

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Génie Mécanique  
Domaine : Sciences Technologie  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Construction Mécanique  
Thème

**Analyse des Propriétés Mécaniques D'un Joint de Soudure en Acier**

**Présenté Par :**

- 1) Mr : SENOUCI Abdelmadjid Hichem
- 2) Mr : CHERKI Zino Akram Houssef Eddine

**Devant le jury composé de :**

Dr : Ahmed SAIMI	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr : Harchouche Zine Elabidine	M A B	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Examineur
Mr : OUARI Mohamed Amine	M A B	UAT.B.B (Ain Temouchent )	Encadrant

*Année Universitaire 2023/2024*

## *D*édicace

*En premier lieu, rendons grâce à Dieu le Tout-Puissant qui nous a donné le courage et la volonté de réaliser ce modeste travail de recherche.*

*Je suis reconnaissante envers moi-même pour avoir pu mener à bout mes études avec une telle patience et un tel acharnement. C'est avec respect et énormément de reconnaissance que je reconnais le soutien massif de mon encadrant, Mr. ouari mohamed parce que son importante collaboration a été inestimable dans le cadre de cette recherche.*

*Je voudrais consacrer une spéciale dédicace aux personnes qui me sont chers, à commencer par les piliers de ma vie, mes parents. Ils ont été là pour moi tout au long de mon parcours et je leurs serait éternellement reconnaissante*

*. J'entame mes dévotions les plus intimes à mes parents. Pour ma mère et mon père, la richesse d'une présence, mais aussi ses patiences, ses interventions actives pendant mes périodes d'absence . ont fait une contribution significative à ce travail.*

*Je voudrais également mentionner toutes mes amis et spécialement ma deuxième famille le bureau de wilaya A. R. E. N*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury qui ont examiné ce travail en détail, et tout le corps professoral et administratif de l'uat.*

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de M'avoir donné les Forces pour accomplir ce travail.

Je remercie profondément mes très chers parents( A l'âme de ma chère mère ;mon père) qui se sont donnés beaucoup de peine dans la vie pour ma réussite, je souhaite que Dieu les protège et leur donne la santé et la vigueur.

À mes chères sœurs: nessrine., cherifa Et un merci spécial à mon encadreur Dr.ouari Mohamed

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues, et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

# SOMMAIRE

---

Notations.....	01
Listes des figures.....	05
Introduction générale .....	07
CHAPITRE I	
I-1- INTRODUCTION : .....	10
I-2-Type de soudure .....	10
I-3- DIFFERENTS TYPES DE SOUDAGE .....	11
I-3-1- Soudage par fusion .....	11
I-3-1-1 Soudage oxyacétylénique .....	11
I-3-1-2 Différents types de chalumeaux pour le soudage oxyacétylénique .....	12
I-3-1-3 Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique .....	12
I-3-1-4 La description de la flamme oxyacétylénique neutre .....	12
I-3-1-5 Protection des soudeurs .....	13
I-3-2 : Soudage à l'arc électrique .....	13
I-3-2 -1 : Le soudage à l'électrode enrobée .....	14
I-3-2 -2 : Avantages du procédé.....	16
I-3-2 -3 Métal d'apport .....	16
I-3-3 Soudage sous flux en poudre .....	17
I-3-3-1Avantages du procédé.....	18
I-3-3-2Types de flux en poudre utilisés.....	18
I-3-4 :Soudage au plasma.....	18
I-3-5 : Soudage par faisceau laser .....	20
I-3-5 -1 :Procède du soudage par fusion .....	21
I-3-6 Soudage par résistance .....	21
I-3-6-1 :Soudage par points .....	21
I-3-6-1-1 : Paramètres du procédé de soudage par points .....	22
I-3-6-2 : Soudage a la molette .....	22
I-3-6-3:1Avantages du procédé.....	22
I-3-6-4 Les inconvénients du procédé.....	22
I-3-6-2-1 : Les différents types de soudures à la molette .....	22
I-3-6-2-2 :Les avantages du procédé.....	23
I-4- ZONES DE SOUDURE .....	23
I-4-1 :La zone fondue.....	23
I-4-2 :La zone affectée thermiquement.....	23

---

# SOMMAIRE

---

I-4-3 : La zone de liaison .....	24
I-4-4 : Le métal de base .....	24
I-5 TENUE MECANIQUE D'UN JOINT SOUDE.....	24
I-6 : PRINCIPAUX DEFAUTS DE SOUDURE ET CLASSIFICATION .....	25
I-6 -1 : Fissures .....	25
I-6 -1-1 :Fissuration à froid .....	25
I-6 -1-2 :Fissuration à chaud .....	25
I-6 -2 : Manque de pénétration .....	26
I-6 -3 : Protection du problème .....	26
I-6 -4 : Manque de fusion.....	26
I-6 -5 : Morsures .....	26
I-6 -6 : Soufflures .....	26
I-6 -7 Inclusions de laitier.....	27
I-7 : Problématiques du soudage .....	27
I-8- DIFFERENTS CONTROLES EFFECTUES SUR LES JOINTS DE SOUDURES .....	28
I-8-1- Contrôles non destructifs .....	28
I-8-1-1- Contrôle dimensionnel.....	28
I-8-1-1-1 : Principe du contrôle visuel et dimensionnel .....	28
I-8-1-1-2 :Condition du contrôle visuel et dimensionnel.....	28
I-8-1-1-3 : Materials de contrôle .....	28
I-8-1-1-4 :Forme et dimensions .....	28
I-8-1-2- Contrôle par ressuage .....	29
I-8-1-2-1 :Principe du contrôle par ressuage .....	29
I-8-1-2-2 :Applications du contrôle par ressuage .....	30
I-8-2 : Qui peut effectuer ce contrôle ?.....	30
I-8-2-1- Contrôle radiographique .....	31
I-8-2-1-1-Principe de contrôle .....	31
I-8-2-1-2 : Avantages du contrôle par radiographie .....	31
I-8-2-1-3 : Inconvénients du contrôle par radiographie .....	32
I-8-2-2 : Contrôle par ultrasons .....	32
I-8-2-2-1 : Principe .....	32
I-8-2-2-2 Appareillage .....	33
I-8-2-3 : Le contrôle par magnétoscopie .....	33

---

# SOMMAIRE

---

I-8-4: Contrôles destructifs .....	34
I-8-4-1: Macrographie .....	34
I-8-4-1-1: Principe de l'essai .....	34
I-8-4-1-2. Préparation de l'éprouvette d'examen .....	35
I-8-4-1-3 :Polissage de l'éprouvette d'examen .....	35
I-8-4-1-4 : Attaque chimique de l'éprouvette d'examen .....	35
I-8-4-1-5 : La structure de l'éprouvette d'examen .....	35
I-8-4-2: Essai de traction.....	36
I-8-4-2-1: Principe de l'essai mécanique .....	36
I-8-4-2-2 : Localisation des éprouvettes de traction dans un joint soudé.....	36
I-8-4-2-3 : Dimensions des éprouvettes de traction .....	36
I-8-4-2-4 : Caractéristiques mécaniques de la traction.....	37
I-8-4-3 : Essai de dureté .....	37
I-8-4-3-1 :Principe.....	37
I-8-4-3-2 :Les différents types d'essais de dureté .....	38
I-8-4-3-3 : L'essai de dureté Vickers sur assemblage soudé .....	39
I-8-4-3-4 : Localisation des empreintes dans les soudures bout à bout .....	40
I-8-4-3-5 LOCALISATION DES EMPREINTES DANS LES SOUDURES D'ANGLES.....	40
I-8-5: Essai de résilience .....	40
I-8-5-1: Principe de l'essai mécanique .....	40
I-8-5-2 : Localisation des éprouvettes de résilience dans un joint soudé .....	41
I-8-5-3 : Les types et dimensions des éprouvettes de résilience .....	42
I-8-5-4 :Caractéristiques mécaniques de la résilience .....	42
I-8-5-5 : Les températures d'essais des résiliences .....	42
I-9 : CONCLUSION .....	43
CHAPITRE II	
II-I : INTRODUCTION .....	44
II-2 :PRESENTATION GENERALE DU MATERIAU ETUDIE .....	44
II-2-1 : Mesure de dureté .....	44
II-3 : ESSAIS MECANIQUES .....	46
II-3-1: Essais de traction .....	46
II-3-1-1 : Objectif .....	46

---

---

## SOMMAIRE

---

II-3-1-2- Démarche expérimentale.....	46
II-3-1-2-1 : Eprouvettes d'essai .....	46
II-3-1-2-2 : Différentes éprouvettes utilisées pour les essais de traction.....	47
II-3-1-2-3 : Dispositif expérimental et conditions d'essai .....	48
II-3-1-3 : Caractéristiques conventionnelles de traction .....	49
II-3-1-4 : Courbes rationnelles de traction .....	50
II-3-2 : ESSAIS DE FISSURATION ET MESURES .....	51
II-3-2-1 : Expérimentation.....	51
II-3-2-1-1 : Eprouvettes utilisées.....	51
II-3-2-1-2 : Conditions des essais et instrumentation .....	52
II-3-2-2 Mesure de la fissure .....	54
II-3-2-3 : Méthode de calcul de la vitesse de fissuration .....	55
II-3-3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	56
II-3-3-1 : Vitesses de propagation .....	56
II-3-3-2 : Evolution des paramètres énergétiques .....	60
II-3-3-2-1 : Evolution de l'énergie Q en fonction de $\Delta K$ .....	60
II-3-3-2-2: Evolution de l'énergie spécifique U en fonction de $\Delta K$ .....	60
II-4 : CONCLUSION .....	62
CHAPITRE III	
III-1- INTRODUCTION .....	63
III-2- PREAMBULE.....	63
III-3- ETUDE EXPERIMENTALE .....	64
III-3-1- Matériau utilisé .....	64
III-3-2-Produits d'apports utilisés .....	64
III-3-3-La protection gazeuse .....	65
III-3-4-Désignation des éprouvettes .....	65
III-4- RESULTATS ET DISCUSSION .....	65
III-4-1- Essai de traction .....	65
III-4-3- Essai de dureté (Hv) .....	73

---

## SOMMAIRE

---

III-4-4- Essai de résilience .....	74
III-4-5- Essai de ténacité .....	76
III-4 : CONCLUSION .....	78
Conclusion générale .....	79
Les Références Bibliographiques .....	82

---

---

## NOTATIONS

### Majuscules latines

A : aire sous la courbe charge-déplacement

B : épaisseur d'une plaque

$B_0$  : épaisseur maximale pour avoir un état plan de contrainte

COD : ouverture de la fissure

$COD_{max}$  : ouverture de la fissure au centre de la fissure (dans une plaque)

CT : éprouvette compacte de traction

CTOD : ouverture en fond de fissure

$CTOD_c$  : valeur critique de l'ouverture en fond de fissure

$CTOD_d$  : valeur critique de l'ouverture en fond de fissure en mode dynamique

$D_1, D_2$  : constantes du matériau dans des lois de propagation des fissures

E : module d'élasticité

G : module de glissement

G : énergie libérée par la relaxation des contraintes

$G_m$  : valeur moyenne du poids propre

J : intégrale curviligne de Rice

$J_{Ic}$  : valeur critique de l'intégrale J

$J_{Id}$  : valeur critique de l'intégrale J en mode dynamique

K : facteur d'intensité de contrainte

$K_I$  : facteur d'intensité de contrainte en mode I

$K_{Ic}$  : valeur critique du facteur d'intensité de contrainte en état plan de déformation (en mode I)

$K_{Ic,essai}$  : valeur critique du facteur d'intensité de contrainte ressortant d'essais

$K_{Ic}$  : valeur critique du facteur d'intensité de contrainte en état plan de contrainte

$K_c$  : valeur critique du facteur d'intensité de contrainte

$K_{mat}$  : valeur critique du facteur d'intensité de contrainte par exemple  $K_c$  ou  $K_{Ic}$ ,

$K_{max}$  : valeur maximale du facteur d'intensité de contrainte

$K_{res}$  : facteur d'intensité de contraintes dû à l'effet des contraintes résiduelles

$K_V$  : résilience [J]

$K_{Vestimé}$  : valeur estimée de la résilience

N : nombre de cycles à la rupture

## Notations

---

$N_D$  : nombre de cycles à la limite de fatigue

$P_c$  : charge critique lors d'un essai de ténacité  $K_{Ic}$

$R$  : résistance du matériau à la propagation d'une fissure

SENB : éprouvette de flexion en trois points

$T_{27}$  : température donnant une valeur de résilience de 27 J

$T_{connu}$  : température pour une valeur connue de facteur d'intensité de contrainte critique

$T_{KV}$  : température à laquelle est effectuée un essai de résilience

$Q$  : énergie hystérétique  $Q$  dissipée pendant un cycle

$U$  : densité d'énergie de déformation (énergie spécifique)

$W$  : hauteur d'une éprouvette de rupture (CT ou SENB)

$W$  : largeur d'une plaque

$Y$  : facteur de correction pour le calcul du facteur d'intensité de contrainte  $K$

$Y_e$  : facteur de correction dépendant de la forme de la fissure elliptique

$Y_f$  : facteur de correction dépendant de la dimension finie d'une plaque

$R_e$  : limite d'élasticité

$R_m$  : résistance à la traction

### Minuscules latines

$a$  : dimension déterminante d'une fissure

$a_0$  : dimension initiale d'une fissure

$a_c$  : dimension critique d'une fissure

$a_{init}$  : profondeur initiale d'une fissure

$ds$  : élément d'arc du chemin d'intégration  $G$

$f_c$  : facteur de concentration de contrainte

$f_f$  : facteur de forme

$l_0$  : longueur initiale d'une éprouvette

$l_f$  : longueur finale d'une éprouvette

$m$  : pente de la droite de la moyenne des résultats d'essais pour les courbes  $S - N$

$p_f$  : probabilité de rupture

$r_{pl}$  : dimension de la zone plastifiée

$u$  : déplacements dans la direction  $x$

## Notations

---

v : déplacements dans la direction y

w : déplacements dans la direction z

### Divers

2D : bidimensionnel

3D : tridimensionnel

da/dN : vitesse de propagation d'une fissure de fatigue

f(a/W) : fonction de a/W, utilisée dans l'estimation de  $K_{Ic}$  sur la base de la charge appliquée lors d'un essai sur une éprouvette CT ou SENB

r(W - a) : distance entre le fond de la fissure et le centre de rotation

R : Rayon des cavités dans un matériau ductile

R<sub>0</sub> : Rayon initial d'une cavité

R/R<sub>0</sub> : Taux de croissance de fissure

### ABRÉVIATIONS

ASTM : American Society for Testing and Materials

CEGB : Central Electricity Generating Board

COD : ouverture de la fissure (Crack Opening Displacement)

CTOD : ouverture en fond de fissure (Crack Tip Opening Displacement)

CT : éprouvette compacte de traction (Compact Tension)

EF : éléments finis

MB : matériau de base

MF : matériau de fusion (soudure)

ZAT : Zone affectée thermiquement

SENB : éprouvette de flexion en trois points (Single Edge-Notched Bend)

SI : système international d'unités

### TERMINOLOGIE

---

## Notations

---

- **essai de résilience** : essai de rupture sur une petite éprouvette entaillée ; la valeur mesurée est l'énergie de rupture [J] à une certaine température d'essai. L'énergie de rupture est parfois également appelée résilience
- **fatigue** : phénomène d'"usure" des matériaux soumis à des charges répétées, se traduisant par l'apparition et la propagation de fissures
- **palier ductile** : valeur supérieure de la ténacité ou de la résilience dans la courbe de transition, correspondant aux températures élevées (en anglais : "upper-shelf")
- **rupture de fatigue** : rupture due à la propagation d'une fissure de fatigue. Cette rupture peut être soit de type fragile, soit de type ductile, soit "mixte"
- **rupture ductile** : rupture précédée d'une déformation plastique ; la surface d'une rupture de type ductile est généralement inclinée (en état plan de contrainte) et se caractérise par un faciès à nerfs ; elle correspond à une cristallinité nulle
- **rupture fragile** : rupture sans déformation plastique initiale ; la surface d'une rupture de type fragile est plate (au niveau macroscopique) et se caractérise par un faciès à grains, d'aspect brillant ; elle a lieu à travers les grains du matériau, il s'agit d'une rupture cristalline
- **rupture mixte** : rupture entre la rupture de type ductile et la rupture de type fragile ; ce type de rupture se produit avec une déformation plastique limitée, la surface de rupture n'est plus plate : une partie de cette surface est de type fragile, à grains, plate, entourée d'une zone de rupture ductile, à nerfs
- **ténacité** : résistance d'un matériau vis-à-vis de la rupture fragile ; la ténacité peut être définie par exemple comme étant la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte  $K_{Ic}$  ou la valeur critique de l'intégrale J :  $J_{Ic}$ .

