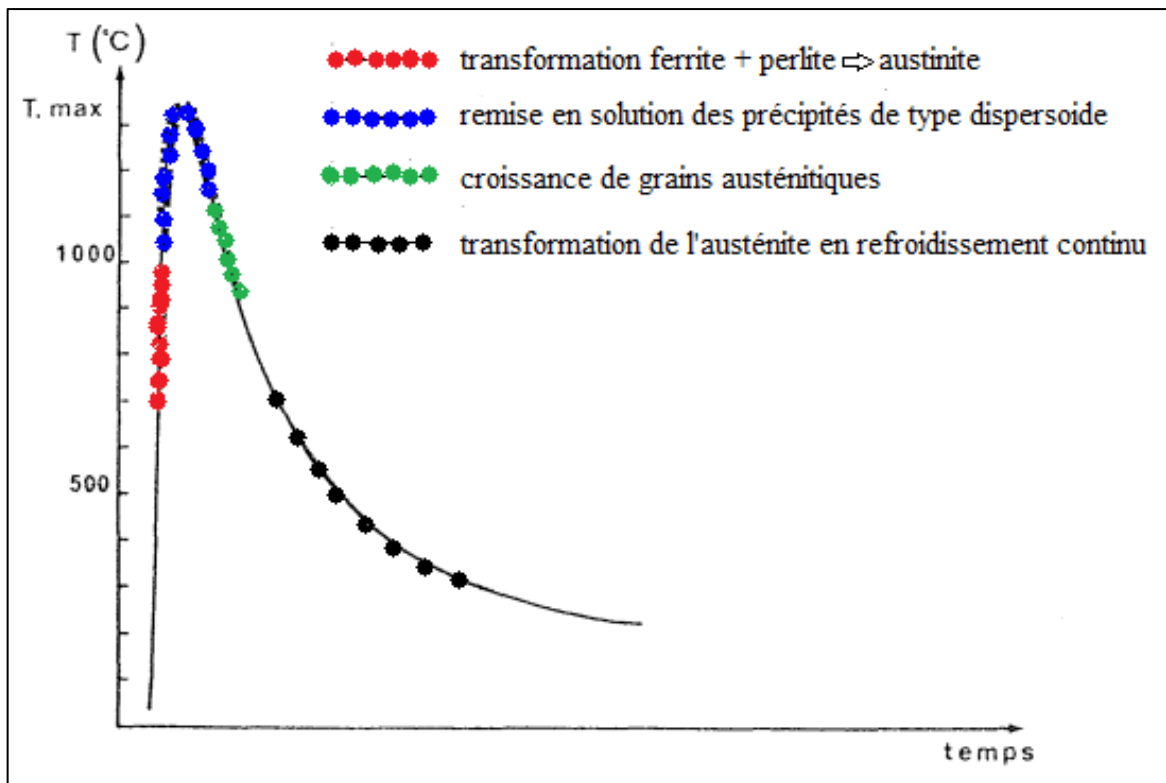


Figure 1.11 : Cycle thermique de soudage et principaux Paramètres de refroidissement. [10]

Du point de vue métallurgique, le cycle thermique, près de la ligne de fusion, représenté dans la (figure 1.12) se traduit Chronologiquement par :

- L'austénitisation de la structure initiale.
- La mise en solution des précipités.
- La croissance du grain austénitique.
- La transformation de l'austénite en refroidissement continu.



La figure 1.12 : schématise le cycle thermique près de la ligne de fusion. [10]

6. Conclusion

Pour comprendre le comportement métallurgique d'un métal de base au soudage il faut connaître et étudier :

- Avant toute chose, le fonctionnement métallurgique du matériau qui va être soudé ; ce matériau est appelé par le métallurgiste du soudage : Métal de base (MB).
- La façon dont une soudure chauffe et refroidie dans le temps et dans l'espace (Traitement thermique au soudage) ainsi que les facteurs d'influence (énergie, épaisseur soudée...) ; on parle d'aspect thermique de l'opération de soudage.
- Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé et refroidi sans Fondre ; cette région est appelée : zone affectée thermiquement (ZAT),
- Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé, fondue, 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.

Chapitre 2
Propriétés mécaniques des
Matériaux

1. Propriétés mécaniques des matériaux

1.1. Introduction

Le comportement mécanique d'un matériau est fonction des forces extérieures appliquées et traduit les évolutions de la cohésion de ces atomes. Ainsi, les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation.

Les propriétés mécaniques sont déterminées au moyen d'essais normalisés. Les principales propriétés mécaniques sont : Module d'élasticité, Limite d'élasticité, écrouissage, ductilité, Viscosité, vitesse de fluage, amortissement, Charge à la rupture, résistance à la fatigue, à l'usure..., etc.

1.2. Fragilité

1.2.1. Définition

La fragilité montre la particularité d'un métal qui se brise facilement sous l'effet d'un choc ou d'une déformation. Il se déforme peu ou pas du tout, et se casse facilement.

Les métaux fragiles ont une capacité de déformation plastique relativement faible avant la rupture. Cela signifie qu'une pièce fragile soumise à une charge excessive de contraintes peut connaître une défaillance soudaine et potentiellement catastrophique sans allongement initial ou déformation. Moins un métal est ductile, plus il sera fragile.

1.2.2. Facteurs influençant la fragilité

La fragilité dépend non seulement des forces de liaison entre les atomes, mais aussi de la contribution d'éventuels phénomènes de dissipation d'énergie : plasticité, microfissuration, changement de phase, recristallisation dynamique,... Interviennent donc en particulier la température et la vitesse de déformation :

- de nombreux matériaux sont fragiles en dessous d'une température dite « température de transition fragile-ductile »,
- Certains matériaux sont peu ductiles aux faibles vitesses de déformation, et très ductiles aux fortes vitesses (recristallisation dynamique),
- Certains matériaux sont fragiles aux vitesses de déformation élevées, mais « pâteux » aux très faibles vitesses ; c'est le cas par exemple des roches.

La fragilité intergranulaire peut provenir de la présence d'atomes étrangers qui ségrègent aux joints de grain, comme le phosphore ou le soufre dans l'acier. De manière générale, un matériau cristallin est souvent d'autant moins fragile qu'il est pur. On peut renforcer les joints de grain en ajoutant des éléments d'alliage pour piéger les impuretés, ou pour renforcer les joints de grain en y ségrégant (bore). L'hydrogène est également un élément fragilisant ; le dégazage des métaux lors de la fusion est donc capital. [24]

La fragilité peut aussi provenir de réaction avec l'environnement. En particulier, l'eau, dans le cas d'immersion ou bien l'humidité de l'air, peut réagir avec le métal et produire de l'hydrogène qui vient fragiliser le métal. [11]

1.3. Ductilité

1.3.1. Définition

À l'opposé de fragilité, la ductilité est la capacité d'un métal à se déformer sans se briser. Il peut être étiré, allongé ou soumis à des forces de torsion. Les matériaux ductiles sont difficiles à casser parce que les fissures ou les défauts créés par une déformation ne se propagent pas facilement. [24]

Les matériaux ductiles sont habituellement relativement tendres, et les matériaux durs sont souvent fragiles. Les diamants sont des exemples de matériaux très durs, et le talc est un exemple de matériau très tendre. Le cuivre, par ailleurs, est un métal relativement ductile, bien qu'il soit tendre. On peut le plier plusieurs fois sans qu'il se rompe mais, comme nous l'a appris l'expérience, s'il est plié trop souvent, il devient écroui puis fragile, et se rompt alors facilement. La ténacité est une propriété semblable qui combine la ductilité et la résistance. Le cuir est un excellent exemple de matériau ayant une bonne ténacité. De façon générale, les métaux ductiles ont également une bonne ténacité. [24]

Il existe deux méthodes principales pour mesurer la ductilité :

- Les essais de traction mesurant l'allongement à la rupture et la striction.
- L'essai mouton de Charpy mesurant l'énergie dépensée pour casser une éprouvette.

1.3.2. Condition de ductilité

La ductilité dépend de la température, de la pression et de la vitesse de déformation :

- Quand la température augmente, le seuil de plasticité diminue.
- Quand la pression augmente, le seuil de rupture augmente.
- Quand la vitesse de déformation augmente, le seuil de rupture diminue.

1.4. Ténacité

1.4.1. Définition

La ténacité est la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture, elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures. Les marteaux et les équipements utilisés pour déformer ou couper des plaques d'acier (matrices, poinçons, etc.) sont faits avec des matériaux de haute ténacité.

1.4.2. Détermination expérimentale

Pour déterminer expérimentalement la ténacité, on utilise une éprouvette pré-entailée. En exerçant sur cette éprouvette un système de forces appropriées, on soumet sa fissure à un mode d'ouverture et on évalue l'énergie élastique libérée par la progression de la fissure. La ténacité est proportionnelle à la racine carrée de cette énergie. [24]

On distingue trois modes de sollicitation de la fissure (figure 2.1) :

- Le mode I : on effectue un essai de traction perpendiculairement au plan de la fissure, c'est le mode le plus dangereux.
- Le mode II : on cisaille dans le plan de la fissure.
- Le mode III : on cisaille perpendiculairement au plan de la fissure.

La fissure étant une entaille, il se crée une concentration de contrainte. On définit donc les facteurs d'intensité de contrainte K_I , K_{II} ou K_{III} selon le mode de sollicitation.

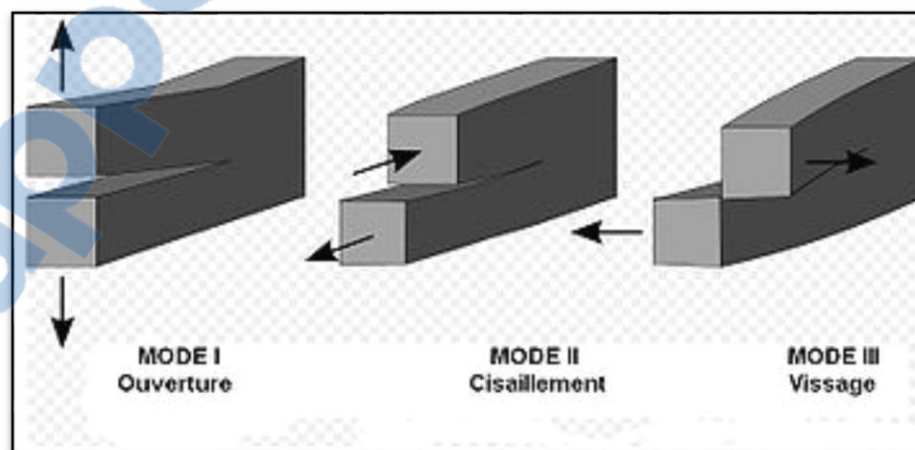


Figure 2.1 : Illustration des trois modes de sollicitation d'une fissure. [12]

1.5. Malléabilité

Définition

La malléabilité est une particularité qui permet au métal de se laisser façonner. est la propriété d'un matériau à être déformé à chaud ou à froid, par choc ou pression, en conservant la nouvelle forme acquise. La malléabilité est la raison pour laquelle on peut laminier (rouleau compresseur) un matériau, le forger (martèlement), ou découper plus ou moins facilement un matériau de faible épaisseur. D'une autre façon c'est la résistance du métal soumis à des forces de compression, comme le forgeage ou le laminage. Ainsi, plus la température est élevée, plus la malléabilité d'un matériau augmente. [12]

La figure 2.2 qui suit présente certains matériaux en fonction de leur ductilité et de leur malléabilité.

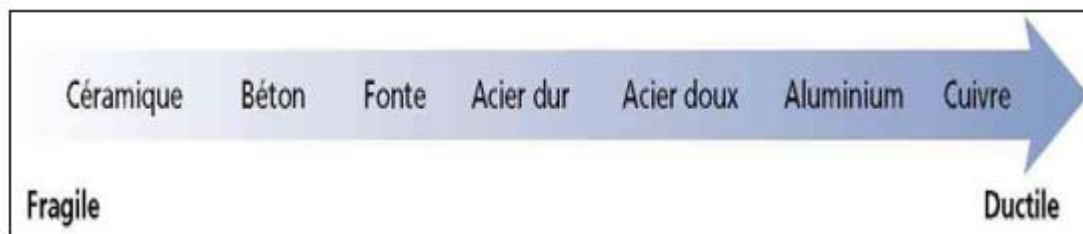


Figure 2.2 : Les métaux : du plus fragile au plus ductile. [12]

1.6. L'élasticité

Définition

L'élasticité est la capacité d'un matériel à reprendre sa forme originale après avoir subi une déformation. C'est le cas typique d'un ressort qu'on étire puis qu'on relâche. La déformation élastique est une déformation réversible. Un matériau solide se déforme lorsque des forces lui sont appliquées. Un matériau élastique retrouve sa forme et sa taille initiales quand ces forces ne s'exercent plus, jusqu'à une certaine limite de la valeur de ces forces. Les tissus biologiques sont également plus ou moins élastiques.

Les raisons physiques du comportement élastique diffèrent d'un matériau à un autre. Pour les métaux, le treillis atomique change de taille et de forme quand des forces leur sont appliquées. Quand les forces sont supprimées, le système retourne à son état original où l'énergie est la plus faible. [25]

1.7. Dureté

1.7.1. Définition

La dureté est la capacité d'une matière à résister à la pénétration d'une matière plus dure qu'elle. Elle est aussi déterminée par sa résistance aux rayures. Le diamant constitue le matériau le plus dur. Les aciers à haute teneur en carbone sont durs, les aciers doux, un peu moins, tandis que l'aluminium est de faible dureté. [12]

1.7.2. Processus de mesure de la dureté

Il faut distinguer entre les processus statiques et dynamiques pour mesurer la dureté. Tous se rapportent à un même principe ; un corps pénétrateur est constamment appuyé sur son matériau avec une force de test précise. La déformation locale provoqué sur la partie plastique et élastique sera mesurée. Les mesures statiques ne déterminent que la déformation plastique.