---

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I-1 : Schéma de principe du procédé de soudage Oxyacétylénique

Figure I-2 : Présentation des différentes zones d'une flamme oxyacétylénique.

Figure I-3 : Electrode enrobée.

Figure I-4 : procédé de soudage TIG.

Figure I-5 : principe du procédé de soudage MIG/MAG.

Figure I-6 : soudage sous flux en poudre.

Figure I-7 : soudage à arc plasma.

Figure I-8 : une torche de soudage à arc plasma

Figure I-9 : Schéma de principe du procédé de soudage par faisceau laser.

Figure I-10 : soudage par résistance par points

Figure I-11 : soudage à la molette

Figure I-13 : Différent types de soudages par résistance à la molette.

Figure I-14 : Morphologie d'un cordon de soudure

Figure I-15 : Représentation macrographique d'une fissuration du bain de fusion.

Figure I-15 : Défauts opératoires types : 1) caniveaux, 2) manque de pénétration, 3) inclusions gazeuses sphériques, 4) inclusions gazeuses vermiculaires, 5) inclusions de laitier

Figure I-16-a: contrôle par ressuage

Figure I-16-b: contrôle par ressuage

Figure I-17 : Principe du contrôle radiographique.

Figure I-18 : Contrôle par ultrasons.

Figure I-19: oscilloscope

Figure I-19-a : Le contrôle par magnétoscopie

Figure I-20 : Coupe transversale d'une éprouvette soudée

Figure I-21 : structure d'une éprouvette soudées.

Figure I-22 : Eprouvette de traction cylindrique

FIGURE I-23 : EPROUVETTE DE TRACTION PRISMATIQUE.

FIGURE I-24 : SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ESSAI BRINELL.

Figure I-26 : Schéma du principe de l'essai Rockwell C.

FIGURE I-26 : SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ESSAI ROCKWELL B.

FIGURE I-27 : SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ESSAI VICKERS.

FIGURE I-28 : REPRESENTATION D'UNE EMPREINTE DANS LES SOUDURES BOUT A BOUT.

---

---

FIGURE I-29 : REPRESENTATION D'UNE EMPREINTE DANS LES SOUDURES D'ANGLES.

FIGURE I-30 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN ESSAI DE RESILIENCE.

Figure I-31 : Schéma de l'énergie absorbée en fonction de la température.

## Chapitre II

Figure II-1-a : Filiations de dureté effectuées sur le joint soudé en surface et transversale perpendiculaire au cordon de soudure

Figure II-1-b : Filiations de dureté effectuées sur le joint soudé en surface et transversale perpendiculaire au cordon de soudure

Figure II-2 : Schéma du sens de prélèvement des éprouvettes (longitudinales)

Figure II-3 : éprouvettes normalisé utilisées pour les essais de traction

Figure II-4 : Différentes éprouvettes utilisées pour les essais de traction

Figure II-5 : Schéma du sens de prélèvement des éprouvettes (transversales)

Figure II-6: Machine universelle d'essai électro-hydraulique asservie IBERTEST

Figure II-7: Courbe conventionnelles de traction des différentes éprouvettes.

Figure III-8: Courbe rationnelle de traction des différentes éprouvettes.

Figure II-9 : CT50 pour les essais de fissuration.

Figure II-10 : Schéma et dimensions des l'éprouvettes CT50 utilisé pour les essais de fissuration.

Figure II-11: machine électro-hydraulique

Figure II-12 : Morphologie des différentes zones d'un cordon de soudure

Figure II-13 : Représentation Schématique des Entailles.

Figure II- 14: Système (Loupe binoculaire – Lampe stroboscope) utilisé pour le suivie de fissure.

Figure II-B-6 : Extension de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les trois zones étudiées

Figure II-B-7 : Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de  $\Delta K$  pour les trois zones étudiées

Figure II-B-8 : Position de la fissure par rapport à l'axe de propagation de la fissure

Figure II-B-9 : Evolution de l'énergie hystérétique en fonction de  $\Delta K$

Figure II-B-10 : Evolution de l'énergie spécifique en fonction de  $\Delta K$

## Chapitre III

Figure III-1 : Schéma synoptique des éprouvettes utilisées

Figure Iii-2-A : Resultats Eprouvette Pg1ma3

Figure Iii-2-B : Resultats Eprouvette Pg1ma2

Figure Iii-2-C : Resultats Eprouvette Pg1ma1

Figure Iii-2-D : Resultats Eprouvette Pg2ma3

Figure Iii-2-E : Resultats Eprouvette Pg2ma2

Figure Iii-2-F : Résultats Eprouvette Pg2ma1

Figure Iii-2: Courbe Conventionnelle De Traction Des Différentes Eprouvettes.

Figure Iii-3-A : Résultats Eprouvette Pg1ma3

Figure Iii-3-B : Résultats Eprouvette Pg1ma2

Figure Iii-3-C : Résultats Eprouvette Pg1ma1

Figure Iii-3-D : Résultats Eprouvette Pg2ma3

Figure Iii-3-E : Résultats Eprouvette Pg2ma2

Figure Iii-3-F : Résultats Eprouvette Pg2ma1

Figure III-3: Courbe rationnelle de traction des différentes éprouvettes

Figure III-4: Evolution de la dureté dans les trois zones de la soudure.

Figure III-C-5: Eprouvettes Charpy utilisées.

Figure III-6: Position de prélèvement des éprouvettes Charpy.

Figure III-7: Représentation de la résilience en fonction de la température.

Figure III-C-9 : Les tailles des différentes éprouvettes

Figure III-C-10: Evolution de la ténacité en fonction de la température.

## INTRODUCTION GENERALE

Les citernes à gaz (GPL), ainsi que Les tuyauteries vapeur du circuit secondaire des réacteurs à eau pressurisée sont constituées de tubes en acier au carbone manganèse (nuance A48-AP) assemblés par soudage. Les procédés de soudage utilisés sont, le soudage manuel à l'électrode enrobée (EE) et le soudage automatique à l'arc (FF). Le processus de rupture résulte d'un mécanisme de déchirure ductile et non de rupture fragile.

Les joints soudés sont toujours des zones privilégiées pour l'apparition des défauts et l'exigence en termes de sécurité, pour ce type d'installations, rend donc indispensable l'étude de la rupture dans ces composants. Les concepts de la mécanique de la rupture et plus particulièrement les approches globales telle que l'intégrale J de Rice, sont utilisées pour analysé la nocivité des défauts dans les assemblages soudés.

Le but de ce travail est d'étudier les différents paramètres (liés aux caractéristiques mécaniques des matériaux, à la géométrie du joint soudé et à la géométrie de l'éprouvette) qui interviennent en même temps, pour expliquer les phénomènes de la déchirure ductile et apporter une contribution à l'étude de cette déchirure ductile dans un joint soudé afin de développer une méthode d'analyse adaptée à ce type de jonction. Pour une meilleure compréhension des processus conduisant à la déchirure ductile des structures soudées, nous avons vérifié deux approches de la mécanique de la rupture : une approche globale (J, CTOD) et une approche locale ( $R/R_0$ ). Trois aspects ont été abordés : une étude bibliographique, une étude expérimentale et une simulation numérique.

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### *A- Introduction à la mécanique de la rupture :*

Cette étude bibliographique présente, un état de l'art de la mécanique de la rupture pour la déchirure ductile, où nous mettrons en évidence les possibilités et problèmes liés aux différentes approches possibles, ainsi que leur intérêt pour notre étude et ses objectifs.

Le concept de l'intégrale  $J$  permet l'extension de la mécanique de la rupture au comportement des matériaux élasto-plastiques, dans le cas de chargements proportionnels. Cette intégrale présente de nombreuses caractéristiques importantes, en particulier, elle quantifie l'intensité des champs de contraintes et de déformations en pointe de fissure. Ces propriétés justifient l'intérêt des normes dans les propositions de critère d'amorçage et de propagation en déchirure ductile.

### ***B- Comportement en fatigue des joints soudés :***

Cette partie, nous présentons la complexité de l'étude de la ténacité d'un joint soudé au vu de la multiplicité des paramètres qui interviennent en même temps. Aussi nous permet en particulier de justifier le choix de l'approche pour modéliser la déchirure ductile, et de montrer que le taux de mis-matching «  $M$  » ne permet pas à lui seul d'expliquer les phénomènes de la déchirure ductile. Plusieurs paramètres sont à prendre en considération : paramètres liés aux caractéristiques mécaniques des matériaux, paramètres liés à la géométrie du joint soudé, paramètres liés à la géométrie de l'éprouvette ainsi que la longueur et la position des défauts.

### ***C- Approche locale de la déchirure ductile :***

Cette partie concerne l'approche locale de la déchirure ductile, qui est basée sur la connaissance des mécanismes microscopiques intervenant lors de ce type de rupture et plus particulièrement l'exposé des paramètres utilisés dans les deux approches :  $J$ ,  $R/R_0$ . Nous présentons un bref rappel des mécanismes physiques conduisant à la déchirure ductile. Ensuite, nous exposons les principaux types de modèles conduisant à la modélisation de l'avancée de la fissure.

## **CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE**

Ce chapitre se compose en trois parties :

### ***1<sup>er</sup> Partie : Déchirure ductile :***

Ce travail va permettre de déterminer expérimentalement les caractéristiques mécaniques, ainsi que les résistances à la déchirure ductile à la température ambiante, du métal de base (MB), métal fondu (MF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT) prélevés à partir d'un joint soudé réalisé dans des conditions représentatives des fabrications industrielles.

### *2<sup>ème</sup> Partie : Fatigue de la structure soudée :*

Présente les différents paramètres (du métal de base et du métal d'apport employé) aux quels dépend la résistance à la fatigue des joints soudés.

### *3<sup>ème</sup> Partie : Etude de l'acier Inoxydable Austénitique 316L :*

Cette partie porte sur l'étude du comportement mécanique global d'un joint de soudure en acier inoxydable austénitique 316L, réalisé par le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gaz). Généralement, les caractéristiques mécaniques de ce type de joint soudé dépend essentiellement de deux paramètres à savoir : La qualité du métal fondu et la qualité du gaz de protection. Trois qualités de métal fondu : 18/17E/UP, GE SG et 20/10/SG et deux types de gaz de protection : Gaz Argon pur et Gaz Hélium seront utilisés. Sur chacune des six configuration, des essais mécaniques de caractérisation vont être réalisés : essai de traction, résilience, rupture et de pliage.

## **CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE**

La modélisation numérique a mis en évidence la complexité de la caractérisation de la déchirure ductile dans le cas des joints soudés. Néanmoins, ce travail nous permet de vérifier:

- L'influence des caractéristiques mécaniques du métal de base, dans le cas d'un taux d'overmatching important, sur le comportement global de ce type de structures (les évolutions de la charge, de l'intégrale J, du CTOD, des zones plastiques, ...).
- La sensibilité du taux de croissance des cavités  $R/R_0$  à tout changement dans les champs des contraintes et des déformations au fond de la fissure. L'approche locale semble être une alternative valable pour l'étude de la déchirure ductile dans le cas des joints soudés. Cette approche nécessite une modélisation prenant en considération l'hétérogénéité de la structure : configuration bimétal et trimétal, ce qui conduit à la prédiction de la direction de propagation de la fissure.

# **Chapitre I**

# **Généralité et type des soudages**

## **I-1- INTRODUCTION :**

Le soudage est un assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui établit la continuité entre les pièces métallique soudées qui s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructives (une carrosserie), de poids (un panneau), économiques (un plancher) ou autres.

La soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles, avec ou sans adjonction d'un métal d'apport.

La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport. Beaucoup de métaux sont soudables moyennant des études préalables et la mise au point de modes opératoires spécifiques ; citons les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas du brasage où il n'y a jamais fusion des métaux à assembler.

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction mécanique grâce au développement et à la maîtrise de moyens de mise en œuvre et le remplacement de nombreux assemblages qu'il a prix boulonnés ou rivetés dans le génie civil ou la construction navale des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage. Il est devenu également un procédé de base dans l'industrie

## **I-2-Type de soudure :**

On distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, les métaux de base et le métal d'apport utilisé sont tous de même nature, chimique
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature, et
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous de natures différentes.

Il existe plusieurs méthodes de soudage par fusion ou par pression, adaptées à chaque cas de figure. Parmi les procédés de soudage les plus employés, on peut mentionner le soudage à l'arc, le soudage aux gaz, le soudage par résistance, le soudage aluminothermique, le soudage laser et le soudage par faisceau d'électrons.[1]

Lorsqu'on assemble deux pièces de métal, on doit tenir compte de leurs propriétés physiques, de l'usage auquel elles sont destinées et des installations de production disponibles.

## **I-3- DIFFERENTS TYPES DE SOUDAGE :**

### **I-3-1- Soudage par fusion**

Les principaux procédés de soudage par fusion sont le soudage oxyacétylénique, ceux qui utilisent l'arc électrique, un faisceau d'électrons ou un faisceau laser, et le soudage aluminothermique. Tous, excepté le dernier, opèrent de proche en proche, par déplacement d'une source de chaleur quasi ponctuelle qui détermine dans les éléments à assembler un front d'échauffement extrêmement brutal, à l'arrière duquel se forme le bain de fusion. Pour augmenter la pénétration en profondeur de la fusion, on est amené à écarter ou à chanfreiner les bords à assembler. Il faut alors recourir à un apport extérieur de métal sous forme de fils ou d'électrodes fusibles. La composition chimique du métal d'apport peut éventuellement être différente de celle du matériau de base.[1][2]

#### **I-3-1-1 Soudage oxyacétylénique :**

Le soudage oxyacétylénique est un procédé à la flamme (figure I-1). Le soudage est réalisé par fusion de métal au moyen d'une flamme obtenue à la sortie d'un chalumeau. Cette dernière est obtenue à la combustion d'un gaz combustible d'acétylène  $C_2H_2$  avec un gaz comburant d'oxygène  $O_2$  (volume 2.5). La température de la flamme peut atteindre les 3 200 ° Celsius lorsque le mélange  $C_2H_2$  et  $O_2$  sont correctement équilibrés dans le chalumeau. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de  $\varnothing$  0,8 mm à  $\varnothing$  4,0 mm) est amené manuellement dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure. [3]

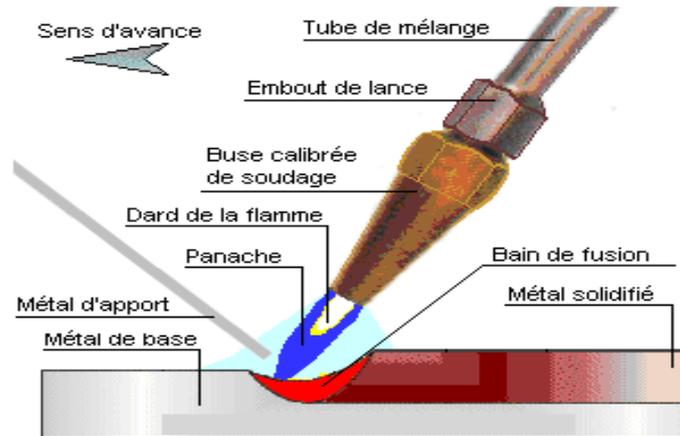


Figure I-1 : Schéma de principe du procédé de soudage Oxyacétylénique.

### I-3-1-2 Différents types de chalumeaux pour le soudage oxyacétylénique :

- Haute pression : les deux gaz sont à des pressions supérieures à 0,15 bar.
- Basse pression : l'acétylène est à une pression comprise entre 0,010 à 0,1 bar et l'oxygène est à une pression comprise entre 1 et 3 bars.[4-5]

### I-3-1-3 Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique :

- Flamme neutre ou normale : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage. Le dard est de couleur blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse.
- Flamme oxydante : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sifflement. Le panache est plus lumineux.
- Flamme carburante : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières. .[6]

### I-3-1-4 La description de la flamme oxyacétylénique neutre :

La flamme oxyacétylénique est constituée des zones suivantes (figure I-2) :

Dard, zone de combustion primaire, zone réductrice, zone de combustion secondaire et la zone oxydante.

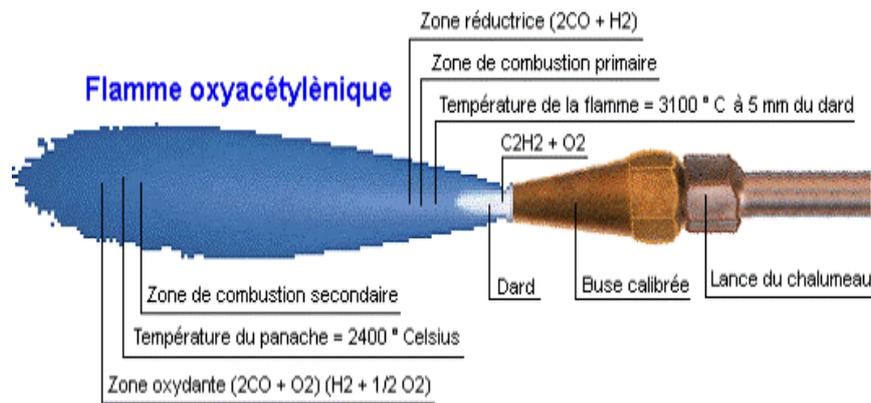


Figure I-2 : Présentation des différentes zones d'une flamme oxyacétylénique.

**I-3-1-5 Protection des soudeurs :** le soudeur doit se protéger les yeux contre les radiations de la chaleur (rayons infrarouges) et contre les projections de particules d'oxyde en fusion par des lunettes spéciales[7].

### 1-3-2 : Soudage à l'arc électrique

Bernardos (1887) puis Kjellberg (1914) ont été les tout premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue.

Les techniques de soudage à l'arc, qui sont les plus courantes dans l'industrie, notamment pour l'assemblage de pièces en acier, requièrent une alimentation en courant électrique alternatif ou continu. Ce courant est utilisé pour créer un arc électrique qui génère suffisamment de chaleur pour faire fondre le métal et réaliser la soudure.

Si l'on porte deux électrodes à un potentiel différent et qu'on fait le contact, un courant passe, mais vu le mauvais contact, la résistance est grande d'où une élévation de température par effet joule : c'est l'amorçage.[8]

Si on les écarte le courant passe toujours et il apparaît une lumière éblouissante : l'arc électrique. Les électrodes émettent des électrons, s'ils sont animés d'une énergie suffisante, ils excitent l'atome de gaz rencontré (un ou plusieurs électrons de cet atome se rapprochent du centre de ce dernier), ces électrons reviennent ensuite à leur niveau d'énergie en émettant des photons (lumière). Pour une énergie encore plus intense, l'électron arrache un électron de

l'atome et à la place de l'atome neutre, on a un ion positif et un électron négatif : l'arc ionise le gaz qu'il traverse. La haute température de l'arc permet la fusion du métal : il y a soudure.

Le soudage à l'arc présente un certain nombre d'avantages par rapport aux autres méthodes de soudage. Il est très rapide, en raison de la forte chaleur dégagée par l'arc électrique. En outre, certains procédés de soudage à l'arc n'utilisent pas de fondant. Comme procédés de soudage à l'arc fréquemment employés, on peut citer le soudage avec électrode enrobée, le soudage TIG (Tungstène Inert Gas), le soudage MIG (Metal Inert Gas) et le soudage sous flux en poudre.

### 1-3-2 -1 : Le soudage à l'électrode enrobée :

Appelé soudage manuel à l'arc (manuel arc welding, shielded metal arc welding process)

L'électrode enrobée est placée sur la pince porte-électrode reliée sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. Elle se compose d'une âme métallique et d'un enrobage (figure I-3).

\*L'âme prend le rôle principal est de conduire le courant électrique et d'apporter le métal déposé de la soudure

\*L'enrobage a un **rôle métallurgique**, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires. Sa composition chimique et physique est très complexe.[6-8]



**Figure I-3 :** Electrode enrobée.

- Enrobage acide ou A (à base d'oxyde de fer et de ferro-alliages)
- Enrobage basique ou B (à base de carbonate de calcium et de fluor de calcium)
- Enrobage cellulosique ou C (à base de cellulose)

#### a) Soudage TIG :

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG ( Tungsten Inert Gas). Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou Gas Tungsten Arc Welding . On le désigne souvent en France par soudage à l'argon.[7]

Ce procédé, placé dans l'atmosphère d'un gaz inerte, tel l'argon, l'hélium ou l'hydrogène (figure I-4). Ce gaz protège ainsi le métal de l'oxydation. La chaleur de l'arc formé entre l'électrode et le métal fait fondre les bords du métal.

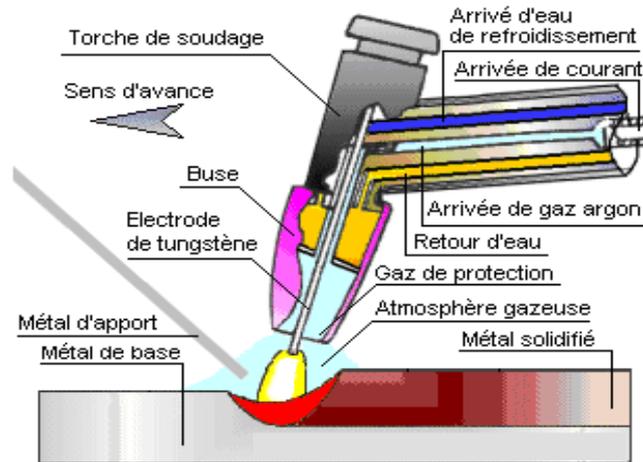


Figure I-4 : procédé de soudage TIG.

#### b) Soudage MIG/MAG:

Depuis de nombreuses années, ce soudage constitue le gros des processus de soudage par fusion. Il existe différentes dénominations usuelles pour le soudage MIG/MAG (figure I-5). Les abréviations MIG et MAG correspondent à Metal Inert Gas et Metal Active Gas. MIG n'est donc une appellation correcte que si l'on soude avec un gaz inerte (Ar ou He) en guise de gaz de protection. La dénomination de soudage MAG doit être utilisée lorsqu'on ajoute un composant actif au gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ...). Les autres appellations sont le soudage semi-automatique, la dénomination américaine est GMAW, ce qui correspond à Gas Metal Arc Welding. Le principe de base de ce processus de soudage, la fusion d'un fil acheminé en continu dans un arc électrique, est inchangé depuis des dizaines d'années.[8]

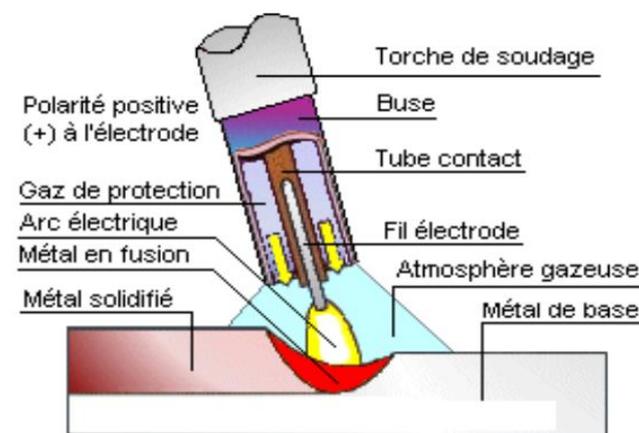


Figure I-5 : principe du procédé de soudage MIG/MAG.

**1-3-2 -2 : Avantages du procédé :**

- Forte productivité par rapport à l'ARC E.E. et le TIG
- Grande vitesse de soudage
- Taux de dépôt de métal important
- Limitation des déformations
- Nombre de reprises de soudure limité
- Pas de laitier à décrasser
- Large gamme d'épaisseur
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- Soudage dans toutes les positions
- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit
- Aspect de cordon correct
- Procédé automatisable et utilisable en robotique

**1-3-2 -3 Métal d'apport :**

Il se présente sous forme d'un fil électrode plein ou fourré dont le diamètre varie entre 0,5 et 3,2 mm.

Le fil fourré est une électrode continue de section tubulaire, dont l'intérieur est rempli de composants analogues à ceux d'un enrobage (Tableau I-3).

type	section	symbole
Fil nu		
Tube		
Feuillard noué en bout		
Feuillard plié		

Feuillard replié		
Feuillard surloué		
Feuillard à recouvrement		

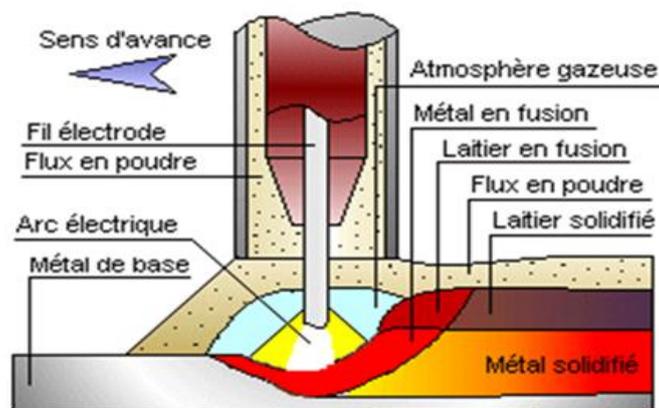
**Tableau I-3 :** Différents types de fils fourrés.

### 1-3-3 : Soudage sous flux en poudre :

Ce procédé est aussi appelé **soudage à l'arc submergé** (submerged arc welding process ou SAW).

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues multihoraires.[9]

-L'arc de soudage et le bain de fusion sont **non visibles** pendant le soudage. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler, le fil électrode et une partie du flux en poudre pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier solidifié protecteur.( **Figure I-6** )



**Figure I-6 :** soudage sous flux en poudre.

**1-3-3-1: Avantages du procédé :**

- Grande vitesse de soudage
- Pénétration très importante
- Pas de préparation de chanfrein dans certains cas
- Très bel aspect du cordon lorsque les paramètres sont correctement réglés
- Limitation des déformations
- Arc non visible - Confort de l'opérateur (pas d'émission de rayons U.V.)
- Aucune émission de fumées
- Large gamme d'épaisseur et d'application
- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques
- Bonne répétitivité des paramètres de soudage

**1-3-3-2: Types de flux en poudre utilisés :**

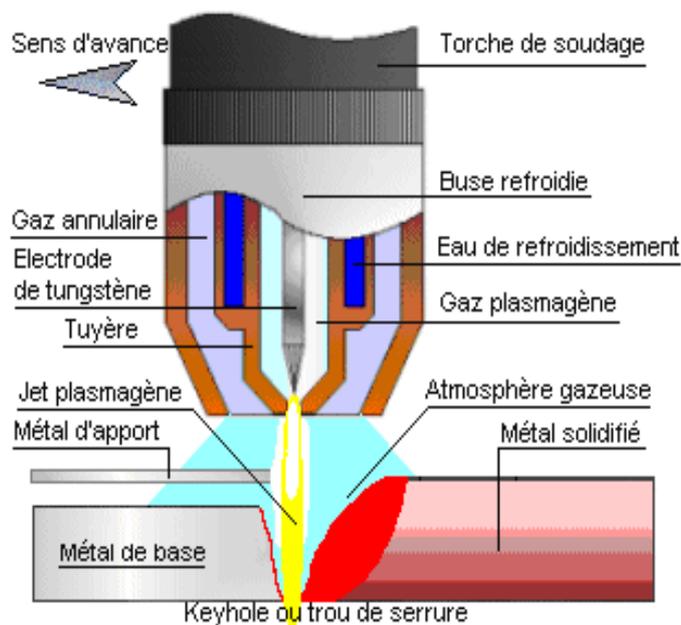
- Flux fondu : Les ingrédients sont mélangés et traités dans un four électrique à l'arc. Le produit obtenu est parfaitement homogène.
- Flux aggloméré : Les ingrédients constitués de poudres métalliques et de produits minéraux sont agglomérés avec un liant (silicate de sodium) dans un four à basse température.

**1-3-4 :Soudage au plasma**

Le soudage PLASMA (P.A.W.) est un procédé à l'arc comparable au soudage TIG sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible (tungstène). Le soudage est réalisé à l'aide d'une torche spéciale à plasma :

- soit à partir d'un arc électrique créé entre l'électrode infusible de tungstène (de Ø 1,0 mm à Ø 8,0 mm) et l'intérieur de la tuyère (arc non transféré ou soufflé)
- soit à partir d'un arc électrique créé entre l'électrode infusible de tungstène (de Ø 1,0 mm à Ø 8,0 mm) et la pièce à souder (arc transféré). Un arc pilote est utilisé pour l'amorçage d'un arc transféré.

-La torche de soudage plasma est reliée pour la partie électrode infusible sur la borne électrique de sortie négative et pour la partie tuyère sur la borne positive du générateur de soudage à courant continu (caractéristiques externes statiques verticales). La prise de masse est reliée au générateur sur la borne positive et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage plasmagène est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. Une alimentation en gaz de soudage annulaire est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. Un dispositif d'amorçage à haute fréquence permet l'amorçage de l'arc pilote à l'intérieur de la tuyère (arc non transféré ou soufflé). Lorsque l'opérateur actionne le bouton de soudage, l'arc pilote est transféré de l'électrode vers la pièce à souder permettant l'amorçage de l'arc de soudage entre l'électrode et la pièce. ( **Figure I-7** )



**Figure I-7** : soudage à arc plasma.

Le soudage à forte énergie (épaisseurs allant jusqu'à 10 mm) est employé essentiellement en automatique alors que le soudage à faible énergie « mini-ou micro-plasma » (épaisseurs comprises entre 0,01 et 0,8 mm) peut être soit manuel, soit automatique (Figure I-8).

- soit à partir d'un arc électrique créé entre l'électrode infusible de tungstène (de  $\varnothing$  1,0 mm à  $\varnothing$  8,0 mm) et l'intérieur de la tuyère (arc non transféré ou soufflé). (Figure I-8-a)
- soit à partir d'un arc électrique créé entre l'électrode infusible de tungstène (de  $\varnothing$  1,0 mm à  $\varnothing$  8,0 mm) et la pièce à souder (arc transféré). Un arc pilote est utilisé pour l'amorçage d'un arc transféré (Figure I-9-b).

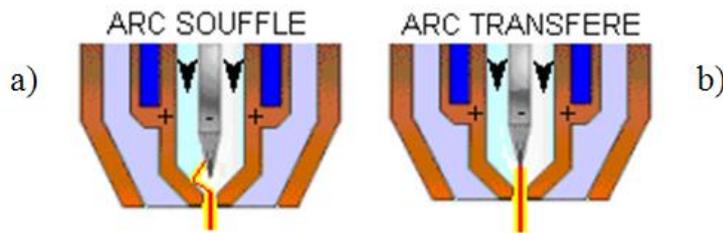
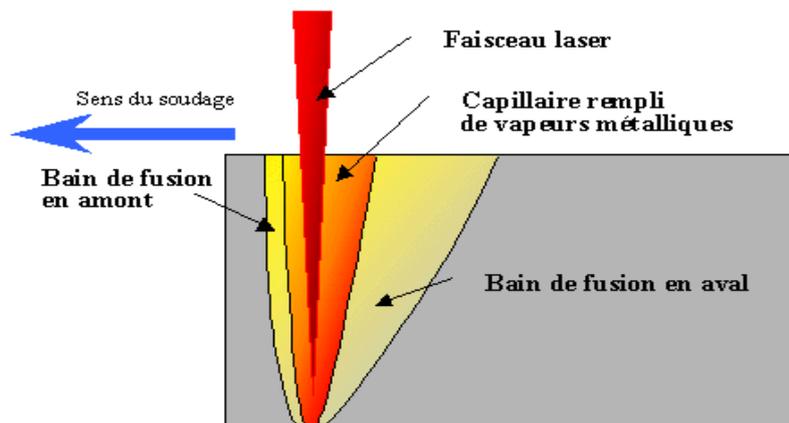


Figure I-8 : une torche de soudage à arc plasma

### 1-3-5 : Soudage par faisceau laser

Avec la puissance et la vitesse ou le temps, le format du faisceau au point de focalisation constitue le troisième paramètre d'une opération de soudage ou de coupage par laser.