Selon l'ampleur de la force d'essai on distingue : macro dureté (force $F > 30$ N), la dureté de faible charge (de 2 à 30 N) et la micro dureté ($< 0,5$ N). La mesure de dureté avec Brinell, Vickers et Rockwell appartient aux processus de mesure de dureté statique. Dans les processus dynamiques (méthode de dureté Shore ou essai pendulaire de dureté) on provoque le choc d'un corps pénétrateur sur la partie à mesurer avec une énergie cinétique d'un intervalle défini. C'est ainsi qu'on vérifie les tuyaux, les arbres de turbines ou les pièces coulées. [26]

2. Essais mécaniques

2.1. Introduction

Pendant plus longtemps, l'empirisme et l'habitude suffisaient pour mener à bien les opérations de mise en œuvre des matériaux tels que : le laminage, le filage, l'extrusion, le forgeage, l'usinage, etc. les exigences accrues de qualité et de précision, les économies d'énergie et même la fiabilité du produit fini à réaliser concourent à rendre nécessaires les calculs détaillés de ces diverses opérations. [13]

La fabrication des diverses structures mécaniques et le rôle fonctionnel que joue chaque pièce dans son assemblage exige en premier lieu de connaître le comportement mécanique du matériau vis-à-vis les sollicitations qui sont imposées par le milieu extérieur. En fait connaître les propriétés mécaniques d'un matériau, c'est un indice technique indispensable pour les ingénieurs qui s'occupent des calculs des structures à chaque étape de mise en œuvre des matériaux. Il est évident que ces calculs ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux souvent influencées par d'autres

phénomènes extérieurs. Alor les essais mécaniques qui fournissent directement la réponse des matériaux aux sollicitations données. [14]

Nous définissons dans le cadre de ce travail, deux essais fondamentaux (dureté, traction) qui intéressent d'une voie directe ou indirecte la résistance à la rupture du matériau et caractérisent sa consolidation.

2.2. Essai de traction

2.2.1. Définition

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Etant purement uniaxiale du moins tant qu'il n'y a pas de striction, il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uniaxiale. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limites d'élasticité nécessaires dans les calculs de structure. La machine de traction (figure2.3) est un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort, ensuite le résultat est visualisé sur un écran ou une table traçante via un système d'acquisition de données.



Figure2.3 : machine de traction-compression

2.2.2. Description générale d'une machine de traction

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre deux mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction.

Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage. [15]

2.2.3. Les éprouvettes

Eprouvettes Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Sur une éprouvette de traction la longueur initiale entre repères L_0 est normalisée, comme il est montré dans (figure 2.4). [15]

Les éprouvettes de traction sont normalisées ($\varnothing \geq 4\text{mm}$ ou $e \geq 3\text{mm} \dots$).

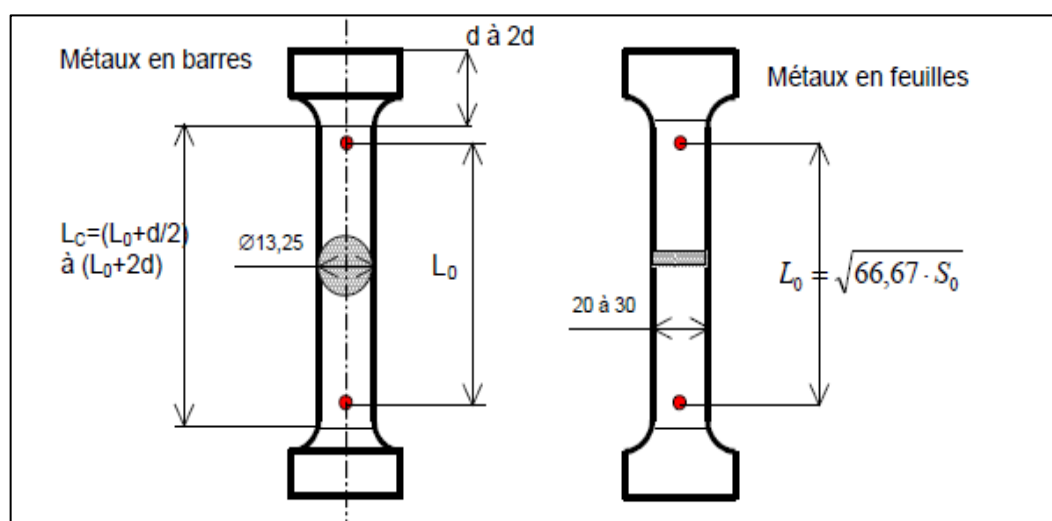


Figure 2.4 : éprouvette de traction normalisée. [15]

2.2.4. Prélèvement de l'éprouvette

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés de l'acier dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie (figure 2.5). Pour les tôles laminées, la direction de prélèvement doit donc toujours être précisée :

- Sens long SL (repéré par l'indice 0°),
- Sens travers ST (repéré par l'indice 90°),
- Sens "oblique" (repéré par l'indice 45°).

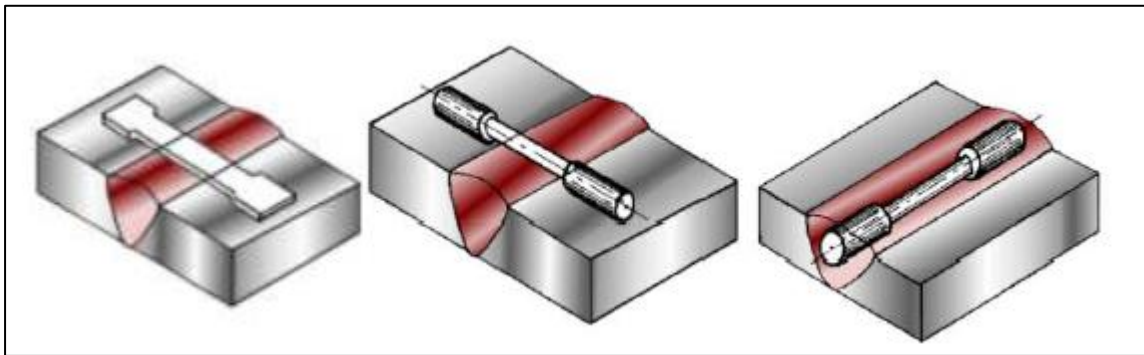


Figure 2.5 : évaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure. [13]

2.2.5. Dimension des éprouvettes

La dimension des éprouvettes de traction diffère selon l'épaisseur du produit testé :

- $\text{Ép} < 3 \text{ mm}$: largeur 20mm et longueur 80 mm
- $\text{Ép} > 3 \text{ mm}$: largeur 30mm et longueur de $5,65 \cdot S_0$, avec $S_0 = \text{largeur} \cdot \text{épaisseurs}$.

La dimension des éprouvettes varie aussi selon les pays : Japon (norme JIS) USA (norme ASTM), Ces variations de taille d'éprouvettes se traduisent par des valeurs de caractéristiques Mécaniques non comparables, mais qui peuvent cependant être converties d'une norme à l'autre sur la base de corrélations largement vérifiées. [15]

2.2.6. Principe de l'essai

Cet essai destructif, pratiqué à température ambiante 20°C, consiste à imposer une déformation croissante à vitesse constante et à mesurer l'effort nécessaire pour imposer cette déformation.

La vitesse de l'essai est limitée et dépend du matériau :

- Acier : $V_{MAX} \leq 0,15 \cdot L_0$ (mm/mn) ou $\leq 30N/mm^2/sec$,
- Aluminium : $V_{MAX} \leq 0,009 \cdot L_0$ (mm/mn) ou $\leq 10N/mm^2/sec$,
- Cuivre : $V_{MAX} \leq 0,006 \cdot L_0$ (mm/mn) ou $\leq 08N/mm^2/sec$.

La figure 2.6 décrit le principe de l'essai de traction ;

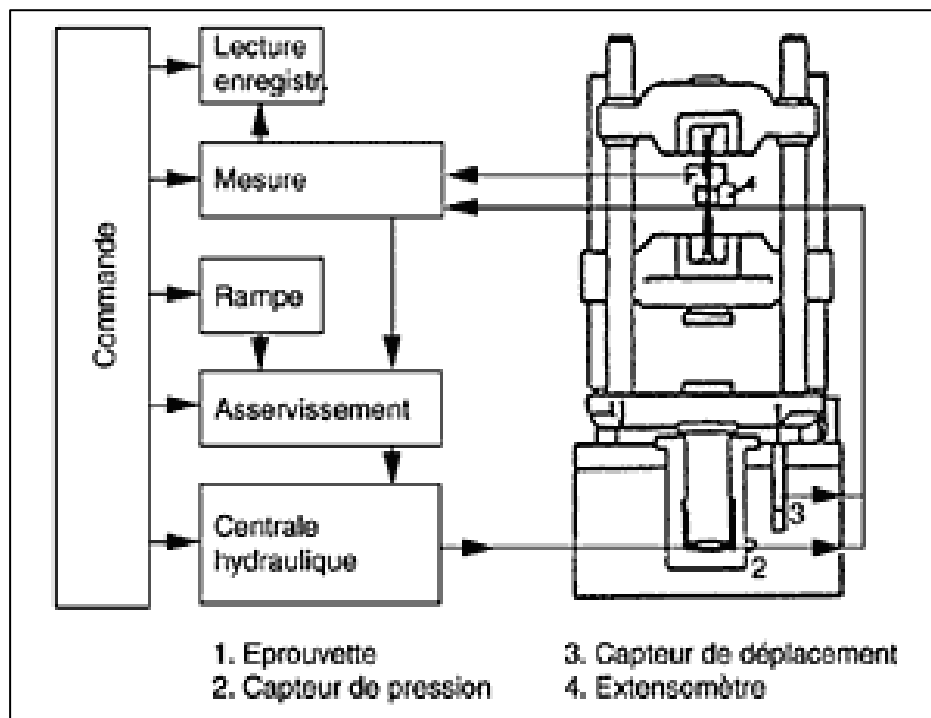


Figure 2.6 : schémas descriptifs, principe de l'essai traction. [15]

2.2.7. Exploitations de l'essai

a) Interprétation qualitative

Sur un diagramme effort-déformation (figure 2.7), on observe les phases successives suivantes : **Zone OA** : domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.

Zone AB : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone BC : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge. [15]

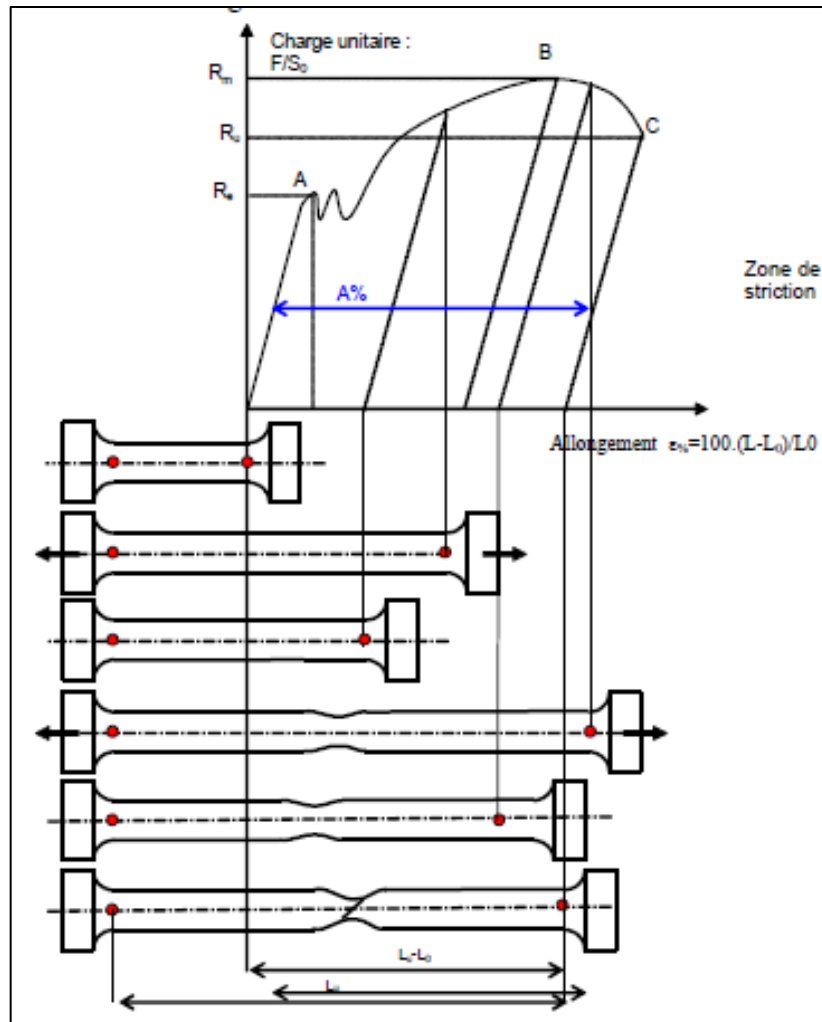


Figure 2.7 : diagramme charge-allongement de traction. [15]

b) Le Processus thermomécanique

L'acier possède une structure granulaire. Elle influence le comportement mécanique des Aciers à deux niveaux :

- A l'échelle microscopique, par les irrégularités d'alignement (les dislocations) et les éléments d'alliage en insertion ou en substitution que comporte chaque grain.

A une échelle plus macroscopique, par la forme des grains (allongés ou bien massifs) ainsi que par leur taille. Pour une composition chimique donnée, ces caractéristiques de l'acier sont en relation avec les cycles thermomécaniques subis tout au long de la filière de fabrication :

- Le laminage à chaud,
- Le laminage à froid,
- Le recuit,
- Le skin-pass.

Les températures de laminage, les vitesses de refroidissement, les températures de bobinage (pour les feuilles), les taux de réduction d'épaisseur au laminoir à froid, les cycles de recuit, les taux de skin-pass sont autant de paramètres permettant d'ajuster la structure cristalline et granulaire de l'acier et donc les propriétés finales du produit. [15]

c) Influence de la température

Les limites élastiques et de rupture dépendent de la température, comme est illustré dans la figure 2.8.

Cette propriété est utilisée pour la mise en forme par déformation plastique à chaud (forgeage).