Un faisceau laser de soudage est une source de lumière monochromatique cohérente permettant d'obtenir des densités d'énergie suffisantes pour provoquer localement la fusion ou la volatilisation de la plupart des matériaux sur lesquels il est concentré au moyen d'une lentille dite de focalisation. On distingue deux types fondamentaux de laser : les lasers solides (rubis, Nd-Y.A.G.) avec des puissances maximales limitées ( $\approx 1\text{kW}$ ) mais d'encombrement réduit et les lasers à gaz moléculaire (He-Ne, CO<sub>2</sub>) qui fournissent des puissances pouvant dépasser 20 kilowatts (Figure I-9).[8-9-10]



**Figure I-9 :** Schéma de principe du procédé de soudage par faisceau laser.

### 1-3-5 -1 : Procédé du soudage par fusion : il y a d'autre procédé

- \*Soudage vertical sous laitier
- \* Soudage par bombardement électronique
- \*Soudage vertical sous gaz

### 1-3-6 Soudage par résistance

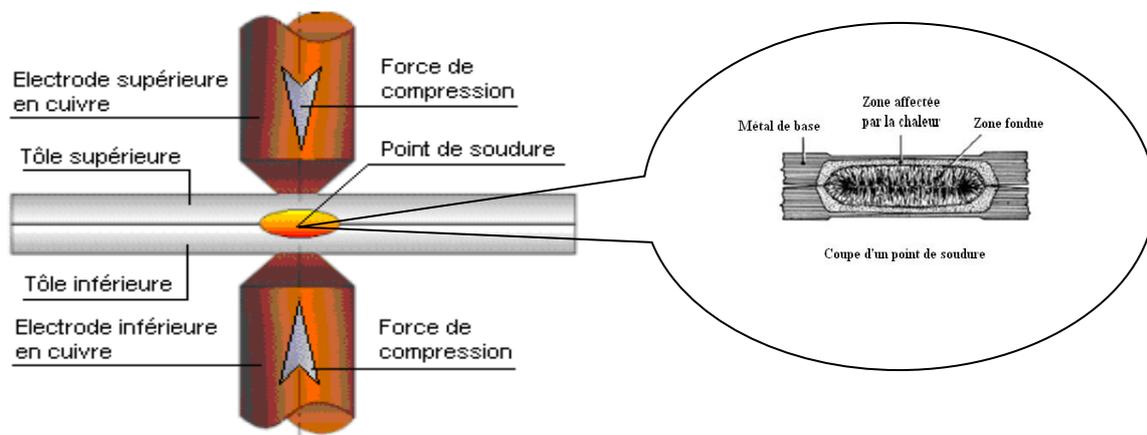
Le soudage est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique et d'une pression ponctuelle. Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur. L'intensité électrique chauffe la matière jusqu'à la fusion. La pression maintient le contact entre l'électrode et l'assemblage.

#### 1-3-6-1 : Soudage par points :

L'invention du soudage par résistance est due à l'Américain Thomson en 1877.

Les pièces à souder sont superposées et sont serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. L'ensemble pièces / électrodes est traversé par un courant de soudage qui provoque une élévation de température par effet Joule et la fusion localisée des deux pièces dans la zone de positionnement des deux électrodes.

Ce procédé se trouve des applications de choix en construction automobile, matériel ferroviaire, électroménager, mobilier et emballage métallique (Figure I-10).



**Figure I-10 :** soudage par résistance par points.

**1-3-6-1-1 : Paramètres du procédé de soudage par points :**

- \*Diamètre du point de soudure
- \*Diamètre de la pointe de l'électrode en cuivre
- \*Distance minimale entre le point de soudure et le bord de la pièce
- \* Distance minimale entre deux points de soudure

**1-3-6-1-2 :Les avantages du procédé :**

- Rapidité d'exécution
- Limitation des déformations
- Absence de préparation des bords à souder
- Possibilité d'automatisation

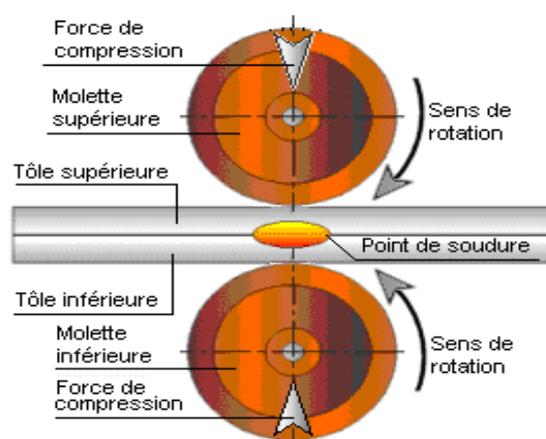
**1-3-6-1-3 Les inconvénients du procédé :**

- Assemblage par recouvrement uniquement
- Epaisseur soudée limitée à la puissance de la machine

**1-3-6-2 : Soudage a la molette :**

Le soudage à la molette est une variante du soudage par points qui permet d'exécuter des soudures continues. Les électrodes sont remplacées par des molettes (disques en cuivre) animées d'un mouvement rotationnel qui exercent un effort et entraînent les pièces à assembler. Un fil d'alliage cuivreux a été interposer entre les molettes et les pièces à assembler.[11]

Cette solution est tout particulièrement utilisée pour la fabrication de boîtes de conserves et de réservoirs en tôles aluminées(Figure I-11).



**Figure I-11 :** soudage à la molette.

### 1-3-6-2-1 : Les différents types de soudures à la molette :

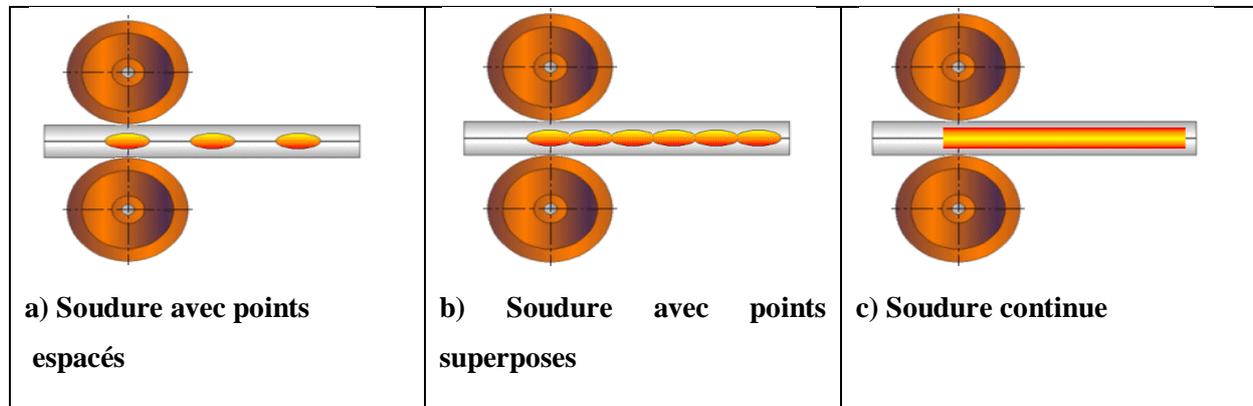


Figure I-13 : Différent types de soudages par résistance à la molette.

### 1-3-6-2-2 : Les avantages du procédé :

- Rapidité d'exécution
- Limitation des déformations
- Absence de préparation des bords à souder
- Possibilité de réaliser des soudures continues et étanches
- Possibilité d'automatisation

## I-4- ZONES DE SOUDURE :

La soudure se décompose en plusieurs zones.

**I-4-1 : La zone fondue:** (nommée MF) c'est la zone qui est passée à l'état liquide au cours de l'opération de soudage.

La structure métallurgique de cette zone après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.[12]

**I-4-2 : La zone affectée thermiquement :** (appelée ZAT) cette zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion.[13]

La Zone Affectée Thermiquement (ZAT) est le siège de modifications métallurgiques du métal de base qui peuvent induire des fragilités, des baisses de résistance mécanique, des manques de ductilité ... Ces modifications dépendent du matériau soudé, du procédé utilisé, du mode opératoire suivi . .[14-15].

**I-4-3 : La zone de liaison :** cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé

**I-4-4 : Le métal de base :** Ces les zones non affectée à cause l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. .[16-17-18]

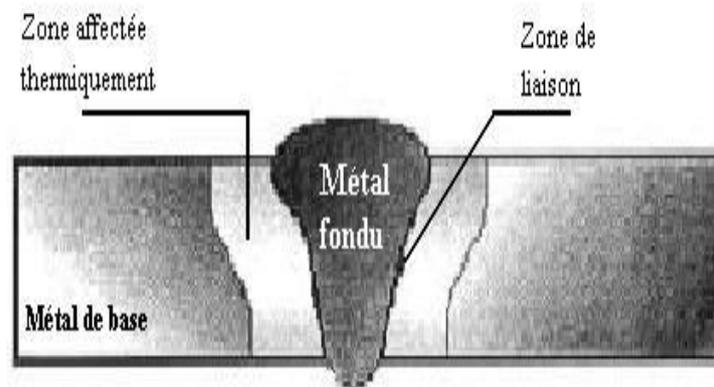


Figure I-14 : Morphologie d'un cordon de soudure.

#### I-5 : TENUE MECANIQUE D'UN JOINT SOUDE :

Les modifications métallurgiques influent sur la tenue mécanique du joint soudé. Aussi faut-il s'assurer d'obtenir une tenue mécanique suffisante, et tenir compte des soudures dans le calcul et le dimensionnement des pièces.

L'opération de soudage engendre de plus la création de contraintes résiduelles dues au retrait créé par l'opération de soudage sur les pièces. La tenue à la fatigue des assemblages soudés est une problématique fondamentale dans la conception des appareils soudés. Les défauts géométriques des cordons de soudures jouent un grand rôle dans la tenue à la fatigue des assemblages soudés.[16]

**I-6 : PRINCIPAUX DEFANTS DE SOUDURE ET CLASSIFICATION :****I-6 -1 : Fissures**

Les fissures sont dues à un mauvais choix des conditions de soudage et à un retrait excessif du matériau sous bridage (Figure I-14),

On distingue deux types de fissurations :

**I-6 -1-1 :Fissuration à froid :**

La fissuration à froid concerne essentiellement les aciers transformables à l'échauffement a cause :

- \* Des contraintes mécaniques résiduelles importantes.
- \*Une présence d'hydrogène diffuse dans la zone fondue.
- \* Formation de structures fragiles dépendant de la composition chimique et de la vitesse de refroidissement de la soudure.[18]

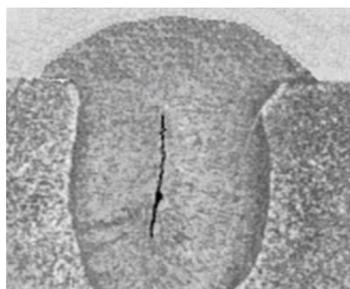
**I-6 -1-2 :Fissuration à chaud :**

La fissuration à chaud (ou plus exactement liquation) créée par la ségrégation dans le joint d'un eutectique à bas point de fusion .

Cette fissuration est rare pour les aciers, lorsqu'elle se produit, c'est généralement sous l'effet de contraintes importantes dans la zone (Z.A.T) et au moment où le métal est encore très chaud (>900°C)

➤ les principaux paramètres de l influence :

- \*la composition chimique.
- \* le mode opératoire de soudage.
- \* et la capacité d'allongement à chaud du métal.



**Figure I-15 :** Représentation macrographique d'une fissuration du bain de fusion.

**I-6 -2 : Manque de pénétration :**

Où le métal débordant du côté envers du cordon car Le métal de base n'est pas fondu complètement , ce qui diminue la section efficace de la soudure.

**La pénétration est dû :**

- \* Le mauvais choix des conditions de soudage (paramètre I, U, v, Ø du fil ou de l'électrode)
- \* Une mauvaise préparation des bords (angle des chanfreins, écartement). (Figure I-15-2)

**I-6 -3 : Protection du problème :**

Il faut prévoir une mise en œuvre correcte des procédés de soudage adoptés un accostage soigneux des pièces et un gougeage, avant reprise à l'envers.

**I-6 -4 : Manque de fusion**

On trouve le manque de fusion entre le métal de base et le métal déposé. Il constitue une entaille aigüe susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue, à causes de (I et Ø de l'électrode trop faibles, vitesse d'avance élevée).

Et pour éviter les manques de fusion, il faut d'une part, choisir les conditions pratiques de soudage (l'intensité, la vitesse d'avancement) et d'autres part, prévoir une préparation correcte des pièces.

**I-6 -5 : Morsures :**

Où le métal de base est « creusé » sur une partie du cordon, dû à une énergie de soudage trop importante ou à une mauvaise position du fil de l'électrode. (Figure I-15-1)

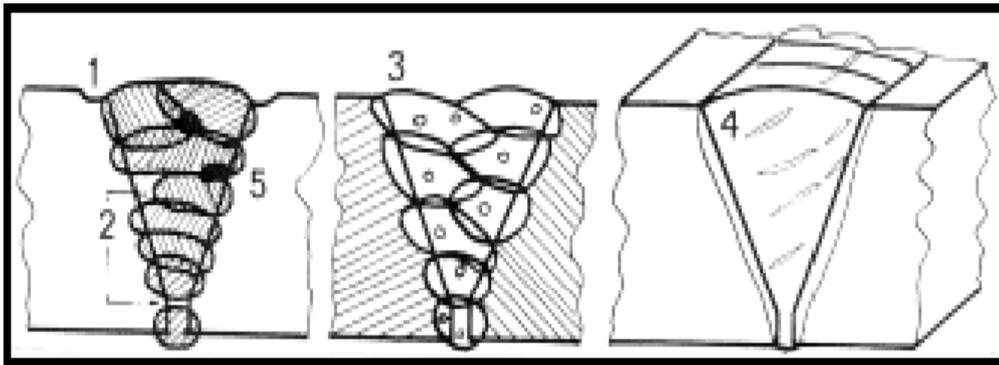
**I-6 -6 : Soufflures :**

Intégrations gazeuses dues aux réactions chimiques dans le bain de fusion ou à l'humidité des pièces. Elles sont de forme sphérique ou vermiculaire. (Figure I-15-3 et 4).

**I-6 -7 :Inclusions de laitier**

Elles désignent un composé étranger à la soudure et peuvent contenir du tungstène (Cas du Soudage TIG) ou du laitier (Soudage à l'électrode enrobée ou baguette ) ou encore des oxydes. Dues à un mauvais nettoyage entre chaque passe ou à une mauvaise technique opératoire (superposition des cordons). (Figure I-15-5)

Et pour éviter les inclusions de laitier il faut effectuer un nettoyage convenable des cordons.



**Figure I-15 :** Défauts opératoires types : **1)** caniveaux, **2)** manque de pénétration, **3)** inclusions Gazeuses sphériques,**4)** inclusions gazeuses vermiculaires, **5)** inclusions de laitier

\*La classification des défauts est réalisée conformément à la norme **NF EN 26250** [2] (voir annexe A-3

**I-7 : PROBLEMATIQUES DU SOUDAGE :**

Les résidus de soudage sont appelés « projections » ou « gratons » (petits picots qui restent collés au metal..)

Le soudage présente trois grandes familles de problématiques :

- Opératoire (Mise au point du mode opératoire de soudage),
- Globale (la soudure tient, ça casse ailleurs), et
- métallurgiques (cas du soudage de l'acier à 9% Ni en homogène).

## **I-8- DIFFERENTS CONTROLES EFFECTUES SUR LES JOINTS DE SOUDURES :**

### **I-8-1- Contrôles non destructifs :**

#### **I-8-1-1- Contrôle dimensionnel:**

##### **I-8-1-1-1 : Principe du contrôle visuel et dimensionnel :**

Le contrôle visuel est une technique essentielle lors du contrôle non destructif. le contrôle doit être réalisé l'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci des défaut évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion, fissures ouvertes, ...)[19]

##### **I-8-1-1-2 :Condition du contrôle visuel et dimensionnel :**

Le contrôle visuel doit être sous une luminosité de 350 lux minimum (recommandé : 500 lux). L'œil de l'observateur doit être placé à une distance inférieure à 500 mm de la surface à examiner sous un angle supérieur à 30°.

##### **I-8-1-1-3 : Materials de contrôle :**

- Règle droite ou ruban de mesure avec graduations de 1 mm
- Loupe grossissante de 2 à 5 fois
- Jeu de jauges ou cales de 0,1 à 3 mm
- Jauge à vernier ou calibre de soudure
- Miroir ou endoscope

##### **I-8-1-1-4 :Forme et dimensions :**

La préparation du chanfrein est contrôlée pour vérifier que :

- la forme et les dimensions du joint sont conformes à la fiche de soudage.
- les bords et la surface adjacente sont nettoyés

La soudure est contrôlée pour vérifier que :

- la hauteur de la surépaisseur du cordon externe et de la pénétration est conforme
- la surface de la soudure est saine et régulière
- la largeur de la soudure est constante
- la dénivellation ou le désalignement est dans les tolérances de la norme

### **I-8-1-2- Contrôle par ressuage**

#### **I-8-1-2-1 :Principe du contrôle par ressuage :**

C'est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de pièces métalliques, essentiellement, mais aussi en céramique (fissures, porosités, replis, manque de liaison).

. Ce contrôle est réalisé à l'aide de produits (un liquide fluorescent ou coloré en rouge) à très faible tension superficielle qui pénètrent par capillarité dans les défauts débouchant en surface. Après élimination de l'excès de pénétrant sur la surface des pièces (figure I-16), l'apparition visuelle des défauts est réalisée par l'application d'un révélateur en une fine couche de poudre constituée de microscopiques tubes capillaires qui pompent le pénétrant retenu dans les discontinuités des défauts.[19]



**Figure I-16-a: contrôle par ressuage**

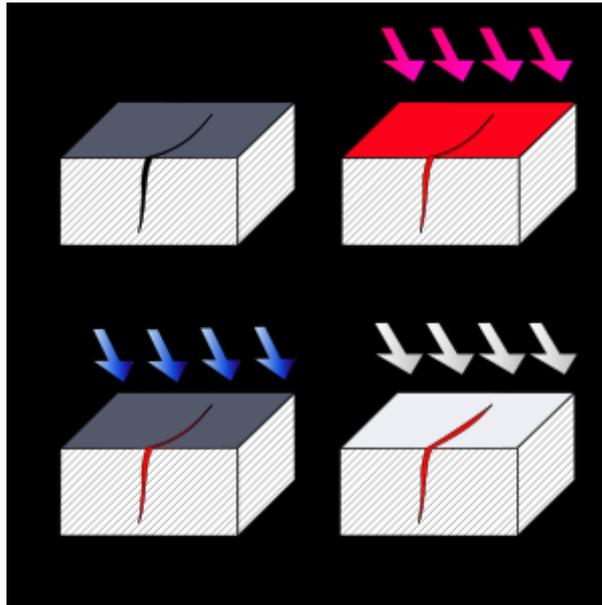


Figure I-16-b: contrôle par ressuage

### I-8-1-2-2 : Applications du contrôle par ressuage :

- \*Avant soudage : préparation des chanfreins
- \*Pendant le soudage : contrôle entre passes, gougeage d'une reprise envers
- \*Après soudage : défauts superficiels, étanchéité

### I-8-2 : Qui peut effectuer ce contrôle ?

Comme pour tous les autres contrôles non destructifs, dans un certain nombre d'industries (aéronautique, automobile), la déclaration de conformité des pièces contrôlées ne peut être rédigée et signée que par un opérateur certifié. Pour obtenir sa carte (son document de certification),[20] l'opérateur doit :

- justifier d'un certain nombre d'heures de pratique, sous la responsabilité d'un opérateur certifié,
- produire un certificat médical d'aptitude pour justifier de sa bonne vision (avec ou sans correction),
- suivre une formation,
- réussir l'examen de certification (épreuves théoriques et pratiques),
- signer un engagement déontologique et le respecter,
- effectuer ses contrôles sur une installation qualifiée.

### I-8-2-1- Contrôle radiographique

le contrôle radiographique est utilisé notamment pour les soudures dans les centrales nucléaires et les chantiers navals et pétroliers par rayonnements ionisants (X ou  $\delta$ ) permet de détecter des défauts de compacité internes souvent très fins (fissures, soufflures, inclusions, manque de liaison, manque de fusion) dans les parois des matériaux métalliques[21]

#### I-8-2-1-1-Principe de contrôle :

Ce contrôle est réalisé à l'aide d'un tube générateur à rayons X ou d'une source radioactive  $\delta$  qui émettent des rayonnements ionisants, de films radiographiques ou d'une caméra pour l'acquisition numérique de l'image transmise placés sur la face inverse au rayonnement. Les rayons électromagnétiques de faible longueur d'onde sont partiellement absorbés par les hétérogénéités du milieu en traversant la paroi du matériau irradié. Le faisceau impressionne le film radiosensible en fonction des rayonnements transmis à travers la pièce contrôlée pour donner naissance à l'image radiographique. La présence d'un défaut se traduit par une variation de l'absorption du rayonnement émis et donc à une variation de la densité optique du film au droit de l'image du défaut. [2]

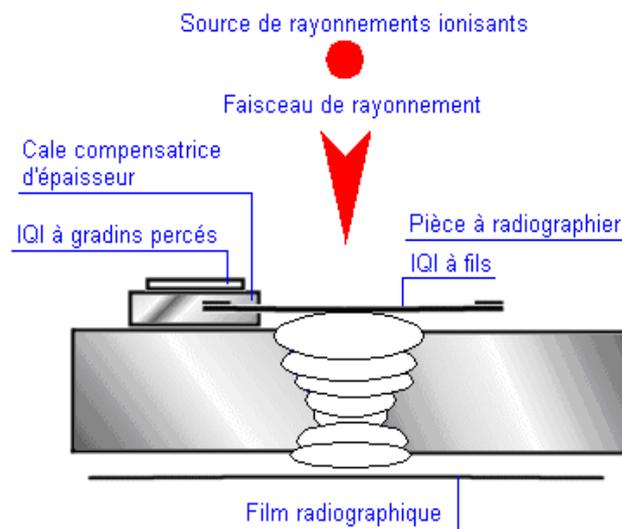


Figure I-17 : Principe du contrôle radiographique.

#### I-8-2-1-2 : Avantages du contrôle par radiographie :

- Facilité de détection des défauts internes des pièces.
- Rapidité relative d'obtention des résultats (de l'ordre de 15 minutes).
- Bonne sensibilité de détection des défauts.
- Traçabilité et archivage des résultats

**I-8-2-1-3 : Inconvénients du contrôle par radiographie :**

- Investissement important
- Limitation du contrôle par les épaisseurs et par le matériel utilisé.
- Les opérateurs doivent être très expérimentés
- Les règles de sécurité sont rigoureuses et contraignantes
- Mise en œuvre délicate sur chantier avec tube à rayons X

**I-8-2-2 : Contrôle par ultrasons**

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. [19-22]

**I-8-2-2-1 : Principe :**

Les ondes ultrasoniques sont envoyées dans la pièce par une sonde [23]. Elles sont réfléchies par la surface de fond et renvoyées à la sonde qui les convertit en impulsions électrique visualisées sur un oscilloscope (Figure I-18).

Si sur leur trajet elles rencontrent un défaut, celui-ci produira une réflexion et un écho qui parviendra à la sonde avant celui de fond. Cette technique requiert un opérateur très expérimenté pour interpréter les résultats. On choisira le type de contrôle en fonction de la qualité voulue pour le joint et du coût de la pièce.

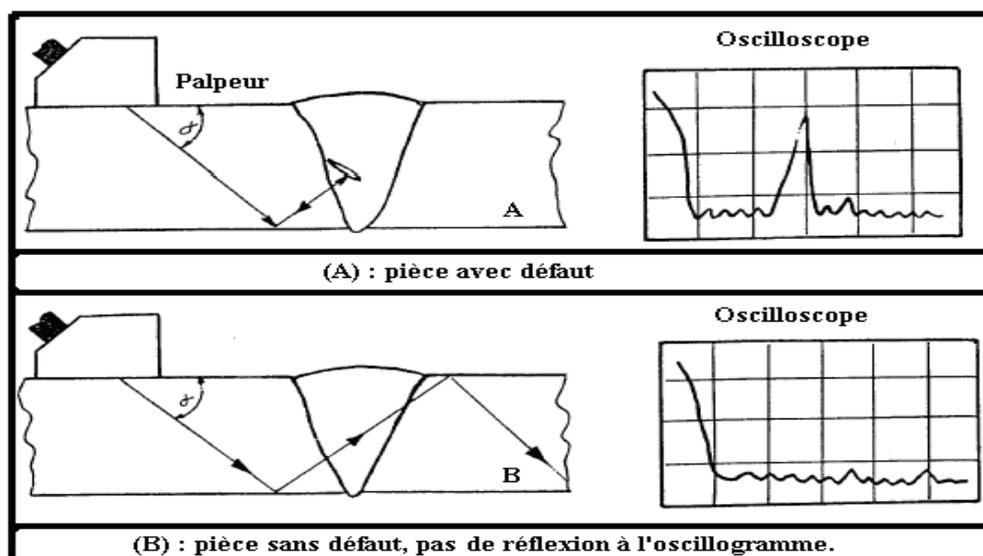


Figure I-18 : Contrôle par ultrasons.

**I-8-2-2-2 Appareillage :****Figure1-19:oscilloscope****I-8-2-3 : Le contrôle par magnétoscopie :**

La magnétoscopie s'applique uniquement aux pièces ferromagnétiques. Elle ne permet de détecter que des discontinuités débouchantes ou légèrement sous-jacentes (environ 1 mm) comme les criques ou les tapures par exemple. Une pièce peinte peut être contrôlée si la couche de peinture est inférieure à 50  $\mu\text{m}$ . Cette méthode est sensible à l'orientation des discontinuités présentes à la surface. Ainsi, détecter une crique dans le sens longitudinal ou dans le sens transversal ne nécessite pas exactement la même technique.[24]

Le principe du contrôle par magnétoscopie est le suivant : il s'agit de magnétiser la zone à contrôler afin de créer une fuite du champ magnétique dans une discontinuité. Cela entraîne des particules ferromagnétiques au droit de la discontinuité et va permettre de voir l'indication. Dans la pratique, il existe différents types de matériel. Certains sont portatifs et permettent de faire les contrôles sur site. Pour magnétiser, on fait soit passer du courant dans la pièce, ce qui a pour effet d'induire un champ magnétique, soit on place directement la zone de pièce à examiner dans un champ magnétique (figureI-19-a). La surface à inspecter est ensuite aspergée ou saupoudrée par des particules ferromagnétiques qui sont colorées ou fluorescentes et que l'on nomme révélateur.[25]

Enfin, la pièce est observée sous un éclairage adéquat, en lumière blanche ou UV, pour déceler d'éventuelles indications qui se présenteront sous forme de lignes ou de taches. A la fin de l'essai, il peut être nécessaire de procéder à une démagnétisation de la pièce, sans quoi des étapes d'usinages ultérieurs pourraient être perturbées, ou cela pourrait entraîner des dysfonctionnements de la pièce en service. Les indications sont évaluées par rapport aux critères d'acceptation. Si elles dépassent les limites autorisées, on emploie alors le terme de défaut et la pièce est déclarée non conforme.[26-27]

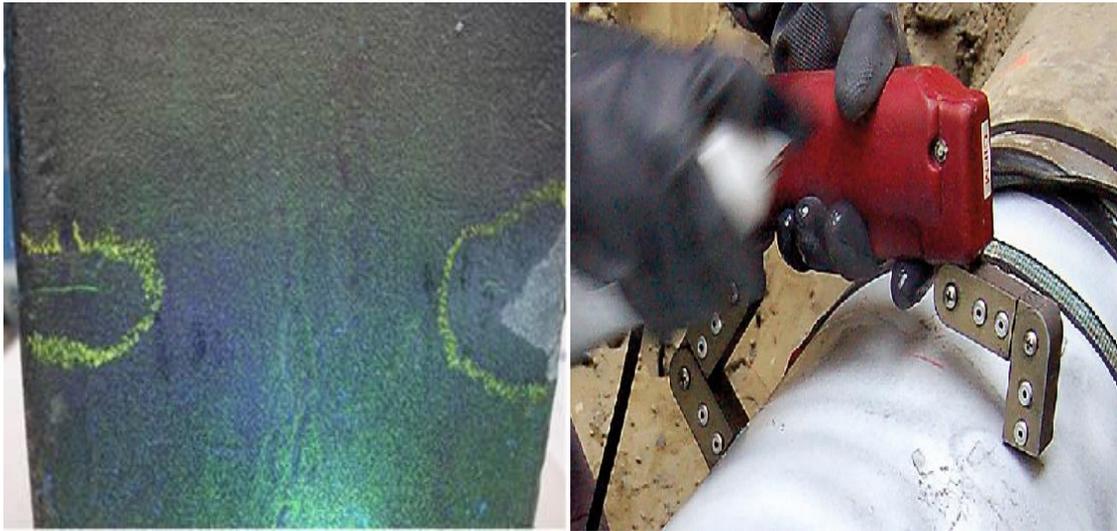


Figure1-19-a : Le contrôle par magnétoscopie

#### I-8-4: Contrôles destructifs

##### I-8-4-1: Macrographie

##### I-8-4-1-1: Principe de l'essai :

L'examen macroscopique permet de révéler la structure métallographique homogène ou hétérogène d'une coupe transversale d'une éprouvette soudée. la compacité de la coupe de la soudure, de définir le nombre de passes réalisées, la disposition des passes et la géométrie des cordons. (Figure I-20). [28]

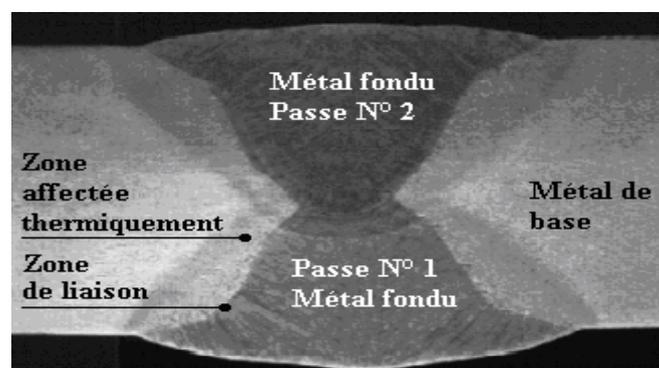


Figure I-20 : Coupe transversale d'une éprouvette soudée.

**I-8-4-1-2. Préparation de l'éprouvette d'examen :**

Il faut préparer l'éprouvette à partir d'une coupure de sens inverse de la soudure, avec une meule sous eau pour éviter les échauffements. Un usinage de la surface est nécessaire

Comme il faut découper avec un lapidaire sans système de refroidissement de la pièce, pour éliminer la zone surchauffée de la découpe. [29]

**I-8-4-1-3 : Polissage de l'éprouvette d'examen :**

Le pré-polissage de la surface à examiner est réalisé avec un touret sous eau et des disques abrasifs de granulométrie d'environ P120 – P400 – P600. La vitesse de rotation est comprise entre 150 et 300 tours/minutes environ. L'échantillon subit une rotation à 90° à chaque changement de granulométrie pour effacer les raies précédentes de polissage. La durée de polissage est d'environ 2 minutes par granulométrie.

Un polissage de finition peut être réalisé avec une granulométrie de P800 à P1200 et des pâtes diamantées de 6 et 1 micron ou de l'alumine sur un drap ou feutre de polissage en velours pour des examens particuliers. . [30]

**I-8-4-1-4 : Attaque chimique de l'éprouvette d'examen :**

L'éprouvette est immergée dans le bain d'attaque à l'aide d'une pince de manipulation en inox ou bien le réactif est déposé sur la surface de l'éprouvette avec une tige avec un embout en coton. L'opérateur averti doit surveiller l'évolution de l'attaque chimique et l'arrêter par neutralisation lorsqu'elle lui semble satisfaisante. Il ne doit pas respirer les vapeurs et éviter le contact des réactifs sur la peau et dans les yeux.