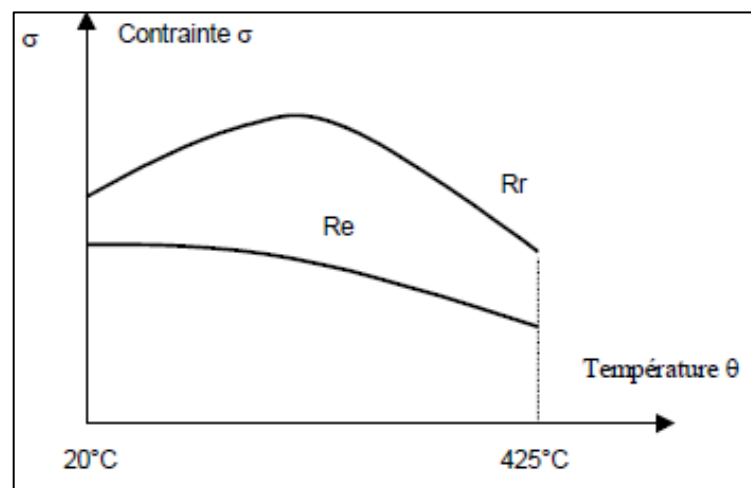


Figure2.8 : diagramme de développement de Re-Rr en fonction de température. [15]

d) Limite d'élasticité

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

On y constate clairement dans la courbe contrainte-déformation (figure2.9) ci-dessous, deux types de comportement :

- Tant que l'on reste en dessous du point de limite élastique, le comportement reste élastique linéaire. Quand le chargement redevient nul, l'éprouvette retrouve sa forme initiale.

- Par contre, si le chargement dépasse la limite élastique, et si on décharge ensuite l'éprouvette, on constate que l'on revient à un autre état : le matériau a perdu la mémoire de son état initial et se comporte comme si l'état initial était changé.

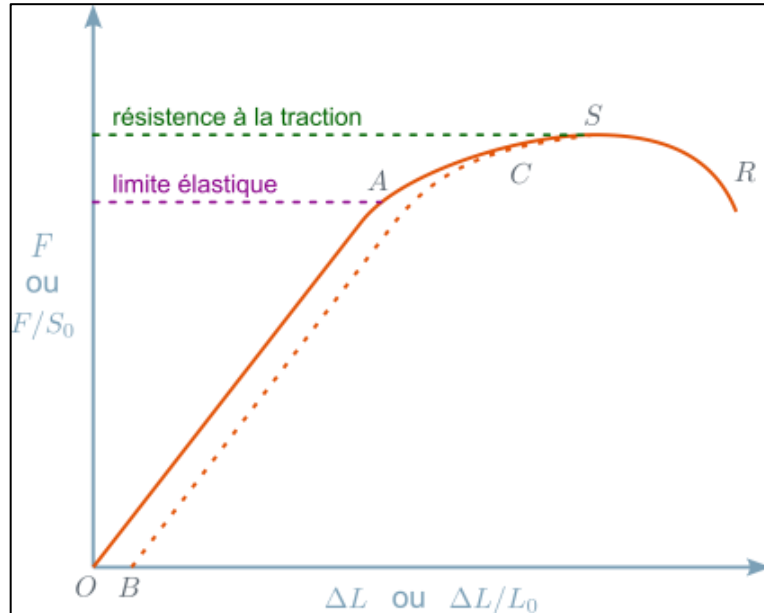


Figure 2.9 : courbe contrainte-déformation de traction. [13]

Pour les aciers, on est conduit à distinguer 2 types principaux de courbes de traction (figure 2.10), suivant la présence ou non d'un crochet à la limite d'élasticité.

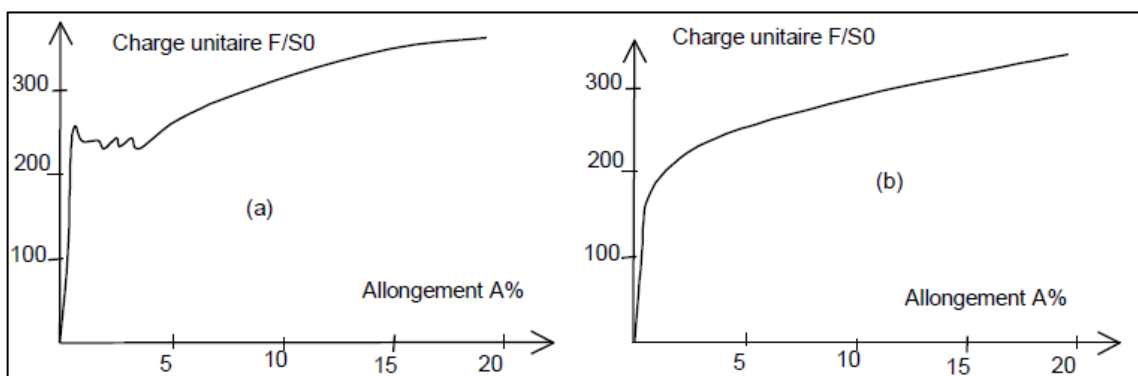


Figure 2.10 : Courbe contrainte déformation d'un acier. [15]

La courbe (a) correspond à des aciers ferritiques en général, mais peut se présenter avec moins de netteté pour des aciers plus durs traités, parfois même alliés.

La courbe (b), avec un passage progressif, correspond aux aciers durs ou aux aciers austénitiques.

e) Module de Young

Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), si l'on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur ne soit atteinte. Le module de Young est la pente initiale de la courbe de déformation-contrainte. [25]

- La loi d'élasticité est la loi de Hooke, c'est-à-dire :

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Où :

- σ est la contrainte (en unité de pression),
- E est le module de Young (en unité de pression),
- ε est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel)

2.3. Essais d'indentation

2.3.1. Définition

Les essais d'indentation évaluent la "dureté" du matériau en mesurant la pression de contact pendant l'enfoncement d'un indenteur (pyramidal, conique ou sphérique). La dureté est calculée soit après l'essai, par mesure de la surface de l'empreinte (figure 2.11), soit pendant l'essai, par mesure de l'enfoncement de l'indenteur (figure 2.12), dans les deux cas en fonction de la charge appliquée. Ces essais sont faciles à mettre en œuvre, puisqu'ils ne nécessitent qu'un polissage et peuvent être réalisés sur des échantillons de petite taille. Les essais de dureté peuvent porter sur des échelles millimétriques à nanométriques, selon le dispositif expérimental utilisé. Les essais classiques sont peu coûteux et selon les applications ils peuvent être considérés comme non destructifs. Cependant, contrairement aux essais de traction, les essais de dureté sont d'une interprétation beaucoup plus délicate et ne permettent pas d'accéder directement aux paramètres de la loi de comportement d'un matériau mais nécessitent une analyse inverse. [15]

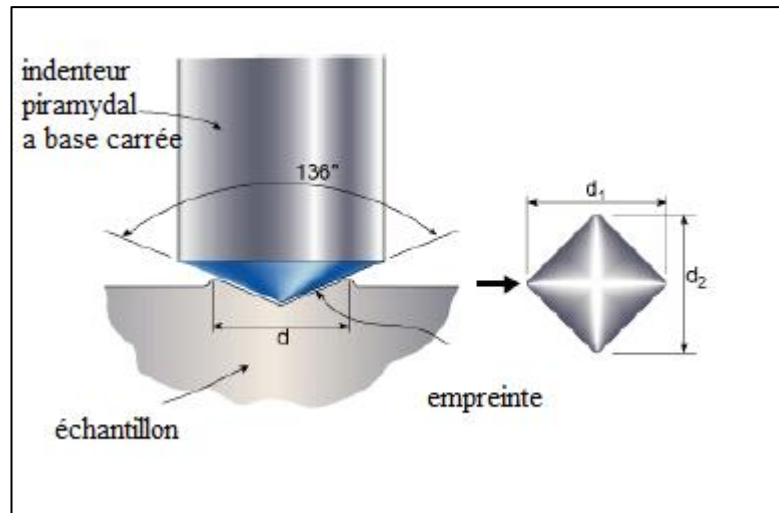


Figure 2.11 : indenteur type Vickers et empreinte type laissée par l'indenteur. [15]

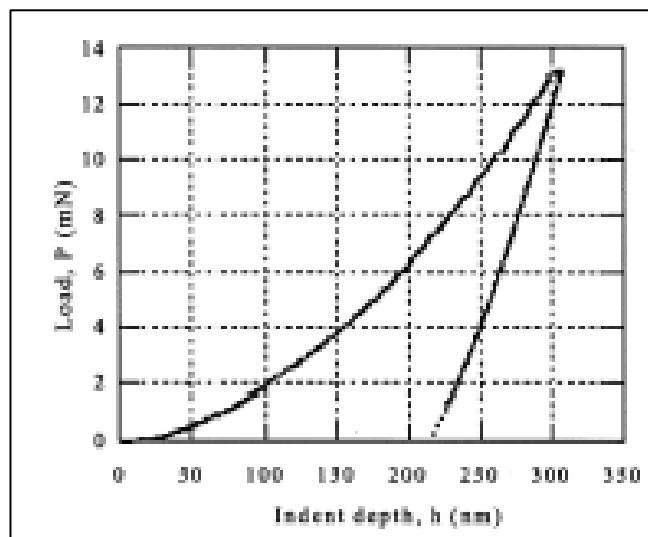


Figure 2.12 : courbe charge/déplacement obtenue par nano indentation. [15]

2.3.2. Essai de Macroducté

Les essais Vickers, Brinell, et Rockwell sont les plus couramment utilisés. Ils consistent à mesurer la taille de la trace laissée par l'indenteur après chargement ;

a) Essai Vickers

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique, (figure 2.13). On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées. [27]

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

HV = Dureté Vickers.

F = Force appliquée [N].

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm].

g = Accélération terrestre. [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] (9,80665).

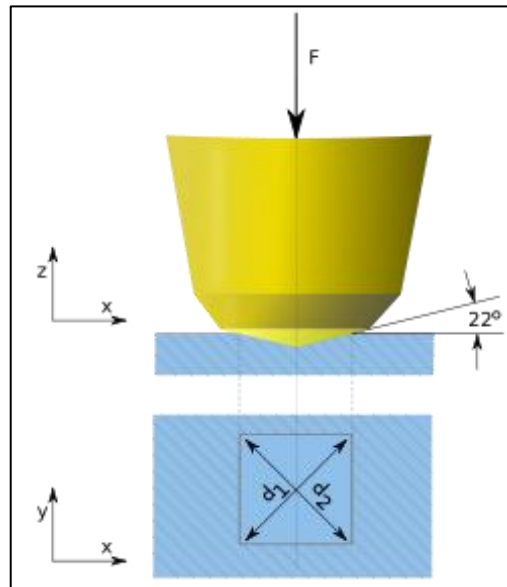


Figure2.13 : principe de la dureté Vickers. [27]

b) Essai Brinell

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force F un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre D, généralement du carbure poli, dans un métal afin d'en déduire la dureté du matériau. Le principe de dureté brinell est illustré dans la (figure2.14) ci-dessous. [27]

$$HB = \frac{2m}{\pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

HB = Dureté Brinell.

m = Masse appliquée en (Kgf). 1 [kgf] = 9,806 65 [N]

D = Diamètre de la bille en (mm).

d = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille en (mm).

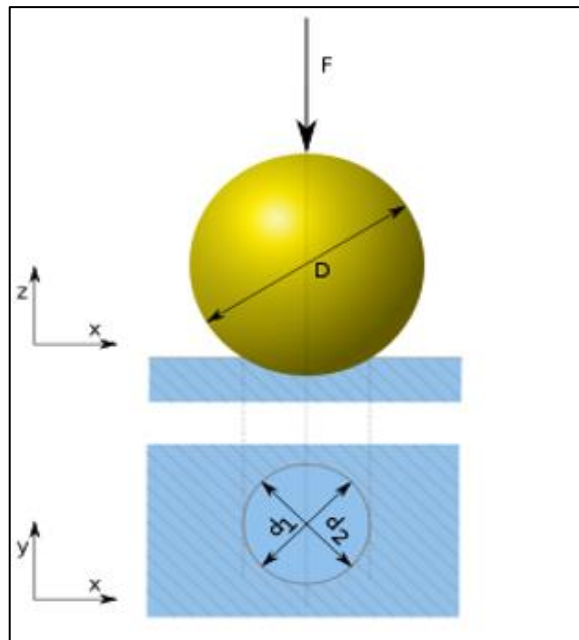


Figure 2.14 : principe de dureté brinell. [27]

c) Essai Rockwell HRC

L'Essai Rockwell, type C se déroule en trois phases (figure 2.15) :

- 1) Application sur le pénétrateur (Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm) d'une charge initiale $F_0 = 1\,471,5\text{ N}$. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I.
- 2) Application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P ;
- 3) Relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

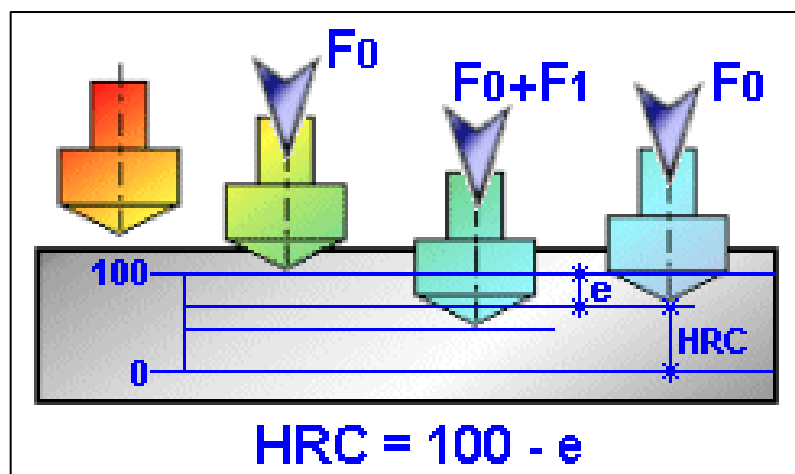


Figure 2.15 : principe de dureté HRC. [27]

Conclusion

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis des sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés.