**I-8-4-1-5 : La structure de l'éprouvette d'examen :**

La structure révélée par l'attaque chimique est observée par le spécialiste.

- Le métal fondu (MF) ou zone fondue (ZF)
- La zone de liaison (ZL)
- La zone affectée thermiquement (ZAT)
- Le métal de base (MB)

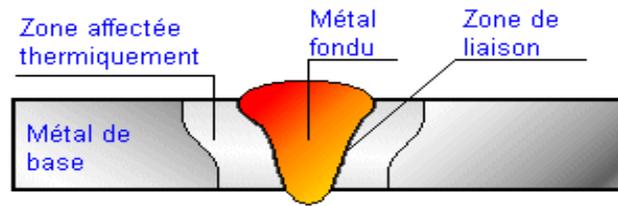


Figure I-21 : structure d'une éprouvette soudées.

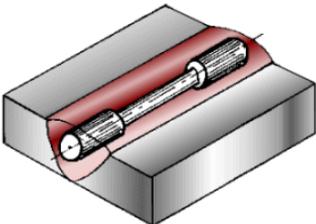
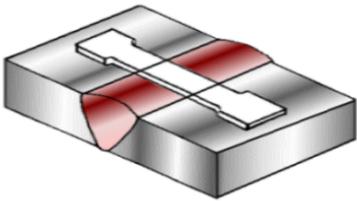
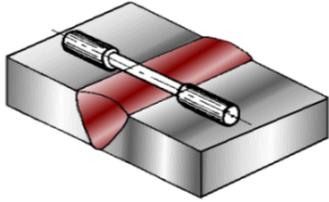
**I-8-4-2: Essai de traction**

**I-8-4-2-1: Principe de l'essai mécanique :**

Les 'essais de traction les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser une éprouvette de section cylindrique ou prismatique à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai.

Cet essai est réalisé sur une machine spéciale qui enregistre les efforts et les allongements. L'essai permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile. La norme de référence est la NF EN 10002-1 Octobre 1990.[31]

**I-8-4-2-2 : Localisation des éprouvettes de traction dans un joint soudé (Tableau I-7) :**

Différents types d'éprouvettes de traction		
		
Éprouvette cylindrique sur le joint de soudure	Éprouvette prismatique transversale au joint de soudure	Éprouvette cylindrique transversale au joint de soudure

**I-8-4-2-3 : Dimensions des éprouvettes de traction**

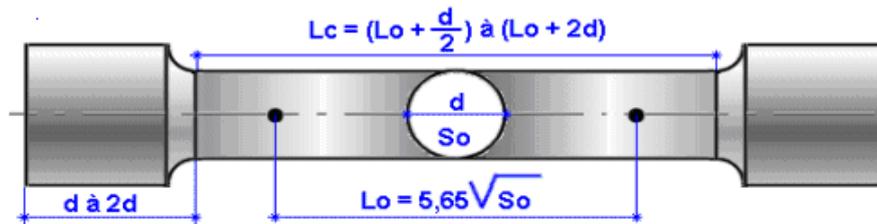


FIGURE I-22 : EPROUVETTE DE TRACTION CYLINDRIQUE.

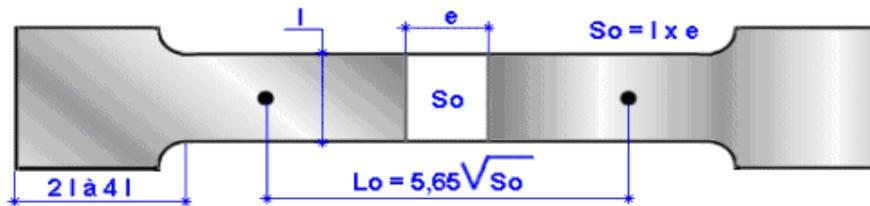


FIGURE I-23 : EPROUVETTE DE TRACTION PRISMATIQUE.

#### I-8-4-2-4 : Caractéristiques mécaniques de la traction (Tableau I-8) :

CARACTÉRISTIQUES DE TRACTION	FORMULES DE CALCULS
Limite élastique apparente – Re	$Re \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fe \text{ (Mpa ou N)} / So \text{ (mm)}$
Résistance à la rupture – Rm	$Rm \text{ (N/mm}^2\text{)} = Fm \text{ (Mpa ou N)} / So \text{ (mm)}$
Allongement en % - A %	$A \text{ (\%)} = ((Lu - Lo) / Lo) \times 100$
Striction en % - Z %	$Z \text{ (\%)} = ((So - Su) / So) \times 100$
Allongement de striction en %	$Zu \text{ (\%)} = ((So - Su) / Su) \times 100$

### I-8-4-3 : Essai de dureté

#### I-8-4-3-1 : Principe :

Les essais habituels de dureté sont simples, rapides, et généralement non destructifs ; ils offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique et mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui F donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions de l'empreinte du pénétrateur laissée sur la surface du matériau contrôlé. L'empreinte est d'autant plus importante que le matériau est mou. Les essais de dureté caractérisent la résistance qu'offre un matériau à la pénétration.[32]

### I-8-4-3-2 : Les différents types d'essais de dureté :

#### ➤ Essai Brinell – HB :

Elle est obtenue par une bille polie en acier trempé ou carbure de tungstène (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et valeur de la charge F appliquée (maintenue 15 à 60 secondes) pour obtenir "d" de l'empreinte (d doit être compris entre 0,2 à 0,5 x D). K = 30 pour les aciers (Figure I-24)

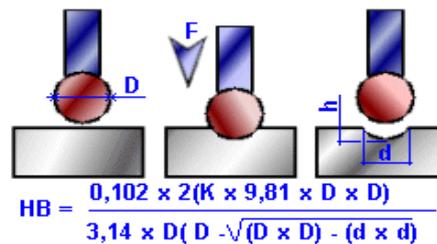


FIGURE I-24 : SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ESSAI BRINELL.

#### ➤ Essai Rockwell – HR :

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement. Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur bille acier ou cône diamant.[33]

Une précharge ( $F_0$ ) permet de faire une empreinte initiale et, par-là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface.

#### ➤ Essai Rockwell C – HRC :

Le pénétrateur est un cône de diamant de  $120^\circ$  d'angle et de charge égale à 1373 N. On mesure l'accroissement "e" en profondeur ou enfoncement rémanent (Figure I-25).

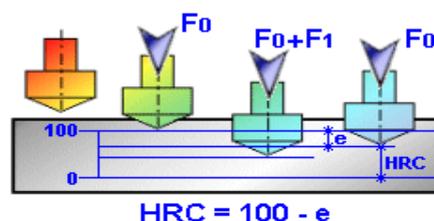


Figure I-26 : Schéma du principe de l'essai Rockwell C.

➤ **Essai Rockwell B – HRB :**

Le pénétrateur est une bille en acier trempé de 1,6 mm de diamètre et de charge égale à 883 N. On mesure l'accroissement "e" en profondeur ou enfoncement rémanent (Figure I-26).[33]

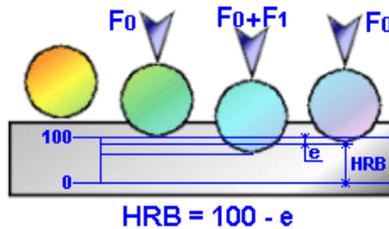


FIGURE I-26 : SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ESSAI ROCKWELL B.

➤ **Essai Vickers – HV :**

Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° sous une charge F. On mesure les diagonales "d" de l'empreinte (Figure I-27).[33]

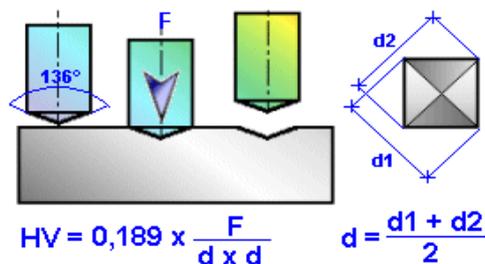


FIGURE I-27 : SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ESSAI VICKERS.

**I-8-4-3-3 : L'essai de dureté Vickers sur assemblage soudé :**

L'essai de dureté Vickers est réalisé sur un échantillon préalablement poli et prélevé perpendiculairement à l'axe du cordon de soudure. La soudure, la zone de liaison, les zones thermiquement affectées et le métal de base sont révélés par une attaque chimique à l'aide d'un réactif. La charge d'essai est généralement de 49,2 N soit 5 kgf (symbole de dureté **HV5**) ou de 98,07 N soit 10 kgf (symbole de dureté **HV10**). La charge est appliquée progressivement et de façon

constante jusqu'à ce que la charge choisie soit atteinte. Le temps de maintien de la charge est de 10 à 15 secondes.

#### I-8-4-3-4 : Localisation des empreintes dans les soudures bout à bout :

Au moins une empreinte doit être réalisée dans la zone thermiquement affectée à une distance de 0,5 mm de la ligne de fusion pour les matériaux qui durcissent dans cette zone lors du soudage (Figure I-28).

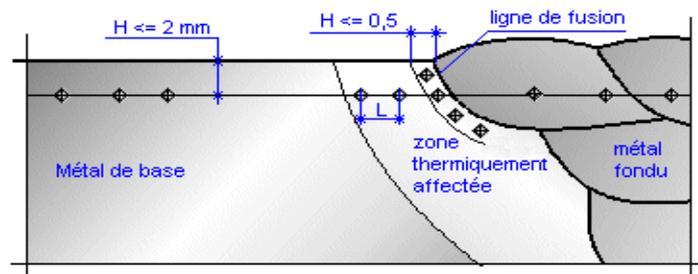


FIGURE I-28 : REPRESENTATION D'UNE EMPREINTE DANS LES SOUDURES BOUT A BOUT.

#### I-8-4-3-5 : Localisation des empreintes dans les soudures d'angles :

Pour les matériaux qui durcissent en zone thermiquement affectée lors du soudage, au moins une empreinte doit être réalisée dans cette zone à une distance de 0,5 mm de la ligne de fusion (Figure I-29).

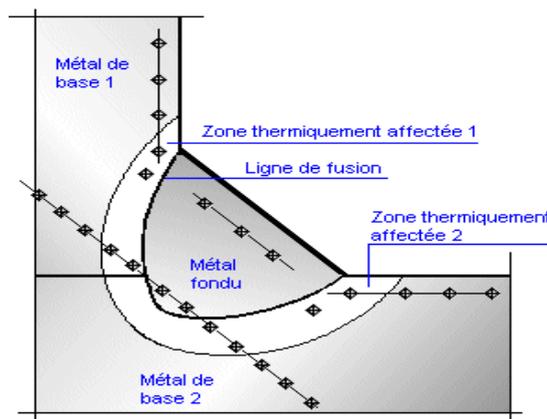


FIGURE I-29 : REPRESENTATION D'UNE EMPREINTE DANS LES SOUDURES D'ANGLES.

### I-8-5: Essai de résilience

#### I-8-5-1: Principe de l'essai mécanique :

Ce essai est destiné à caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc soit pour la mesure des propriétés mécaniques du métal, à l'aide d'une masse pendulaire, un barreau usiné de forme carré de 1 cm<sup>2</sup> de section, entaillé en son milieu par une encoche et reposant sur deux appuis. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale appelé mouton pendule rotatif qui enregistre l'énergie absorbée par la rupture.[34]

. La norme de référence est la NF EN 10045-1 Octobre 1990 et la NF EN 875 Novembre 1995. [35]

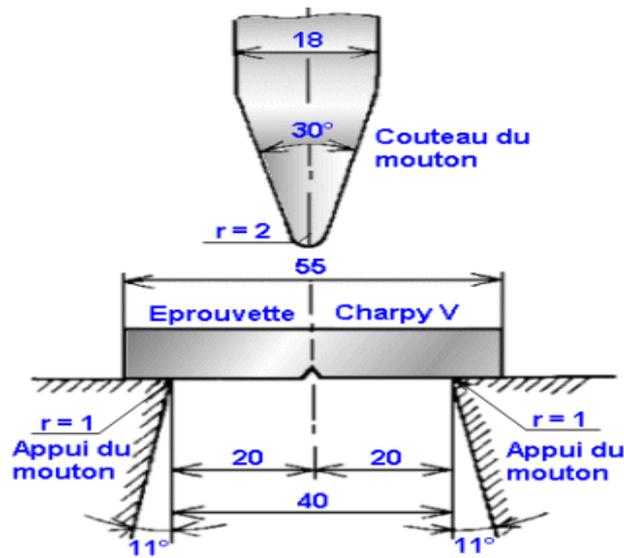


FIGURE I-30 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN ESSAI DE RESILIENCE.

**I-8-5-2 : Localisation des éprouvettes de résilience dans un joint soudé (Tableau I-9) :**

DIFFERENTES POSITIONS D'ÉPROUVETTES DE RESILIENCE	
Entaille de l'éprouvette sur le joint de soudure	Entaille de l'éprouvette sur la ZAT

**I-8-5-3 : Les types et dimensions des éprouvettes de résilience (Tableau I-10) :**

DIFFERENTS TYPES D'ÉPROUVETTES DE RESILIENCE	
TYPE D'ÉPROUVETTE	OBSERVATIONS
<p><b>Eprouvette Charpy V</b></p>	<p><b>CHARPY - ISO Entaille en V</b></p> <p>Profondeur d'entaille = 2 mm</p> <p>Angle du V é = 45°</p> <p>Rayon du fond entaille = 0,25 mm</p>
<p><b>Eprouvette DVM</b></p>	<p><b>CHARPY - ISO Entaille en U</b></p> <p>Profondeur d'entaille = 3 mm</p> <p>Rayon du fond entaille = 1 mm</p>

**I-8-5-4 :Caractéristiques mécaniques de la résilience (Tableau I-11) :**

Caractéristique	Formule de calcul	Croquis
<p><b>Résilience KCV</b></p>	<p><math>KCV (J/cm^2) = \frac{\text{Énergie absorbée } W (J)}{\text{Section au droit de l'entaille } S2 (cm^2)}</math></p> <p><b>Exemple de calcul de résilience</b></p> <p><math>KV = 95 J</math> soit <math>KCV = 95 J / 0,8 cm^2</math> ou</p> <p><math>I \times 1,25 = 118,75</math></p> <p><math>J/cm^2</math></p>	

**I-8-5-5 : Les températures d'essais des résiliences :**

Les essais de résiliences sont réalisés principalement à la température ambiante et à des températures inférieures à 0° Celsius. (De - 20° C à - 196° C)

Les liquides réfrigérants utilisés pour abaisser la température des éprouvettes sont :

- L'alcool jusqu'à - 80° C
- Le fréon jusqu'à - 155° C
- L'azote liquide de - 155° C à - 196° C

Plus la température de l'essai est faible, plus la structure ductile de l'éprouvette devient fragile (Figure I-31). Plus la grosseur de grain d'un matériau métallique est faible, meilleurs sont les valeurs de résiliences à basse température.

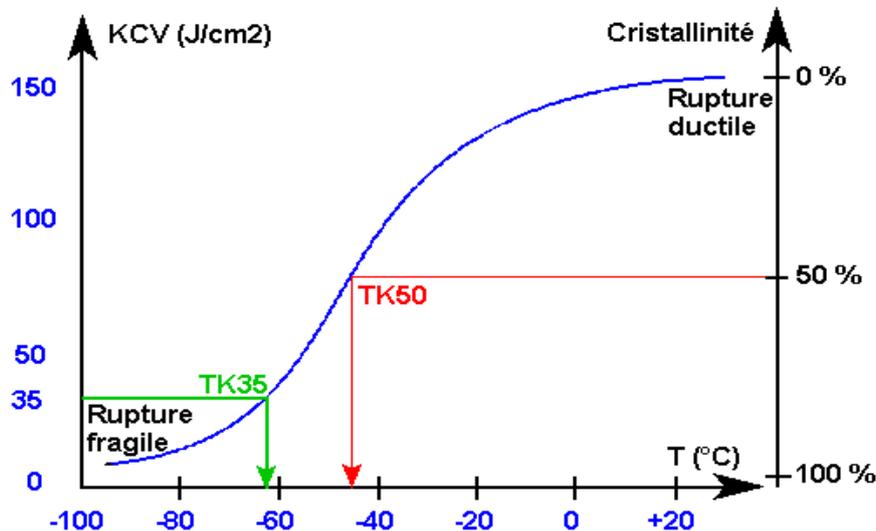


Figure I-31 : Schéma de l'énergie absorbée en fonction de la température.