Parmi ces derniers, l'essai de traction et de dureté, qui permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

Chapitre 3
Traitements thermiques
Des aciers

1. Introduction

Les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la structure du matériau par l'effet de la température tout en restant à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement). Les traitements thermiques sont des opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux afin de les rendre plus favorables à un emploi donné, par les 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.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi un forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

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 3.1) :

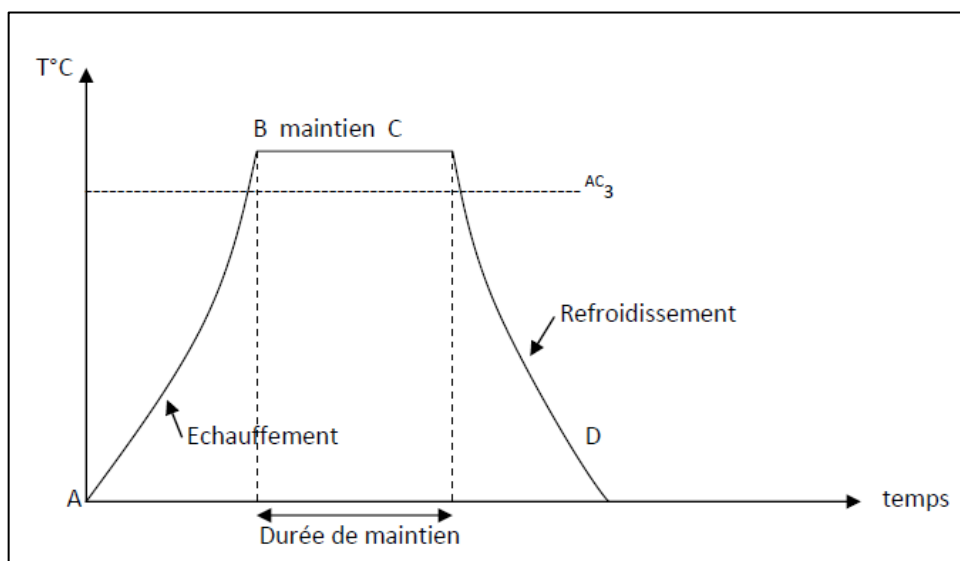


Figure 3.1 : Cycle d'un traitement thermique. [23]

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (AC3).

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). [23]

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 3.2 représente la courbe de chauffage pour le contour, et le cœur de la pièce ; la courbe est simplifiée comme une droite. Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

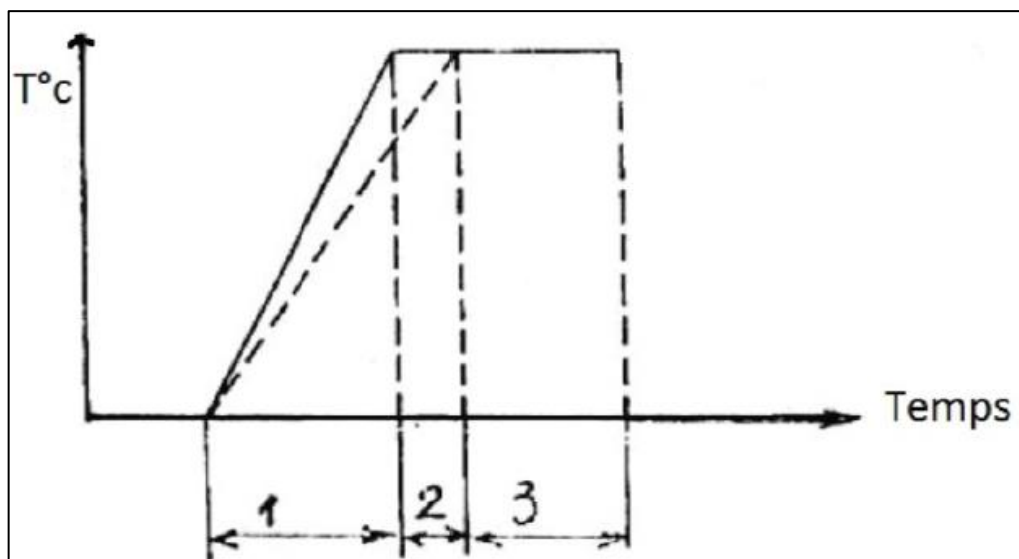


Figure 3.2 : courbe simplifiée de chauffage des pièces. [23]

1. **Durée de préchauffage** : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale soit 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. [23]

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. 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. [23]

2.3. Diagramme d'équilibre fer-carbone

Le diagramme d'équilibre (figure 3.3) est obtenu 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. [24]

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, se transforme en solution solide de fer alpha, ferrite.

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. [24]

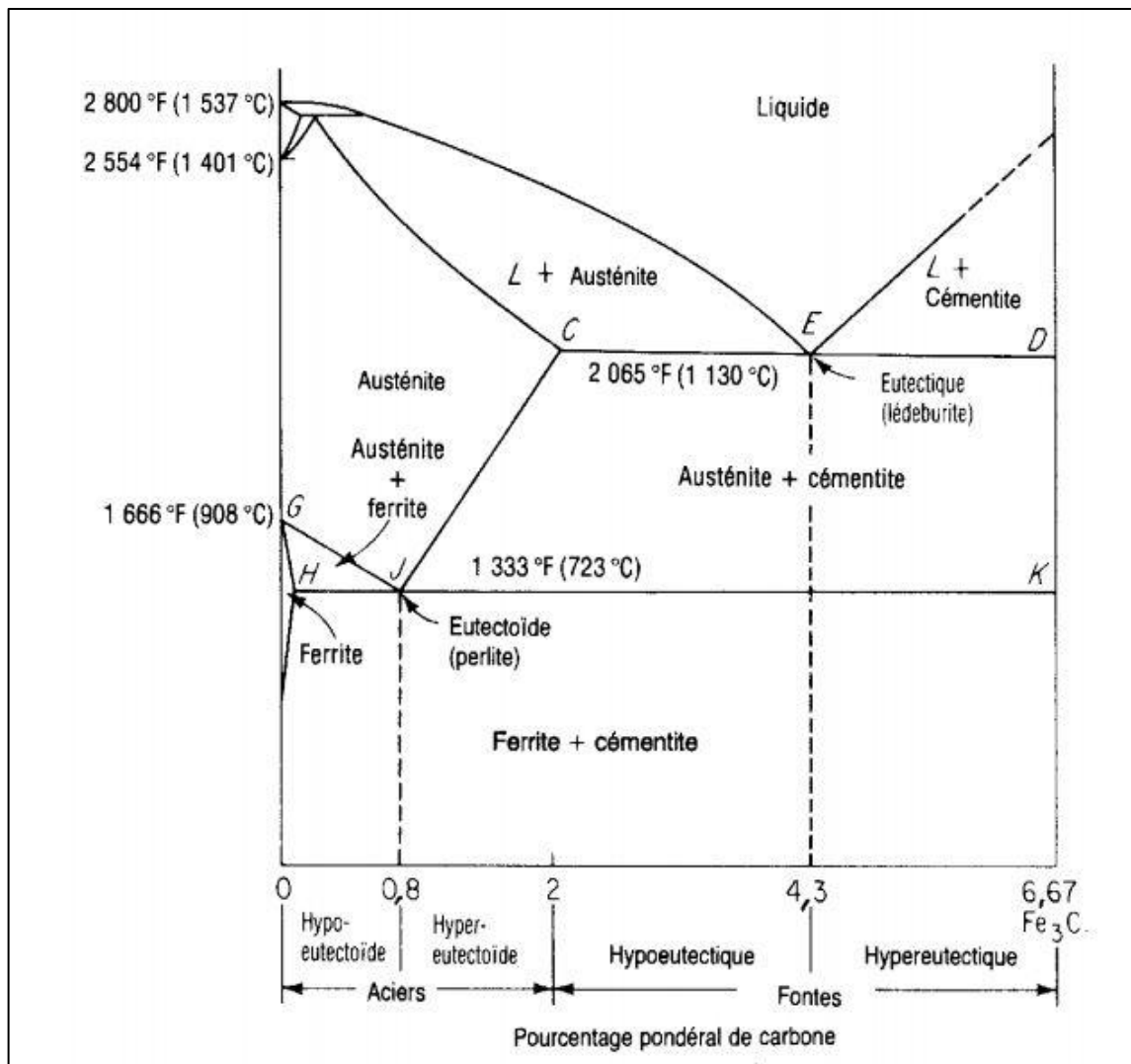


Figure 3.3 : diagramme de phase fer-carbone. [24]

3. Traitements thermiques des soudures

3.1. Introduction

L'opération de soudage se traduit par des modifications métallurgiques locales de métal de base et, selon les procédés et les modes opératoires, par la création d'une zone fondue dont la structure et les propriétés sont plus ou moins différentes 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

l'amélioration ou l'obtention des propriétés jugées importantes vis à vis des conditions de service, ou d'élimination ou simplement la réduction des 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, agissant 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. [25]

3.2. 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.

3.2.1. 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.

Dans la pratique, le traitement global simultané peut être appliqué 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. [25]

3.2.2. 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, pour assurer ce proche en proche l'effet recherché dans le métal fondu est une partie de métal de base incluant la zone affectée.

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. 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. [25]

3.3. 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]

3.4. 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 AC3, pour les aciers hypoeutectoïde et supérieure à AC1, pour les aciers hypereutectoïdes. A cette température l'acier est maintenu 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 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. [23,26]

3.4.1. Technologies de chauffe

Les types de trempe peuvent être exécutés dans à peu près tous les milieux de chauffe possibles : four sous atmosphère contrôlée, four sous vide, bain de sel, etc. En somme, le choix de la technologie de chauffe est établi en fonction de la nature des pièces, sa grosseur, sa conductibilité, etc.

La figure3.4 illustre de manière générale le cycle d'un traitement par trempe. Précisons ici qu'un traitement de trempe est toujours suivi d'un ou de plusieurs traitements de revenu afin d'enlever la fragilité du matériel, d'éliminer les contraintes et d'ajuster la dureté finale.

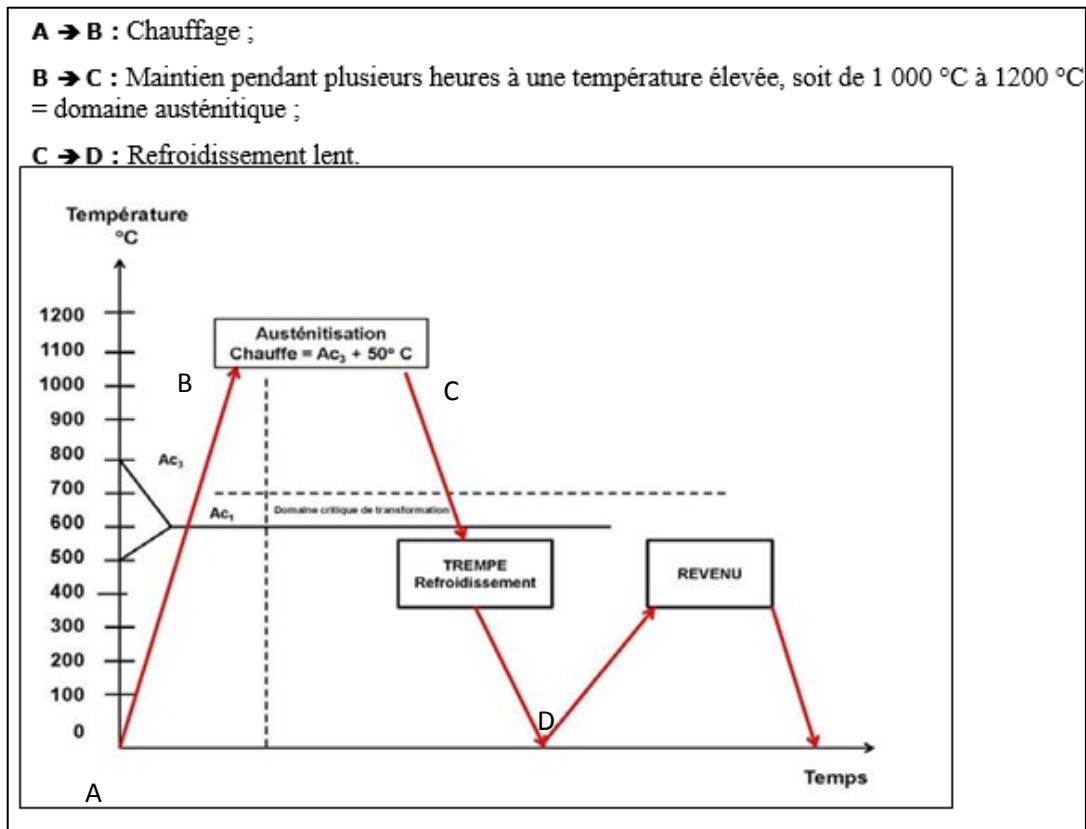


Figure3.4 : Le cycle thermique lors d'une trempe. [26]

3.4.2. 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.

Le refroidissement doit se réaliser à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe.

3.4.3. Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations de phases

Vitesse de refroidissement lente

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

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 displacif, c'est à dire par une modification locale de la maille sans déplacement de matière.

3.4.4. 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. Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite fusionnée dans le domaine des transformations perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique. 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. [26]

Tableau 3.1 : La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe. [26]

Nature du Bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220 °C / seconde
Eau froide	160 °C / seconde
Eau tiède	150 °C / seconde
Eau chaude	140 °C / seconde
Huile de trempe	70 °C / seconde
Air soufflé	20 °C / seconde
Air calme	2 °C / seconde
Dans un moule de sable	0,05 °C / seconde
Dans le four	0,01 °C / seconde (ou selon la programmation du cycle)

3.5. Le revenu

La trempe confère aux aciers une structure dure mais particulièrement fragile, une telle structure ne peut être mise en service. Ainsi on procède toujours à un traitement après trempe pour remédier aux effets néfastes de celle-ci tout en maintenant à un niveau assez élevé les autres propriétés (dureté, ...). Le revenu est le traitement qu'il faut faire subir au matériau afin d'arriver à un compromis (conditions optimales) entre les propriétés de résistance et celles de ductilité. Il consiste à réchauffer le métal à une température inférieure à la température de début de transformation (AC1 pour les aciers au carbone). Ce réchauffage va éliminer ou atténuer les tensions internes dues à la trempe et causes de fragilité. Les caractéristiques de résistance (R_e , R_m) vont diminuer au cours de revenu alors que la résilience augmente ; la température idéale de revenu serait celle qui correspond au point d'intersection de ces deux caractéristiques.

3.5.1. L'objectif du revenu

- Soit supprimer les contraintes de trempe (relâchement) ; on dit que le matériau a subi un adoucissement.
- Soit suivant la composition ; former d'autres phases qui ont tendance à améliorer la résistance du matériau, on dit qu'il a subi un durcissement.

3.5.2. 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. [26]

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. [26]

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. [26]

3.5.3. Cycle thermique du revenu

La figure 3.5 représente le cycle thermique du revenu ;

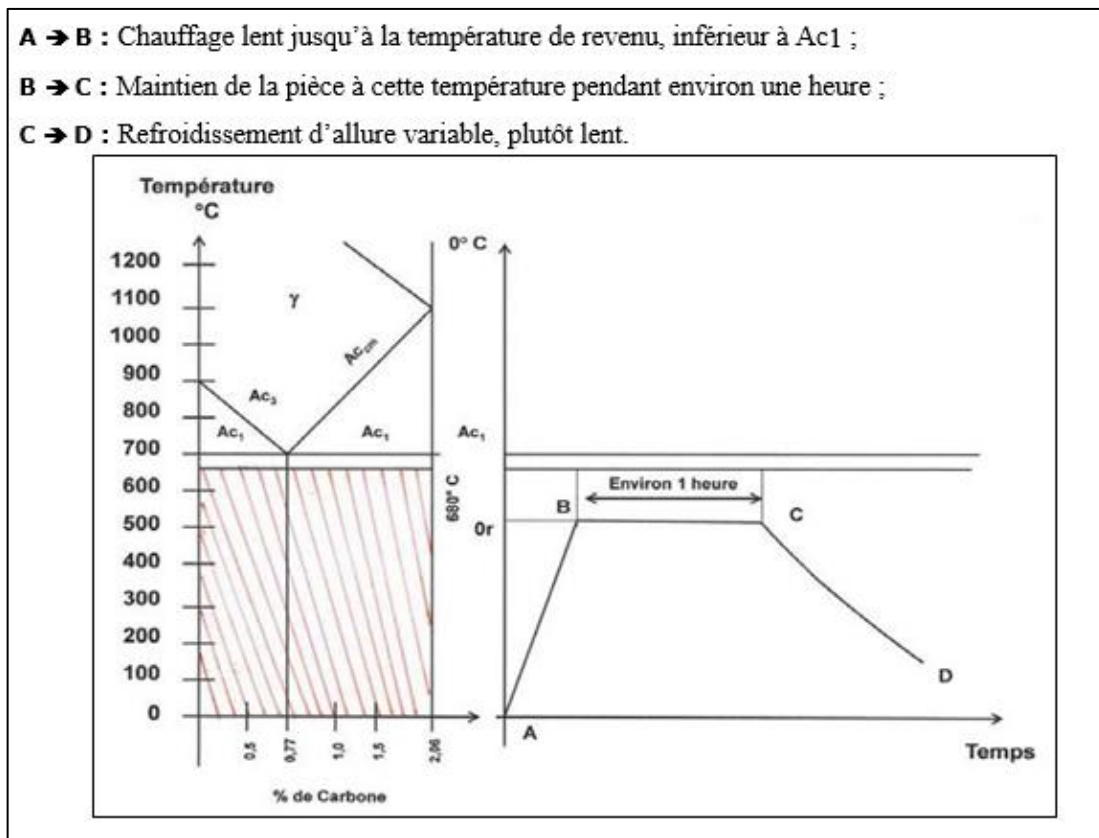


Figure 3.5 : cycle thermique du revenu. [24]

3.5.4. Transformations structurales au cours du revenu

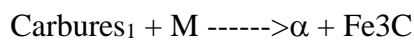
Le revenu se fait toujours sur une structure trempée, donc généralement sur une structure martensitique. Rappelons que la martensite est une phase sursaturée en carbone et instable (structure hors d'équilibre) ; ainsi elle aura tendance sous l'effet de la température à rejoindre l'état d'équilibre par un ré arrangement des atomes. Le revenu va amorcer un tel processus dont la force motrice sera donc la sursaturation en atomes de carbone. Notons que toutes les phases présentes susceptibles de se transformer seront concernées par la transformation au revenu. Ainsi, à côté de la martensite, l'austénite résiduelle se transformera aussi.

Les transformations au revenu vont se faire d'une manière graduelle suivant généralement 3 étapes :

Etape 1 : Diffusion du carbone en dehors de la martensite et formation de carbures de transition. Le % en carbone de la martensite diminue en principe de 0,25%

Etape 2 : L'austénite résiduelle se transforme en ferrite et cémentite : $\gamma_{res} \rightarrow \alpha + Fe_3C$.

Etape 3 : Transformation des carbures et de la martensite de l'étape 1 en ferrite et cémentite :



Suivant la température et la durée de revenu mises en œuvre, toutes les étapes ou seulement une partie seront exécutées. Ces transformations expliquent donc l'évolution des propriétés mécaniques au cours du revenu. En effet, la transformation de la martensite (structure hors d'équilibre) en ferrite et cémentite (structure d'équilibre) fait passer la structure de dure à moins dure. La première étape fait moins diminuer la dureté dans la mesure où la martensite bien que diminuée en carbone existe toujours.

4. 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 :

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

Chapitre 4
Partie
Expérimentale

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, revenu avec différents milieux de refroidissement sur les caractéristiques mécaniques d'un joint soudé sur un acier S235 JR.

2. Matériaux utilisés

2.1. Métal de base

Le choix de métal de base S235 JR est motivé par trois raisons :

- Sa bonne soudabilité.
- Sa limite d'élasticité intéressantes.
- Sa disponibilité sur le marché nationale.

Composition chimique

Tableau 4.1 : Composition chimique de l'acier S235JR.

Matériau	Composition chimique %				
	C	Mn	P	S	N
Acier S235 JR	Max 0.2	Max 1.4	Max 0.045	Max 0.045	Max 0.009

Caractéristiques mécaniques

Tableau 4.2 : caractéristiques mécaniques de l'acier S235JR.

Matériau	Limite Elastique Re	Résistance à la traction Rm	Densité	Point de fusion
Acier S235 JR	235 MPa	360 à 370 MPa	7,80	1370 à 1400 °C

2.2. Métaux d'apport

Le matériau de base va être soudé à l'arc électrique avec deux procédés de soudage EE et TIG ; (figure4.3) ;

Pour le procédé de soudage à l'arc électrode enrobé, nous avons choisi le métal d'apport basique E6070 de diamètre de 3.5mm, et ER70S-3.

Pour le procédé de soudage TIG, de manière permettant d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique.

Le tableau ci-dessous montre les compositions chimiques de chaque métal d'apport choisi pour cette études expérimentale.

Tableau 4.3 : composition chimique de matériaux d'apport ;

%	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	V
E6070	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10
ER70S-3	0.07	1.1	0.65	0.02	0.02	-	-	-	-



Figure 4.1 : métal d'apport utilisé (ER70S-3), (E7010).

3. Procédure de soudage

3.1. Préparation des tôles

Les pièces soudées : tôles de 250mm×90mm de 6 mm d'épaisseur.

Avant de passer par la procédure de soudage, il faut passer par l'étape de chanfreinage en V avec talent selon la norme ASME (figure4.2).

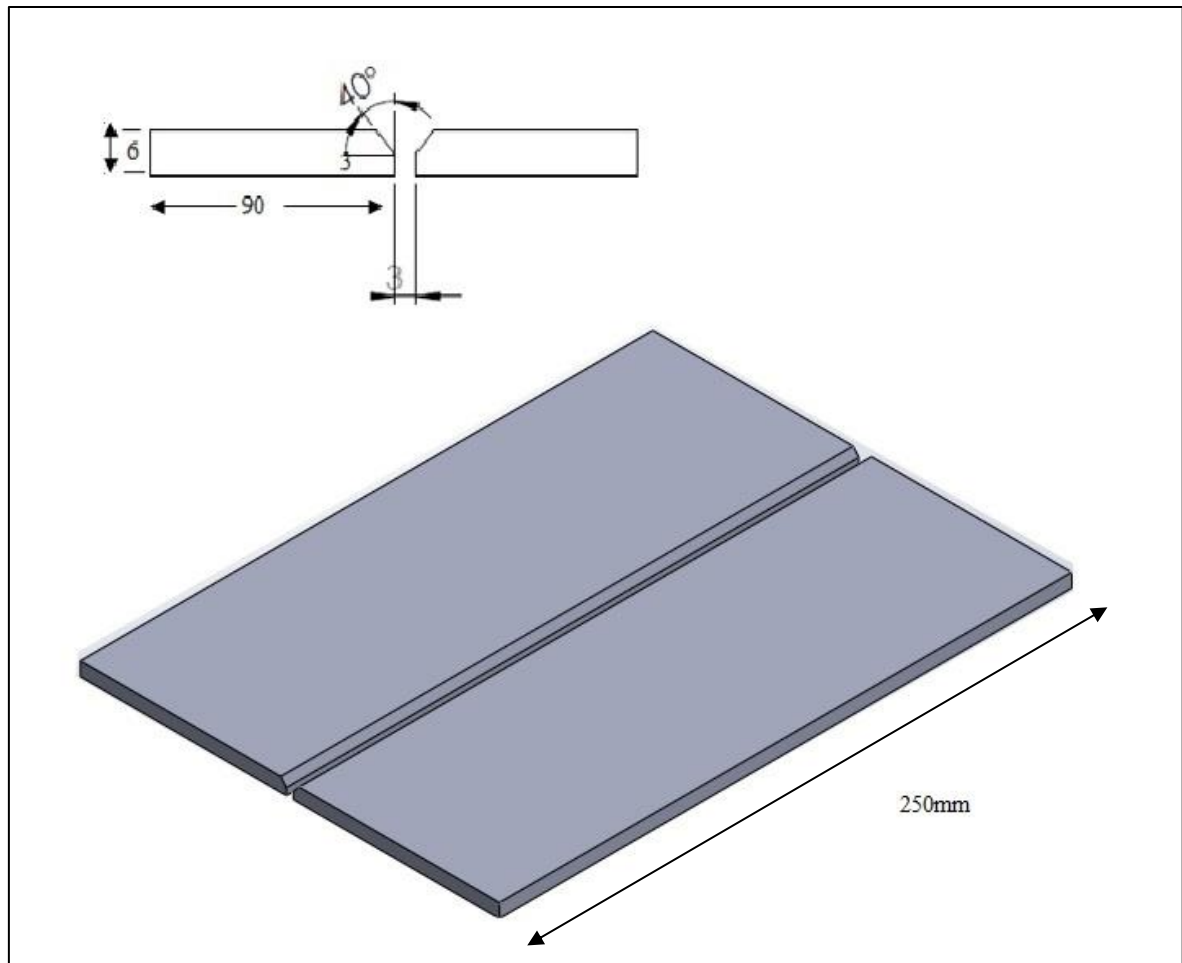


Figure 4.2 : les pièces à assemblés (chanfreinage)

3.2. Paramètres de soudage

Les opérations de soudage sont réalisées au niveau de l'atelier de soudage, au niveau de la société algérienne de zinc (ALZINC-Ghazaouet), par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant (tableau 4.4) donne les principaux paramètres d'électrode utilisés et les techniques d'exécution du joint de soudure.

- Intensité de soudage :
 - E7010 : (Diamètre d'électrode -1) $\times 50 = (3.5-1) \times 50 = 110$ A
Polarité directe pour assurer la pénétration.
 - ER70S-3 : En bout à bout : 20 à 25 Ampères par mm d'épaisseur. $20 \times 6 = 120$ A
Courant continu, polarité directe, électrode en tungstène thorié (rouge).

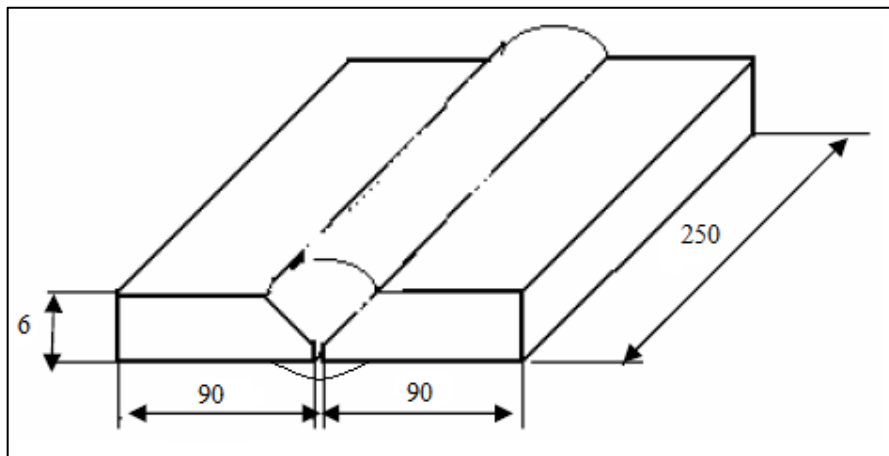
Tableau 4.4 : paramètres de soudage.

Procédé de soudage	MB	MA	I(A)	Polarité
TIG	S235JR	ER70S-3	120	CC, Directe -
EE	S235JR	EE basique E7010	110	Directe -

3.3. Exécution des joints soudés

Il est à noter qu'on laisse un jeu de l'ordre de 2,5mm entre les deux tôles à assembler, pour cette opération on doit utiliser les valeurs indiquées dans le tableau 4.4.

Après l'exécution de l'opération de soudage on obtient deux tôles assemblées comme l'indique les figures 4.3, 4.4 et 4.5 ;



Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure4.3 : tôles après exécution de soudage.



Figure4.4 : tôles après soudage EE.



Figure4.5 : tôles après soudage TIG.

3.4. Découpage des éprouvettes

Pour prélever des éprouvettes à partir de ces deux plaquettes soudées en électrode enrobé, et en TIG nous avons utilisé une guillotine hydraulique. Les étapes de découpages des éprouvettes illustrées dans la figure 4.6.

- La première étape c'est le traçage des pièces à découper.
- Ensuite ajuster les pièces soudées sur la table de guillotine pour assurer la similarité des éprouvettes.
- Découper les pièces pour obtenir des éprouvettes rectangulaires de L180mm. l 30mm.



Figure 4.6 : étapes de découpage des éprouvettes.