### I-9 : CONCLUSION :

Le choix de la méthode de contrôle des soudures dépend du contexte, de la pièce soudée et des exigences de qualité spécifiques, chaque approche contribue à garantir des soudures fiables et durables dans diverses applications industrielles et avant de sélectionner une méthode de contrôle, il est essentiel de comprendre le contexte de la soudure. Est-ce une soudure structurelle, une soudure de tuyauterie, ou une soudure pour des composants critiques qui dépend de différentes pièces requièrent des approches spécifiques. Par exemple, les soudures sur des réservoirs sous pression nécessitent une attention particulière pour éviter les fuites, tandis que les soudures sur des structures métalliques doivent résister aux charges mécaniques et même les exigences de qualité dans les normes et les spécifications définissent les exigences de qualité. Les soudures pour l'industrie aéronautique, par exemple, doivent subir des contrôles rigoureux pour garantir leur intégrité.

# **Chapitre II**

## **Presentation des materiaux**

**II-I : INTRODUCTION :**

Les matériaux de référence à de qualité non alliée, normalement désigné par la norme AFNOR , Ces matériaux sont utilisés dans diverses applications industrielles, notamment dans la fabrication de réservoirs sous pression, de chaudières et d'échangeurs de chaleur et avant d'approfondir l'étude des matériaux , il est essentiel de définir tous les paramètres. Cela inclut l'identification du contexte de réalisation de l'étude, l'origine de la demande ou de la commande, le réalisateur et les circonstances de l'étude

L'étude des propriétés mécaniques et physiques des matériaux est cruciale. Cela comprend la déformation, la formabilité, la fatigue, le fluage et la rupture

**II-2 :PRESENTATION GENERALE DU MATERIAU ETUDIE :**

On a basé dans notre étude sur les résultats des chercheurs sur l'acier A48AP utilisé pour la fabrication des citernes à gaz et les circuits vapeur vive principal VVP. Parmi les procédés de soudage on prit le soudage automatique à l'arc et soudage manuel à l'électrode enrobée (EE) . La partie caractérisation à été effectuée par notre encadreur, une partie à l'entreprise SIMAS Hassi Aneur (Oran) et la partie Analyse au laboratoire FMR (IS) Metz.

**II-2-1 : Mesure de dureté :**

Pour dureté Vickers de marque 'LEITZ DURIMET' avec une charge de 0,05N à 20N. On utilise pour cette essai un diamant en forme de pyramide, à base carré angle aux sommets entre faces opposées 136° ; profondeur de pénétration égale à 1 /7

De la diagonale de l'empreinte

Dureté Vickers :

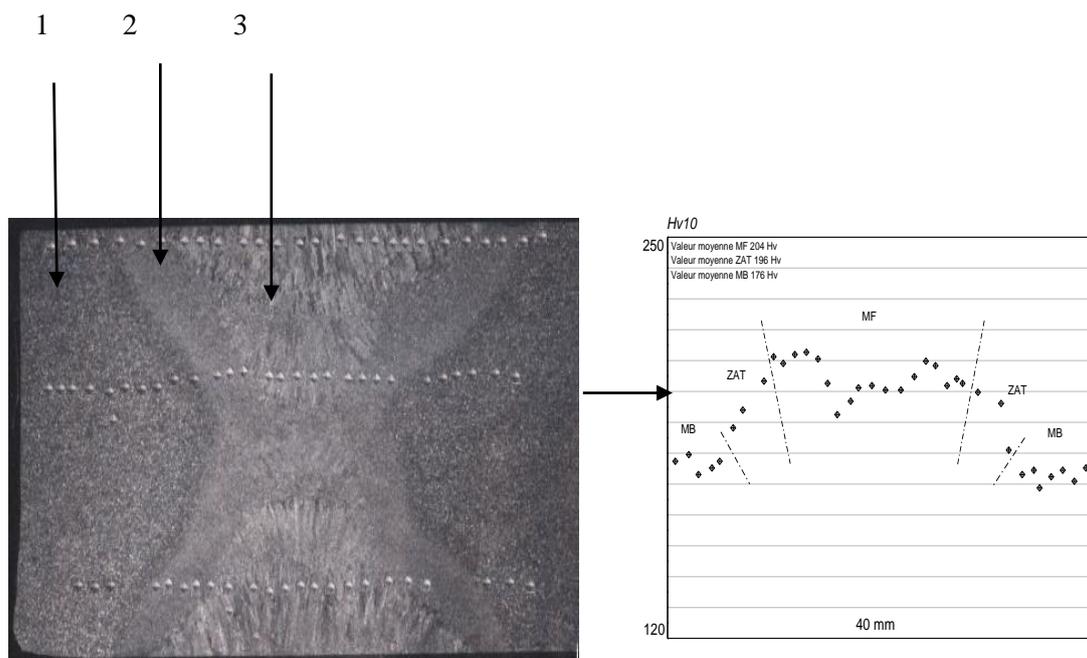
$$HV = \frac{1854.4P}{d^2} \quad [Kg/mm^2] \quad (II-1)$$

$P$  : charge appliquée

$d$  : moyenne des deux diagonales de l'empreinte ( $\mu\text{m}$ )

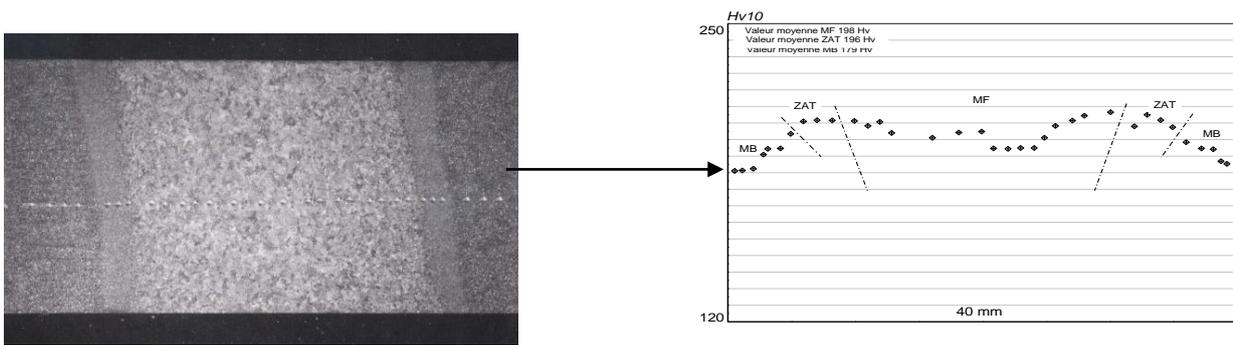
Des filiations de dureté Vickers sous 10 Kgf de charge, ont été effectuées à raison d'une mesure par millimètre dans l'épaisseur du produit, sur une coupe longitudinale et sur une coupe transversale. Les résultats des mesures sont reportés en figure (II-2).

La dureté est plus élevée au voisinage de la surface externe en raison du laminage des tôles, la dureté moyenne mesurée est de 191 Hv10 dans le métal de base et de 171 Hv10 dans le métal déposé.[36]



**Figure II-1-a** :Filiations de dureté effectuées sur le joint soudé en surface et transversale perpendiculaire au cordon de soudure

- 1-Métal de base
- 2-Zat
- 3-Métal fondu



**Figure II-1-b :** Filiations de dureté effectuées sur le joint soudé en surface et transversale perpendiculaire au cordon de soudure

### II-3 : ESSAIS MECANIQUES

#### II-3-1: Essais de traction :

##### II-3-1-1 : Objectif :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette de section cylindrique ou prismatique à un effort progressif et croissant jusqu'à la rupture de la pièce d'essai.

A notre étude ont été conduits par laboratoire FMR (Fatigue et Mécanique de la Rupture) à l'institut de soudure (Thionville-Metz), pour la détermination des caractéristiques conventionnelles et rationnelles de traction du trois zones constituant le joint soudé (MB - ZAT - MF), les essais ont été effectuées à température ambiante, sur des éprouvettes prélevées conformément aux normes AFNOR A03-151 et A03-351.[37]

##### II-3-1-2- Démarche expérimentale :

##### II-3-1-2-1 : Epreuves d'essai :

Il était nécessaire de réaliser des joints en K en plus des joints en X pour pouvoir obtenir des essais en pleine épaisseur dans la ZAT. A l'aide des tôles découpées et positionnées de façon que la soudure soit perpendiculaire au sens du laminage.

Pour la détermination des caractéristiques conventionnelles et rationnelles de traction, deux prélèvements des éprouvettes ont été effectués :

- ⇒ Prélèvement dans le sens longitudinal (figure III-3)
- Éprouvettes cylindriques de section droite circulaire de diamètre:
  - 6 mm pour (Métal Fondu MF) (figure III-4-a)
  - 10 mm pour (Métal de Base MB) (figure III-4-b)

- Eprouvettes prismatiques dans la (Zone Affectée Thermiquement ZAT) (figure III-4-c)

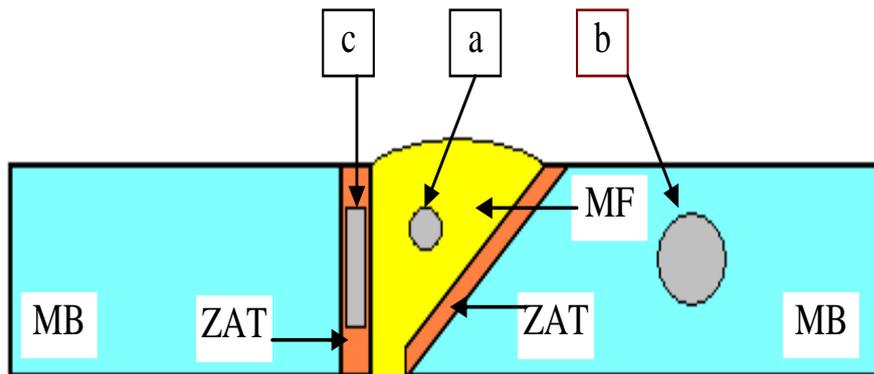


Figure II-2 : Schéma du sens de prélèvement des échantillons (longitudinaux)

II-3-1-2-2 : Différentes éprouvettes utilisées pour les essais de traction

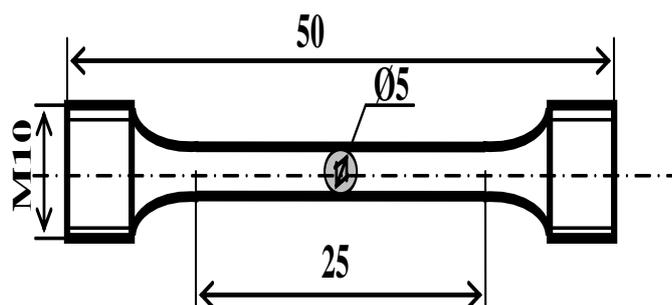
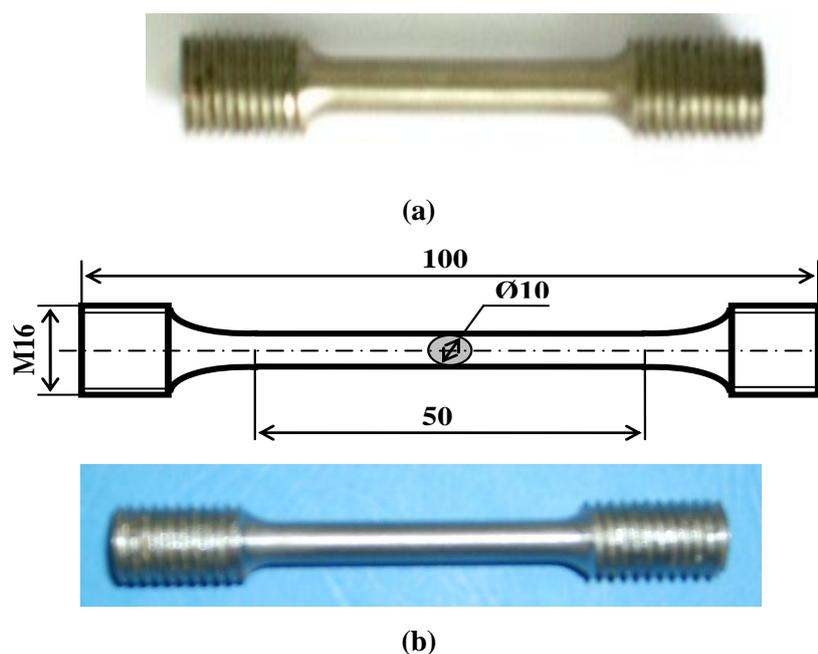


Figure II-3 : éprouvettes normalisé utilisées pour les essais de traction



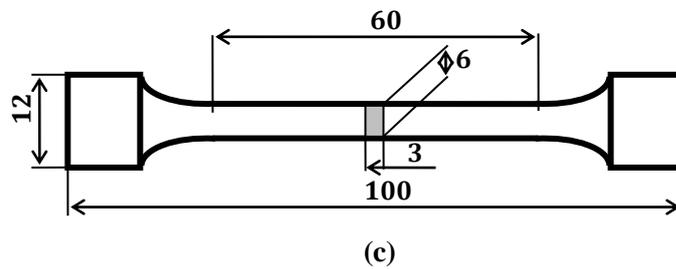


Figure II-4 : Différentes éprouvettes utilisées pour les essais de traction

⇒ Prélèvement dans le sens transversal (figure II-5)

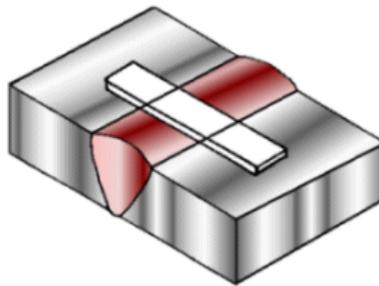


Figure II-5 : Schéma du sens de prélèvement des éprouvettes (transversales)

### II-3-1-2-3 : Dispositif expérimental et conditions d'essai :

Ces essais ont été conduits sur une machine universelle d'essai électro-hydraulique asservie IBERTEST de capacité 4000 daN en statique et 3300 daN en dynamique (figure III-6).