4. Traitement Thermique

4.1. Cycle de traitement effectué

A partir du diagramme Fe-Carbone on a déterminé la température de la trempe effectuée ;

$$Ac_3 = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La température de la trempe : $Ac_3 + 50 = 900 \text{ } ^\circ\text{C}$

Le cycle de traitement thermique effectué est réalisé par les étapes ci-dessous (figure 4.7) :

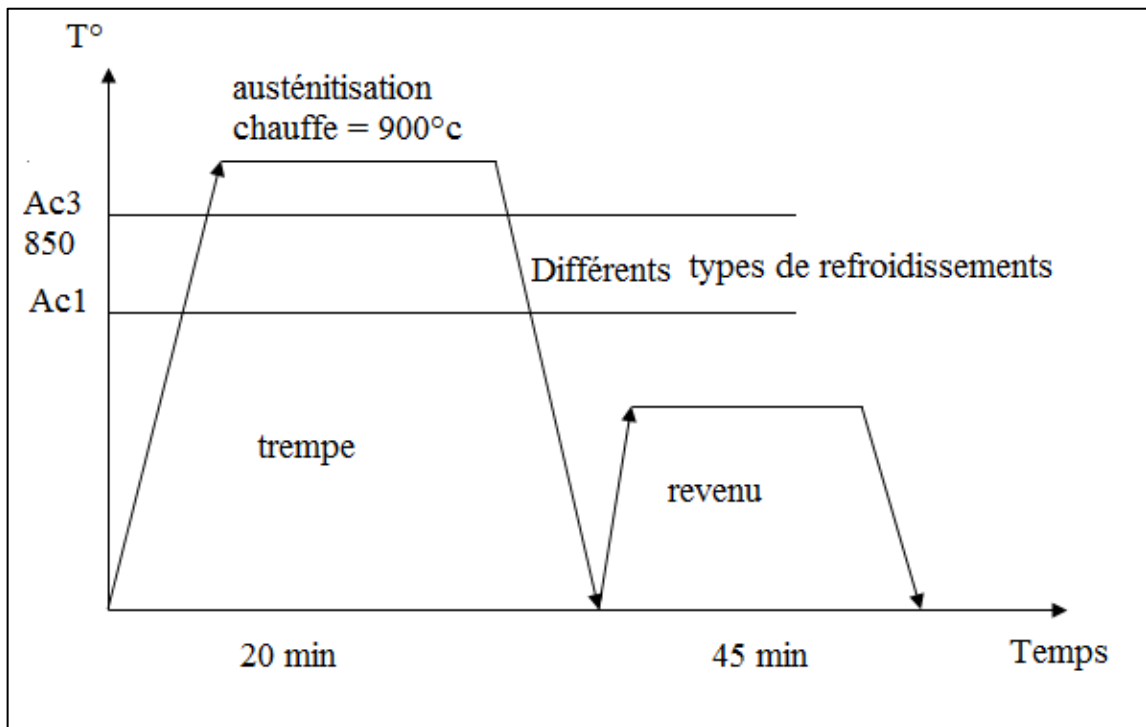


Figure 4.7 : cycle de traitement thermique effectué.

4.2. Etapes de traitement thermique

4.2.1. Trempe

- Chauffage des éprouvettes dans le four jusqu'à $900 \text{ } ^\circ\text{C}$ pour mettre l'acier dans le réseau cristallin cubique à face centrée correspondant au Fer γ ,
- Maintien pendant 20 minutes à 900°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 γ ,
- Nous avons adopté 3 différents milieux de trempe (air, eau, huile).

4.2.2. Revenu

- a. Chauffage des éprouvettes dans le four aux températures identifiées dans le tableau 4.5, et 4.6.
- b. Maintien pendant 45 minutes pour chaque éprouvette,
- c. Refroidissement à température ambiante.

Tableau 4.5 : paramètres des traitements thermiques (variation de milieu de la trempe).

Éprouvettes	Tt °c	Tr °c	Milieux de la trempe
EE	900	220	Eau
	900	220	Aire libre
	900	220	Huile
TIG	900	450	Eau
	900	450	Aire libre
	900	450	Huile

Tableau 4.6 : paramètres des traitements thermiques (variation de températures de revenu).

Éprouvettes	Tt °c	Tr °c	Milieux de la trempe
EE	900	300	Huile
	900	450	Huile
TIG	900	200	Huile
	900	500	Huile



Figure 4.8 : traitements thermiques des éprouvettes dans un four a résistance.

5. Polissage

Nous passons les éprouvettes sur une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse). C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométries des grains abrasif du plus gros au plus fin :(80,180, 220, 280, 320, 500 ,800).

Cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon. La polisseuse utilisée est représentée dans la figure 4.9.



Figure 4.9 : étape de polissage des éprouvettes.

6. Caractérisations mécaniques

6.1. Essai de traction

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

6.1.1. Eprouvettes de traction

La forme et les dimensions des épreuves dépendent de la forme et des dimensions de matériau dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques.

Les dimensions de l'éprouvette de traction sont mentionnées dans la figure 4.10 ;

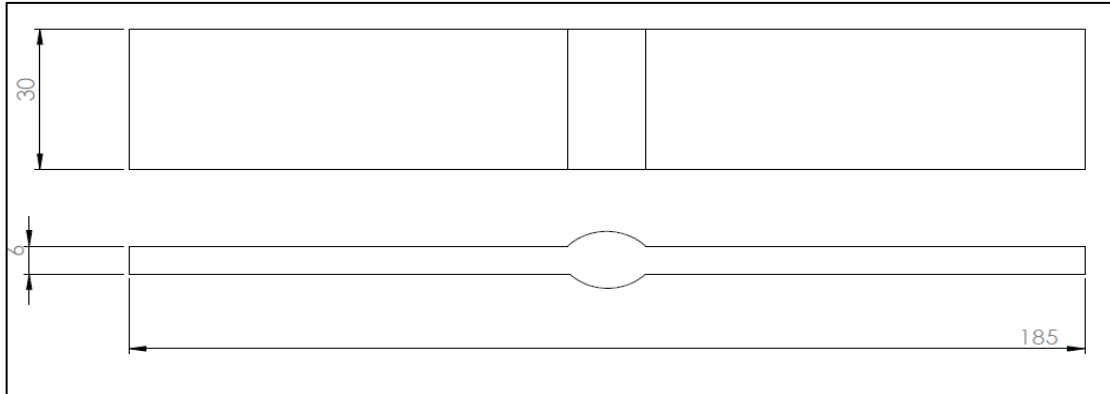


Figure 4.10 : épreuves de traction.

6.1.2. Exécution de l'essai

La machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande hydraulique (figure 4.11).



Figure 4.11 : Machine de traction utilisé.

6.2. Essai de dureté

6.2.1. 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 est 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'écroutissage.

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 charge.

6.2.2. Exécution de l'essai

Le duromètre utilisé est de type Rockwell, HRC, illustré dans la figure 4.12. 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.



Figure 4.12 : Appareils de mesure de dureté utilisé.

7. Conclusion

La partie expérimentale nous permet de définir et vérifier les différentes caractéristiques mécaniques avant et après les assemblages par différents procédés de soudage et les différents traitements thermiques effectués afin d'avoir de pouvoir choisir les modes de soudage et les traitements thermiques adéquats avec la nature des propriétés demandées.

Chapitre 5
Résultats
Et discussions

1. Introduction

Nous discutons dans ce chapitre les différents résultats relatifs aux essais mécaniques appliqués sur la nuance du métal S235JR, Comme nous l'avons mentionné dans le quatrième chapitre. Le but recherché est d'estimer l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques des éprouvettes d'acier de construction mécanique type S235JR, d'épaisseur de 6mm soudés par deux types de soudage TIG, EE par les essais expérimentaux suivants :

- L'essai de traction.
- L'essai de dureté.

2. Résultats d'essais de traction

2.1. Caractérisation des soudures

Pour caractériser les joints de soudure nous effectuons un essai de traction aux éprouvettes Soudées, avec les paramètres mentionnés sur le tableau 5.1.

Tableau 5.1. Les paramètres de soudage des éprouvettes de caractérisation.

Procédé de soudage	MB	MA	Ep (mm)	I(A)	Polarité
TIG	S235JR	ER70S-3	6	120	CC, Directe
EE	S235JR	EE basique E7010	6	110	Directe

Les essais de traction menés, ont permis d'obtenir les courbes charges/déplacements représentées sur la figure 5.1 ci-dessous ;

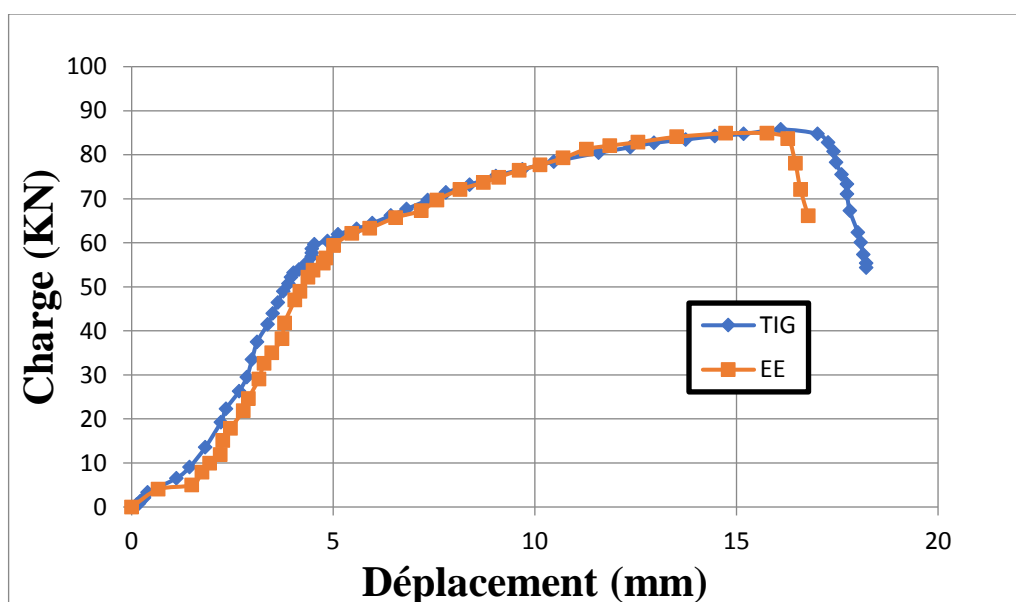


Figure5.1. Courbes charge déplacement pour caractérisation de joint soudé.

Tableau5.2 : caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées.

Soudure	Rm (MPa)	Re (MPa)
TIG	475	457
EE	480	448

On remarque que les deux joints soudés par TIG, ou EE ont presque les mêmes caractéristiques mécaniques.

2.2. Effets du milieu de la trempe sur le comportement mécaniques des pièces soudées

a. Eprouvette de soudure EE

Les éprouvettes soudées en EE ont été trempées dans trois milieu différents, à l'air, à l'huile et à l'eau ; Afin comprendre leurs influences sur le comportement mécanique, ils ont été soumis à un essai de traction qui nous a donné la courbe charge déplacement (figure 5.2).

Nous avons remarqué que pour une trempe à l'huile, l'éprouvette a atteint une résistance à la traction $R_m=440.976 \text{ N/mm}^2$ et un déplacement maximal de 40 mm, tandis que pour la trempe à l'eau l'éprouvette a atteint une meilleure résistance à la traction $R_m=588.716 \text{ N/mm}^2$ et un déplacement maximal de 22 mm et l'éprouvette trempé à l'aire a une résistance à la traction $R_m=415.672 \text{ N/mm}^2$. Et un déplacement maximal de 36 mm.

Donc pour ce cas la trempe à l'eau nous donne une meilleure résistance à la traction par rapport à l'huile et à l'air, contrairement la trempe à l'huile nous donne un meilleur allongement.

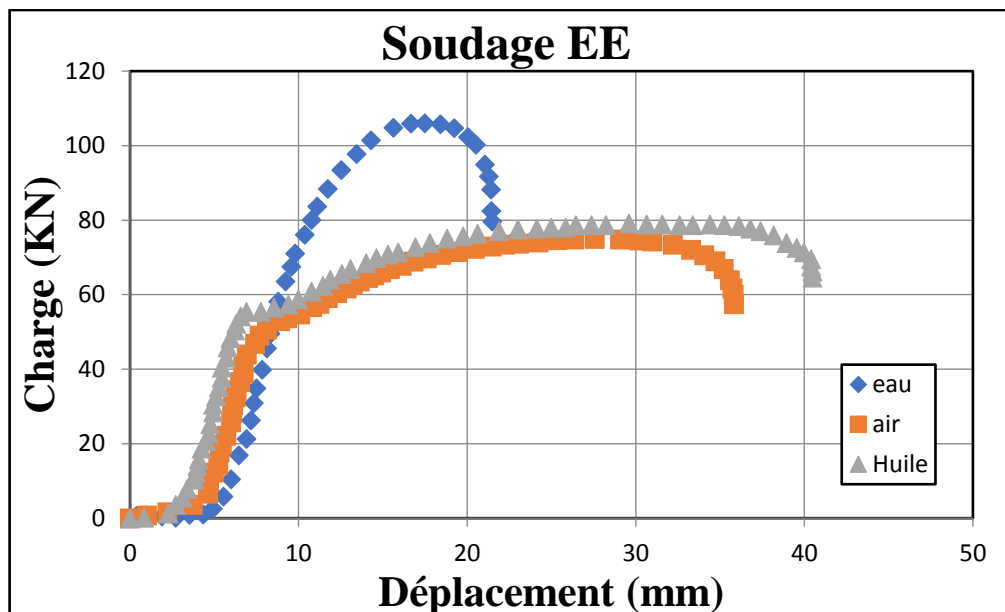


Figure5.2. Courbes de traction, effets du milieu de trempe pour éprouvettes soudées en EE.

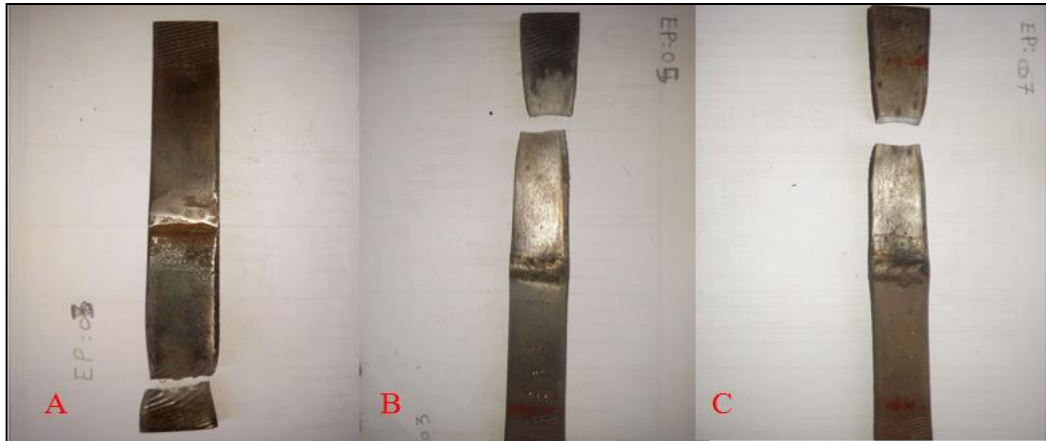


Figure 5.3. Éprouvettes soudées à EE

(A) trempé à l'eau, (B) trempé à l'huile et (C) trempé à l'aire

b. Epreuve de soudure TIG

Les éprouvettes soudées en TIG ont été trempées à l'air, à l'huile et à l'eau puis soumises à un essai de traction pour comprendre leurs influences sur le comportement mécanique. Nous avons remarqué dans la courbe de traction (figure 5.4) que pour une trempée à l'huile, l'éprouvette a atteint une résistance à la traction $R_m=473.829 \text{ N/mm}^2$ et un déplacement maximal de 35 mm tandis que pour la trempée à l'eau l'éprouvette a atteint une meilleure résistance à la traction $R_m=495.868 \text{ N/mm}^2$ et un déplacement maximal de 22 mm mais l'éprouvette trempée à l'air a une faible résistance à la traction $R_m=333.435 \text{ N/mm}^2$, et un faible déplacement maximal de 12 mm.

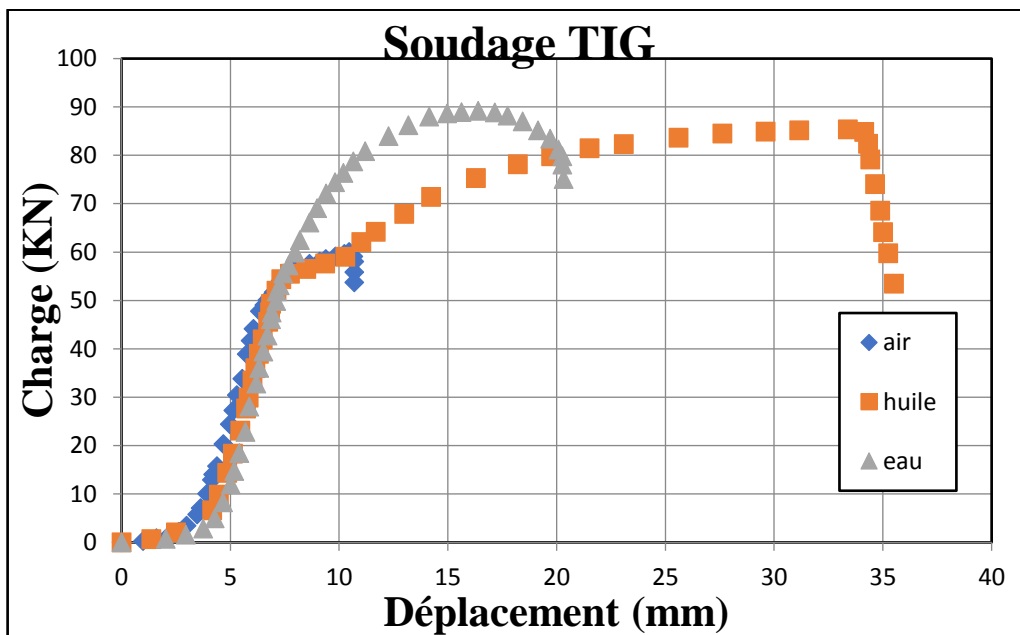


Figure 5.4. Courbes de traction, effets du milieu de trempée, éprouvettes soudées avec TIG.

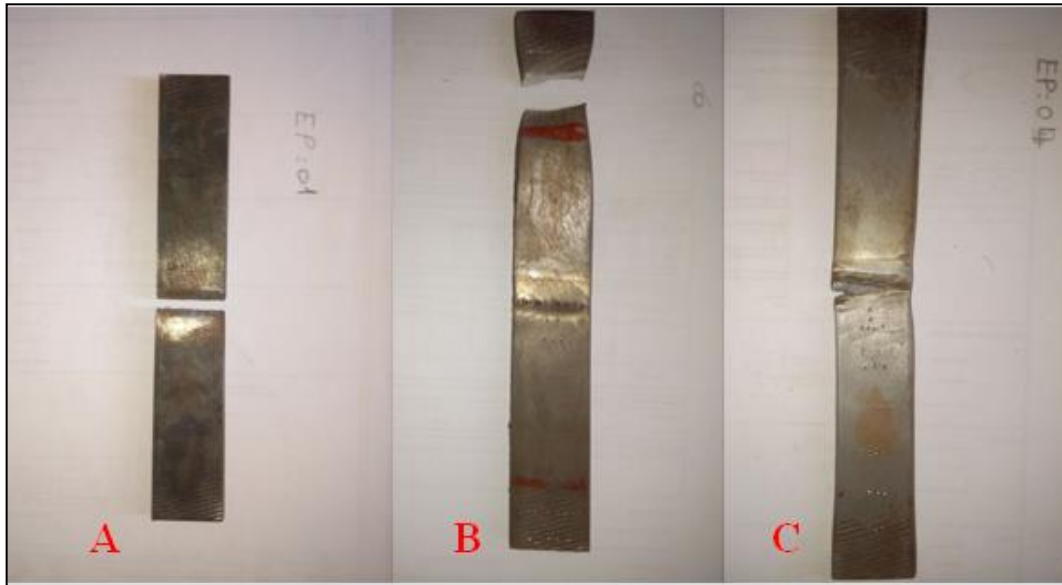


Figure 5.5. Éprouvettes TIG ; (A) trempé à l'aire (B) trempé à l'eau (C) trempé à l'huile.

c. Conclusion :

La trempe à l'eau de l'acier S235JR nous donne en général une meilleure résistance à la traction pour le cas de soudage à l'EE ou TIG, par contre la trempe à l'huile (Tr :220°C) nous donne une augmentation de ductilité, (meilleur allongement) par rapport aux autres milieux de trempe.

2.3. Effets des différents revenus sur le comportement mécanique des pièces soudées

a. Epreuve de soudure EE

Les courbes (Figure 5.6) représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par procédé EE

Les éprouvettes ont subi une trempe à l'huile à 900 °C puis un revenu de 420 °C pour l'éprouvette N° 10 et 300 °C pour l'éprouvette N° 11.

On remarque qu'il y'a une similarité entre les résultats des deux pièces car les éprouvettes ont atteint une résistance à la traction $R_m=547 \text{ N/mm}^2$ mais avec différents ruptures l'une s'est rompue pour un déplacement maximal de 46 mm dans le métal de base tandis que l'autre s'est rompue à un déplacement de 25 mm. En remarque l'augmentation de ductilité avec la diminution de températures de revenu, et la trempe à l'huile nous donne une meilleure résistance dans cette plage de température de revenu 300° et 420°.

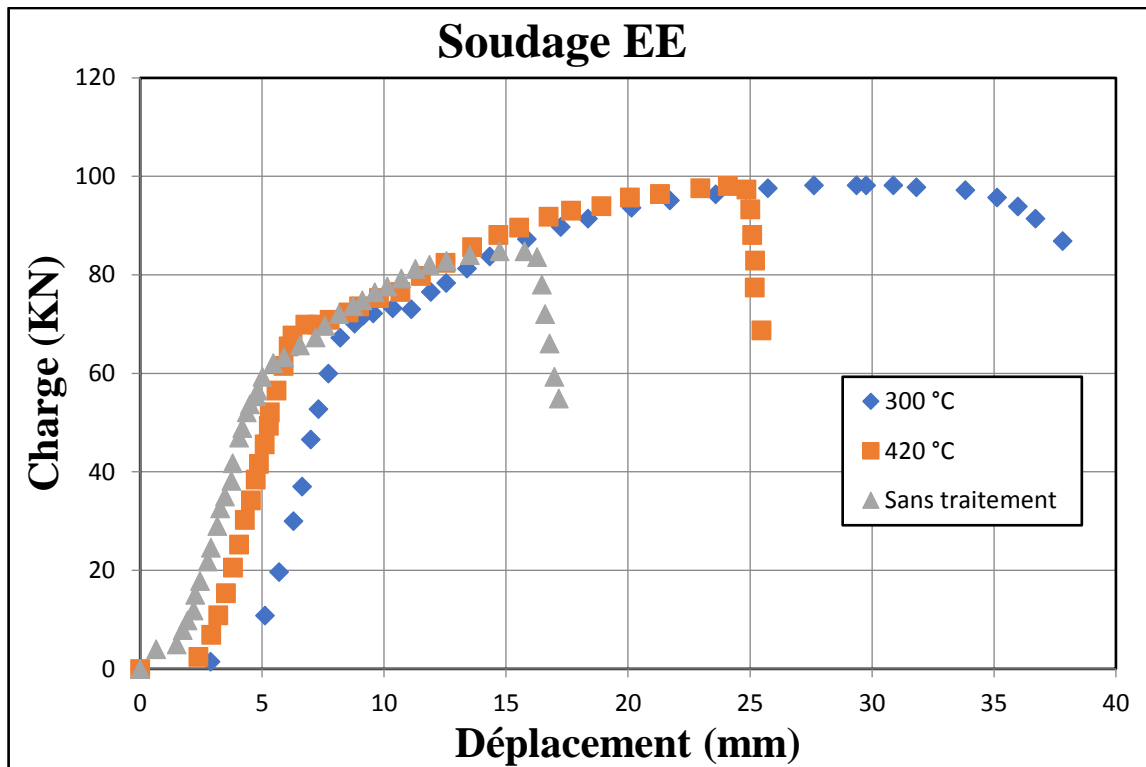


Figure 5.6. Les courbes de traction, effets de Tr éprouvettes soudées en EE.



Figure.5.7. Éprouvette trempé a huile revenu 300°C,420°C.

Nous concluons que l'allongement à un effet inverse avec la température de revenu, si la température de revenu augmente la résistance à l'allongement diminue, par contre aucun effet remarquable de température de revenu sur la résistance à la traction.

b. Eprouvette de soudure TIG

Les courbes de traction (Figure 5.8) représentent l'évolution de la charge en fonction du déplacement jusqu'à la rupture de l'assemblage soudé par procédé TIG. Les éprouvettes ont subi une trempe huile à 900 °C puis un revenu de 200 °C pour l'éprouvette N° 12 et 500 °C pour l'éprouvette N° 9.

On remarque qu'il y'a une similarité entre les résultats des deux pièces car les éprouvettes ont atteint une résistance à la traction $R_m=547 \text{ N/mm}^2$ mais avec différent rupture, aussi une augmentation claire d'allongement par apport aux pièces non traitées, qui assure l'influence de revenu sur les propriétés mécaniques de cette nuance d'acier.

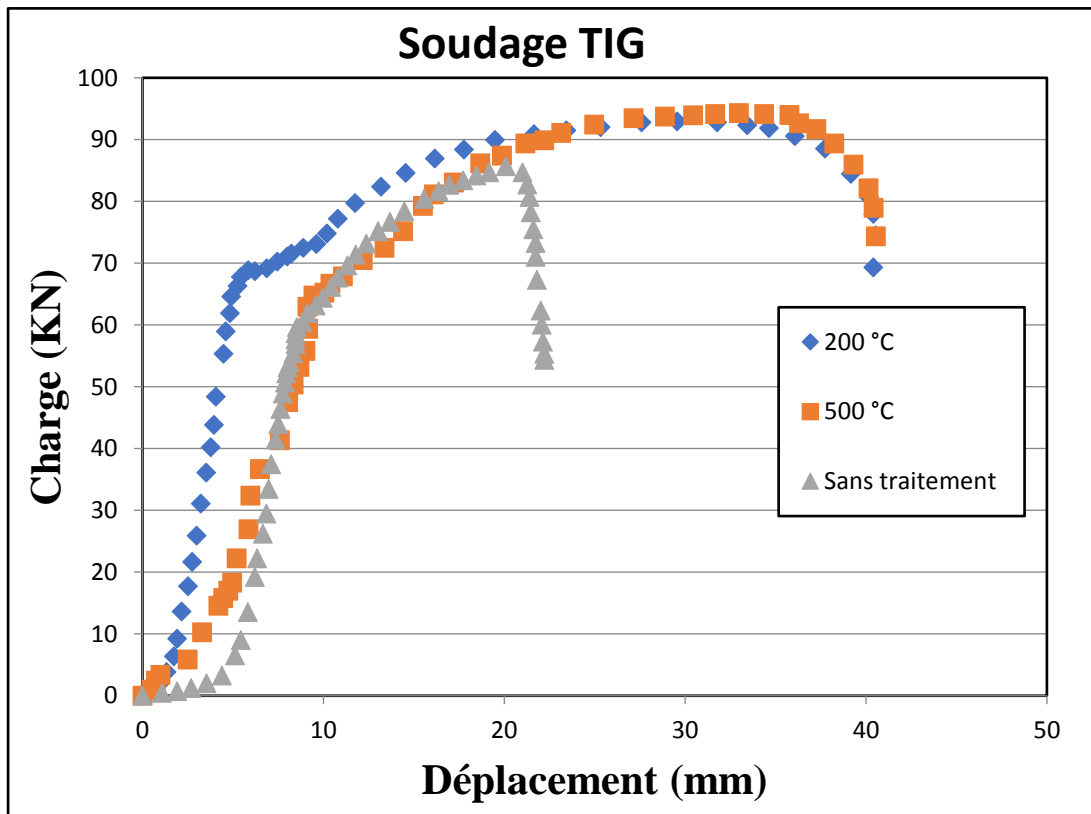


Figure 5.8. Les courbes de traction, effets de Tr, éprouvettes soudées en TIG.

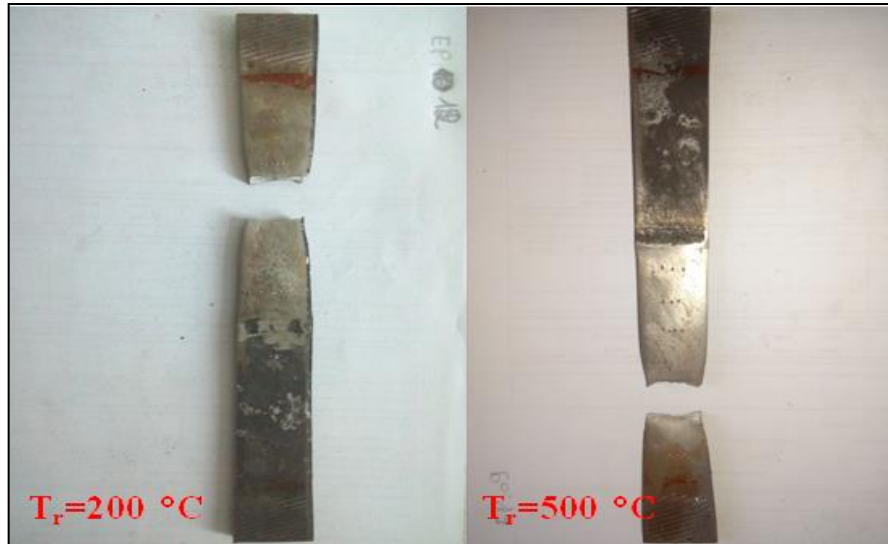


Figure.5.9. Éprouvette trempé à huile revenu à 200°C et à 500°C.

3. Résultat d'essais de dureté

3.1. Effets de milieux de la trempe sur le comportement mécaniques des pièces soudées

Les essais de la dureté ont montré une forte augmentation de dureté dans la pièce trempée à l'eau jusqu'à 56 HRC, plus une relaxation et homogénéisation de dureté dans toute la pièce contrairement à la trempe à l'huile et l'air, la dureté augmente dans la ZAT à cause du cycle thermique durant le soudage.

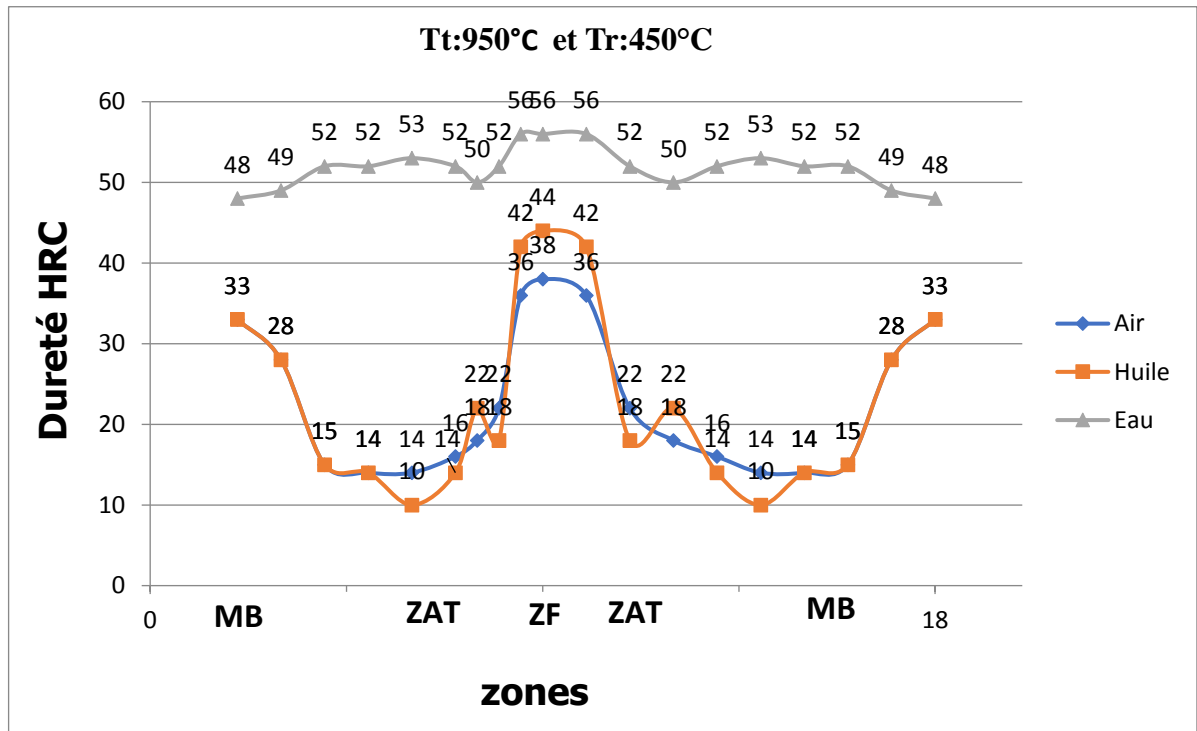


Figure.5.10. Courbe de dureté HRC pour différent milieux de trempe

3.2. Effets des différents revenus sur le comportement mécanique des pièces soudées

Les essais de la dureté ont montré que pour $Tr= 220^{\circ}C$ on a remarqué une augmentation de la dureté au niveau du cordon tandis que pour $Tr= 500^{\circ}C$ nous avons une diminution.

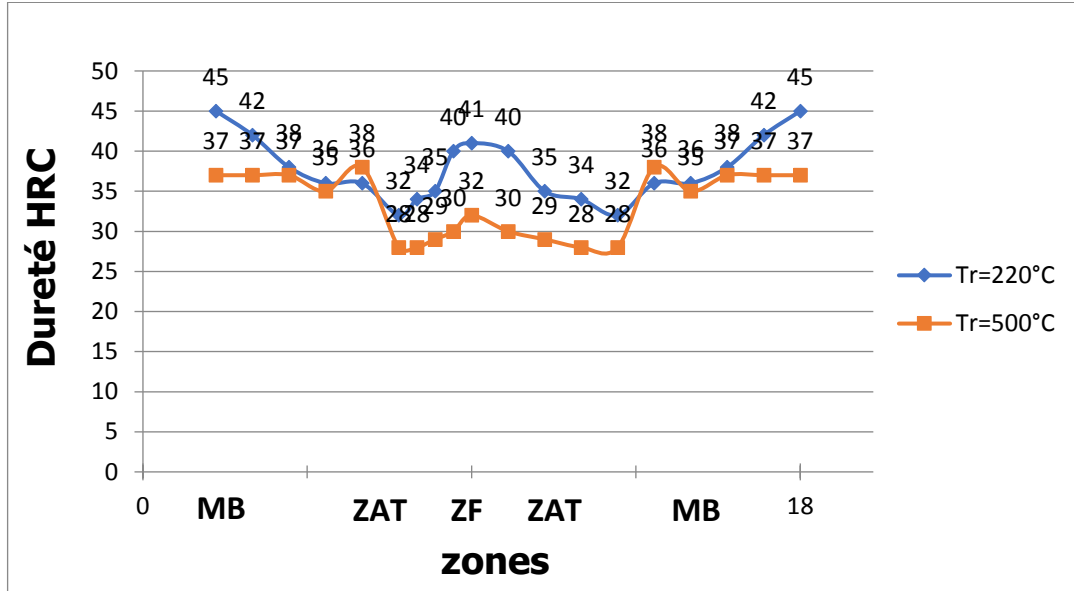


Figure.5.11. Courbes de dureté HRC pour différent températures de revenu, EP TIG.

Les essais de la dureté ont montré que pour $Tr= 420^{\circ}C$ nous avons une augmentation de la dureté au niveau du cordon contrairement à la température du Revenu $Tr=300^{\circ}C$ ou on remarque une diminution de la dureté sur une plage de température allant de 200 à 300 °C à des effets négatifs.

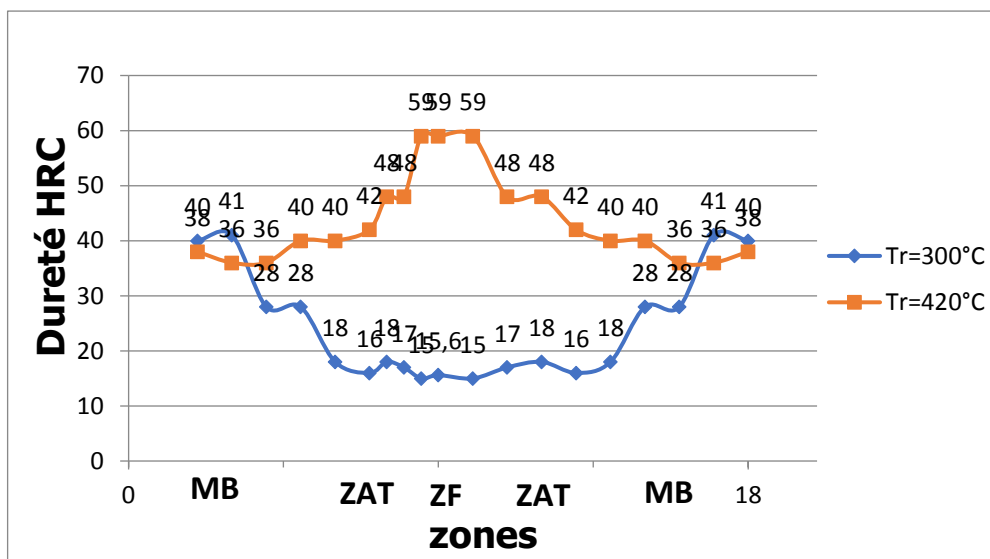


Figure.5.12. Courbes de dureté HRC pour différent températures de revenu, EP EE.

4. Conclusion

Les essais effectués sur différents modes de soudage ont des effets différents sur des pièces traitées ; cette différence est due spécialement au type de bain du fluide utilisé pour le refroidissement en plus du type de soudage.

Le soudage en EE et au TIG n'ont pas une grande différence dans le comportement à la traction, mais le milieu de refroidissement influe. Le refroidissement à l'eau donne une meilleure résistance à la traction mais avec un allongement moyen.

Le trempe à l'huile nous donne une meilleure ductilité, le meilleur allongement obtenu par la trempe à l'huile, $T_r : 440 \text{ }^\circ\text{C}$.

La trempe à l'eau $T_t=900^\circ\text{C}$ et $T_r=450^\circ\text{C}$ donne une dureté maximale plus une relaxation et homogénéisation de dureté dans toute la pièce

Le revenu à la température $T_r= 420^\circ\text{C}$ nous donne un durcissement au niveau du cordon, jusque a atteint la dureté maximale de 59 HRC.

On remarque dans la température du Revenu $T_r=300^\circ\text{C}$ une diminution de la dureté sur une plage de température

La plage de température de revenue 200 à 300 °C à des effets négatifs sur la dureté des éprouvettes soudés.

Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du traitement thermique des soudures en acier S235JR. 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, et GTAW. Nous nous sommes proposé d'étudier le comportement mécanique des pièces soudées.

Après la réalisation des jonctions moyennant le soudage des tôles d'acier doux par procédés de soudage à l'arc électrique SMAW, et GTAW, en bout à bout, notre travail visait en premier lieu la caractérisation mécanique des pièces soudées. L'objectif étant d'expliquer les propriétés mécaniques du cordon de soudure qui sont propres à notre procédé.

Pour ce faire, la mise en œuvre des techniques de caractérisation par essais de dureté Rockwell, et de traction a été indispensable. Les travaux menés consolidés par ces différentes analyses ont confirmé un certain nombre de résultats, à savoir :

- L'analyse des résultats de caractérisation des joints soudés nous ramener à conclure que le soudage en EE et le soudage TIG ne donne pas une grande variation dans la résistance à la traction, et que le joint soudé résiste plus que le matériau de base.
- Les résultats des traitements thermiques nous ramené à conclure que l'acier doux S235JR peut subir des traitements thermiques.
- L'effet du milieu de la trempe influe sur la résistance à la traction ainsi que sur l'allongement ; la trempe à l'eau donne la meilleure résistance à la traction, et la trempe à l'huile donne un meilleur allongement. Ainsi que la température de revenu influe inversement sur l'allongement.
- Les essais de la dureté ont montré que la dureté à des effets négatifs sur une plage de température de revenu de 200 à 300 °C, et que la trempe à l'eau ($T_t : 900^\circ\text{C}$, $T_r : 450^\circ\text{C}$) nous donne une homogénéisation et forte augmentation de dureté jusqu'à 56 HRC dans toute la pièce contrairement à la trempe à l'huile et l'air, la dureté augmente dans la ZAT à cause du cycle thermique durant le soudage.

Références bibliographiques

- [1] GUITOUN ZAHIA, Caractérisation mécanique d'un assemblage à clin en acier inoxydable soudé par le procédé MAG, mémoire master 2, Université de Technologie Tlemcen, 2018.
- [2] R. BLONDEAU, procédés et application industrielle du soudage, LAVOISIER 2001, Paris.
- [3] brochure Brasage et Soudobrasage du Cuivre et de ses Alliages, publiée par le Centre d'Information du Cuivre, boulevard Berthier. Paris.
- [4] H. Granjon ; Bases métallurgiques du soudage, Eyroles, Paris ,1977.
- [5] H.P. Lieurade, Spécial mécano soudage, CETIM Informations N°118, Septembre 1990.
- [6] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [7] A. Roos, B. Milet. "Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation, Lavoisier, 1982.
- [8] J. Paul bailon, J. Marie dorlot. Des matériaux, 3eme édition, école de polytechnique de mtl, 2000-2001.
- [9] MADDOX S J, Assessing the significance of flaws in welds subject to fatigue, Welding Journal, p.401-s sept. 1974.
- [10] LAWRENCE F.V. MUNSE W.H."Fatigue crack propagation in butt welds containing joint penetration defect". Welding Research Supplement, 1973.
- [11] MERSEDEH SAFA, Théorie du réacteur et notions scientifiques fondamentales Matériaux Groupe de formation technique.
- [12] CSMOFMI. Soudage et assemblage Guide d'auto-apprentissage, p.8, Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle,2010.
- [13] FRANÇOIS Dominique, Essais de rupture, technique de l'ingénieur, 2012.
- [14] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.
- [15] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux,2006-2007.

- [16] BENZAADA Said "traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes", Université de Biskra, 2003.
- [17] RAYMOND Langevin, Rémi Desgagnés, guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermiques, PERFORM ,2015.
- [18] ZAOUI Moussa, Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des constructions soudées, Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2009.
- [19] ARFAOUI Ali, CHAKER Med Amir, "Matériaux Métalliques", ISET Kasserine 2010.
- [20] MOUCHONNAT CHRISTOPHE, le soudage Tungstène Inert Gas (tig), centre de ressources des métiers de l'automobile, France, 2007.
- [21] soudage, Disponible sur : <http://www.lyc-de-gaulle-pulversheim.ac-strasbourg.fr> consulter le 26/04/2019.
- [22] soudage, Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_TIG consulter le 26/04/2019.
- [23] soudage, Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/mise-en-forme-des-metaux-aspects-mecaniques-et-thermiques-42348210/soudage-et-soudabilite-metallurgique-des-metaux-m715/> Consulter le 26/04/2019.
- [24] Fragilité, disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fragilit%C3%A9> consulté le 12/04/2019.
- [25] Module de Young, disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9formation_%C3%A9lastique#Module_de_Young consulté le 25/04/2019.
- [26] dureté, disponible sur : <https://www.pce-france.fr/mesureurs/links/explication-mesure-durete.htm> consulté le 25/04/2019.
- [27] Dureté, disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_\(mat%C3%A9riau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_(mat%C3%A9riau)) consulté le 28/04/2019.