Les vitesses de sollicitation appliquées pendant l'essai est de :

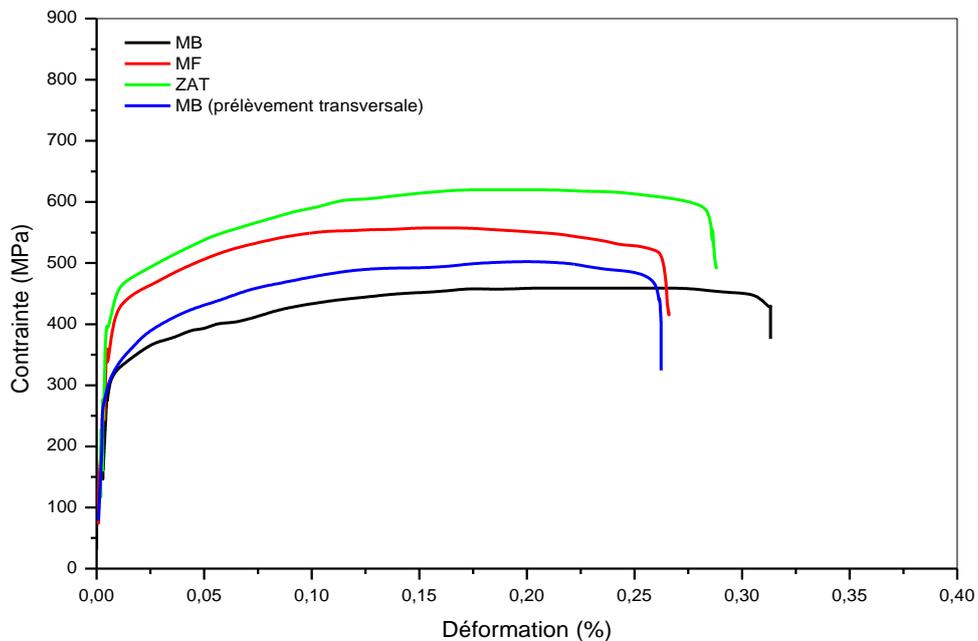
- 12 mm/s pour la détermination de  $R_{0,2}$  (contrôle déformation)
- 0,5 mm/min pour la courbe rationnelle
- 25 mm/min pour la détermination de  $R_m$  (contrôle déplacement)



**Figure II-6:** Machine universelle d'essai électro-hydraulique asservie IBERTEST

### II-3-1-3 : Caractéristiques conventionnelles de traction :

Pour éviter la dispersion sur les mesures de la limite conventionnelles d'élasticité, les essais n'ont pas été conduits en contrôle automatique de la vitesse d'allongement mais en contrôle manuel du déplacement du vérin de la machine d'essai. Les résultats de ces essais sont donnés dans le tableau (II-2) et la figure (II-7).[38]



**Figure II-7:** Courbe conventionnelles de traction des différentes éprouvettes.

Matériaux	Propriétés mécaniques				
	Re (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)	k	n
Métal de Base MB	325	400	30	980	0,401
Zone affectée thermiquement ZAT	445	600	40	836	0,302
Métal fondu MF	420	531	35	1009	0,508

**Tableau III-2 :** Propriétés mécaniques des trois zones

La résistance à la traction du métal de base elle est plus faible (400 MPa) que la résistance des deux autres zones (MF : 531 MPa) et (ZAT : 600 MPa) et la limite conventionnelles d'élasticité dans la ZAT (445 MPa), est absolument supérieur à la limite d'élasticité dans les autres zones du joint de soudure (MF :420 MPa et MB :325 MPa)

On ne trouve pas d'effet du sens de prélèvement sur la limite conventionnelle d'élasticité, en ce qui concerne la résistance à la traction du métal de base elle est faible d'environ 10% pour les éprouvettes prélevées dans le sens longitudinal par rapport à celles prélevées dans le sens transversal. Ce résultat est dû à un amorçage très précoce de la rupture, certainement sur les inclusions qui intervient avant d'atteindre la charge maximum.

Aux niveaux des les éprouvettes prélevées dans le sens transversal, on peut observer que les valeurs de la résistance à la traction qui y sont mentionnées sont relatives au métal de base et non au métal déposé, puisque dans tous les cas la rupture s'est produite dans le métal de base. La rupture enregistrée dans le métal de base vers 510 MPa est cohérente avec la valeur de résistance à la traction du métal déposé relevée à 531 MPa en fabrication.[39]

#### II-3-1-4 : Courbes rationnelles de traction :

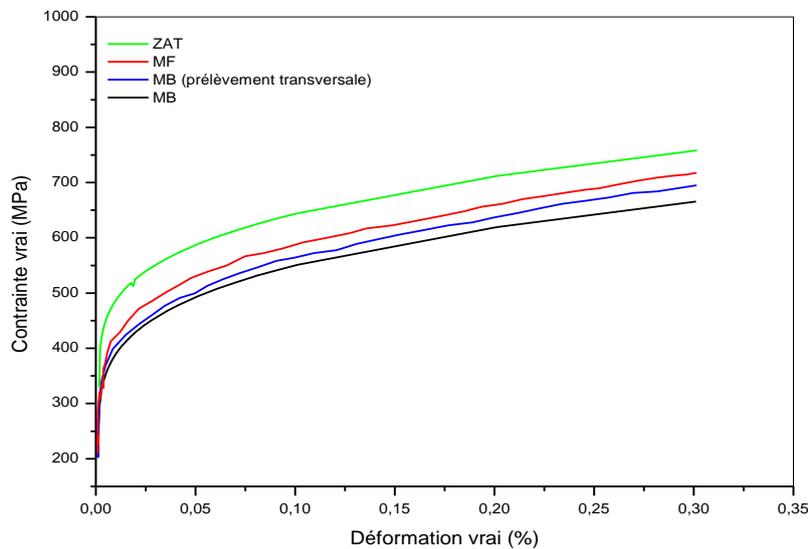
Les courbes rationnelles de traction  $(\sigma, \varepsilon_t)$ , sont tracées avec les mêmes éprouvettes utilisées par les chercheurs, après la détermination de la limite conventionnelle d'élasticité et avant rupture. Ou :

$$\sigma : \text{la contrainte vraie} : \quad \sigma = \frac{F}{S_0} (1 + e)$$

$$\varepsilon_t : \text{la déformation rationnelle totale} : \quad \varepsilon_t = \log(1 + e)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} : \text{Déformation totale mesurée (élastique + plastique).}$$

Les résultats obtenus sont présentés en figure (III-8).



**Figure III-8:** Courbe rationnelle de traction des différentes éprouvettes.

D'après la courbe les valeurs de la limite apparente d'élasticité et de la résistance à la traction sont supérieures aux valeurs minimales garanties (données constructeur). On remarque généralement une limite conventionnelle et rationnelle d'élasticité, supérieur dans la ZAT à celle du métal de base MF qui est supérieur à celle du métal de base.

## II-3-2 : ESSAIS DE FISSURATION ET MESURES :

### II-3-2-1 : Expérimentation:

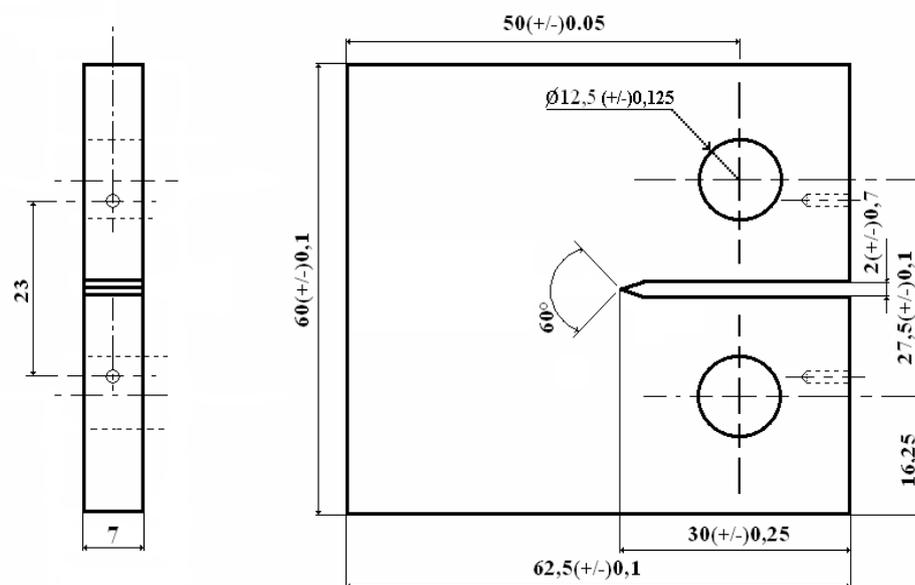
#### II-3-2-1-1 : Epreuves utilisées:

Les essais de fissuration ont été effectués sur des éprouvettes CT50 d'épaisseur 07 mm (figure III-9), conformes à la norme ASTM-E-647.



**Figure II-9** : CT50 pour les essais de fissuration.

Les dimensions d'éprouvette CT50 d'essais de fissuration: figure (II-10)



**Figure II-10** : Schéma et dimensions des l'éprouvettes CT50 utilisé pour les essais de fissuration.

### II-3-2-1-2 Conditions des essais et instrumentation :

Ces essais de fissuration ont été effectués sur une machine électro-hydraulique asservie INSTRON de capacité 100 KN en statique et 100 KN en dynamique (figure II-11) par des professeurs de l'université de Sidi Bel Abbès (Djilali Lyabes).



**Figure II-11:** machine électro-hydraulique

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes polis mécaniquement au papier et sollicités dans le sens TL à une température ambiante et pour une même valeur de rapport de charge  $R$  à une fréquence nominale de 25 Hz dans les deux zones métal de base et métal fondu (III-12 et 13).

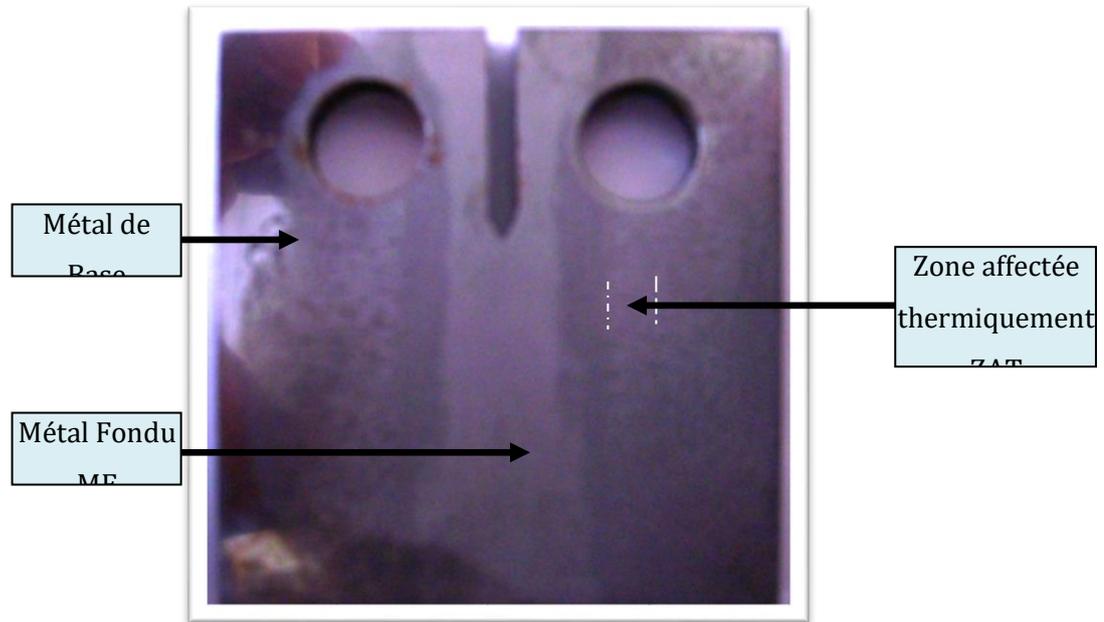


Figure II-12 : Morphologie des différentes zones d'un cordon de soudure

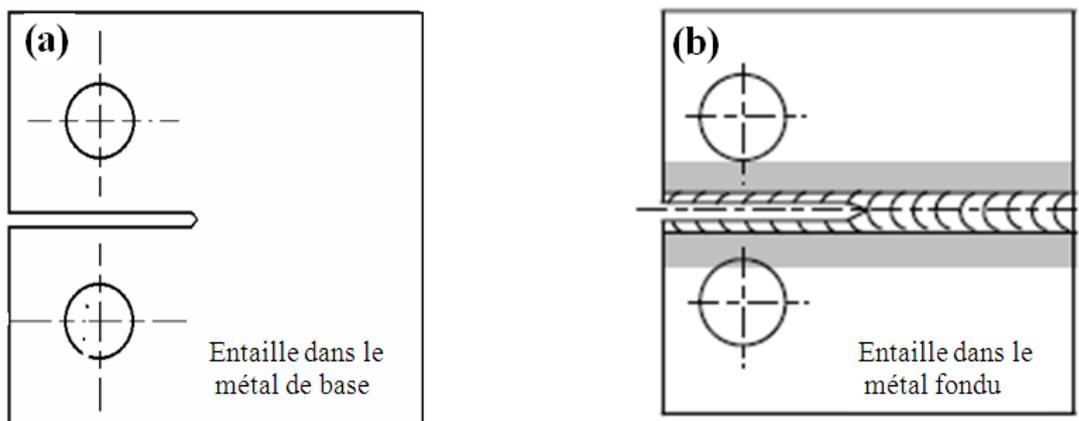
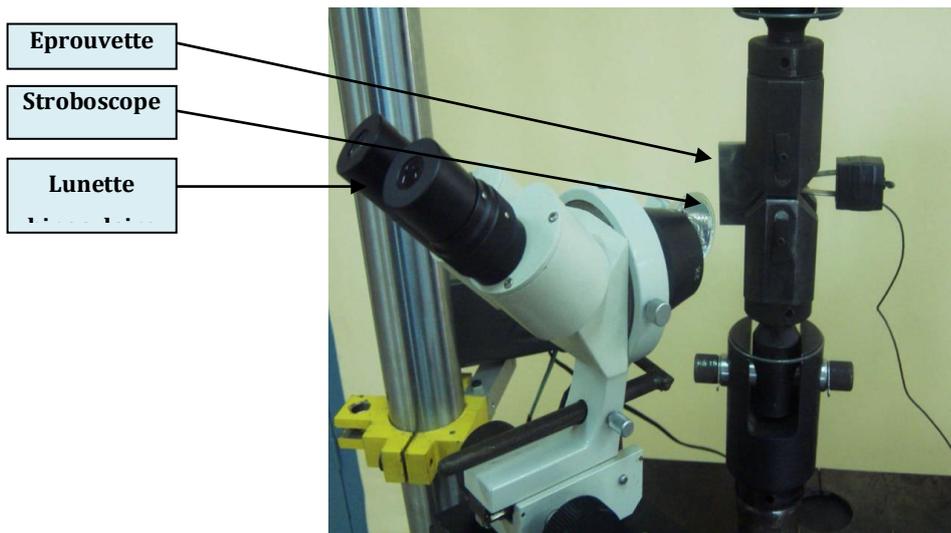


Figure II-13 : Représentation Schématique des Entailles.

### II-3-2-2 Mesure de la fissure :

Suivi de la fissure a été réalisée à l'aide d'une lunette binoculaire optique grossissante et un stroboscope montés sur un dispositif solidaire de la machine pour obtenue la mesuré de la longueur de fissure. (Figure III-14).



**Figure II- 14:** Système (Loupe binoculaire – Lampe stroboscope) utilisé pour le suivi de fissure.

### II-3-2-3 : Méthode de calcul de la vitesse de fissuration :

Pour traiter les données expérimentales, nous avons mis en œuvre un programme faisant intervenir un lissage de la courbe  $a=f(N)$  en se basant sur une méthode polynomiale incrémentale utilisant le lissage d'une série de points successifs par un polynôme dont la croissance est monotone dans cet intervalle. L'équation de la courbe lissée est de la forme :

$$a_i = b_0 + b_1 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (\text{II-3})$$

$b_0$ ,  $b_1$  et  $b_2$  : Paramètres de régression déterminés par la méthode des moindres carrés dans un intervalle de sept points.

Les paramètres  $C_1$  et  $C_2$  sont utilisés pour normaliser les données

$$C_1 = \frac{1}{2}(N_{i-3} + N_{i+3}) \quad (\text{II4})$$

$$C_2 = \frac{1}{2}(N_{i+3} - N_{i-3}) \quad (\text{II-5})$$

La vitesse de fissuration au point  $a_i$  est obtenue à partir de la dérivée de la première expression.

$$\frac{da}{dN} = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \left( \frac{N_i - C_1}{C_2^2} \right) \quad (\text{II-6})$$

### II-3-3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS :

#### II-3-3-1 : Vitesses de propagation

Les essais de fissuration ont été réalisés à l'air ambiant pour les deux zones, dans le domaine des vitesses comprises entre  $10^{-5}$  et  $10^{-2}$  mm/cycle à un rapport de charge ( $R=0,1$ ). Les valeurs de  $\Delta K$  varient de :

- 31 à 80 MPa $\sqrt{\text{m}}$  dans le métal de base (MB)
- 29 à 80 MPa $\sqrt{\text{m}}$  dans la zone affectée thermiquement (ZAT)
- 29 à 70 MPa $\sqrt{\text{m}}$  dans le métal fondu (MF)

Afin de comparer plus clairement et de manière plus systématique l'évolution de la vitesse de fissuration dans les deux zones, nous avons choisi de les représenter par leurs droites de régression linéaire respectives obtenues à partir des points expérimentaux (méthode des sept points) sur les parties linéaires des courbes.[40]

En effet, nous pouvons remarquer que les courbes présentent une allure quasi rectiligne sur une grande partie du domaine exploré, pouvant être présentée par une loi de PARIS de la forme :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (\text{II-7})$$

L'exposant  $m$  est de l'ordre de :

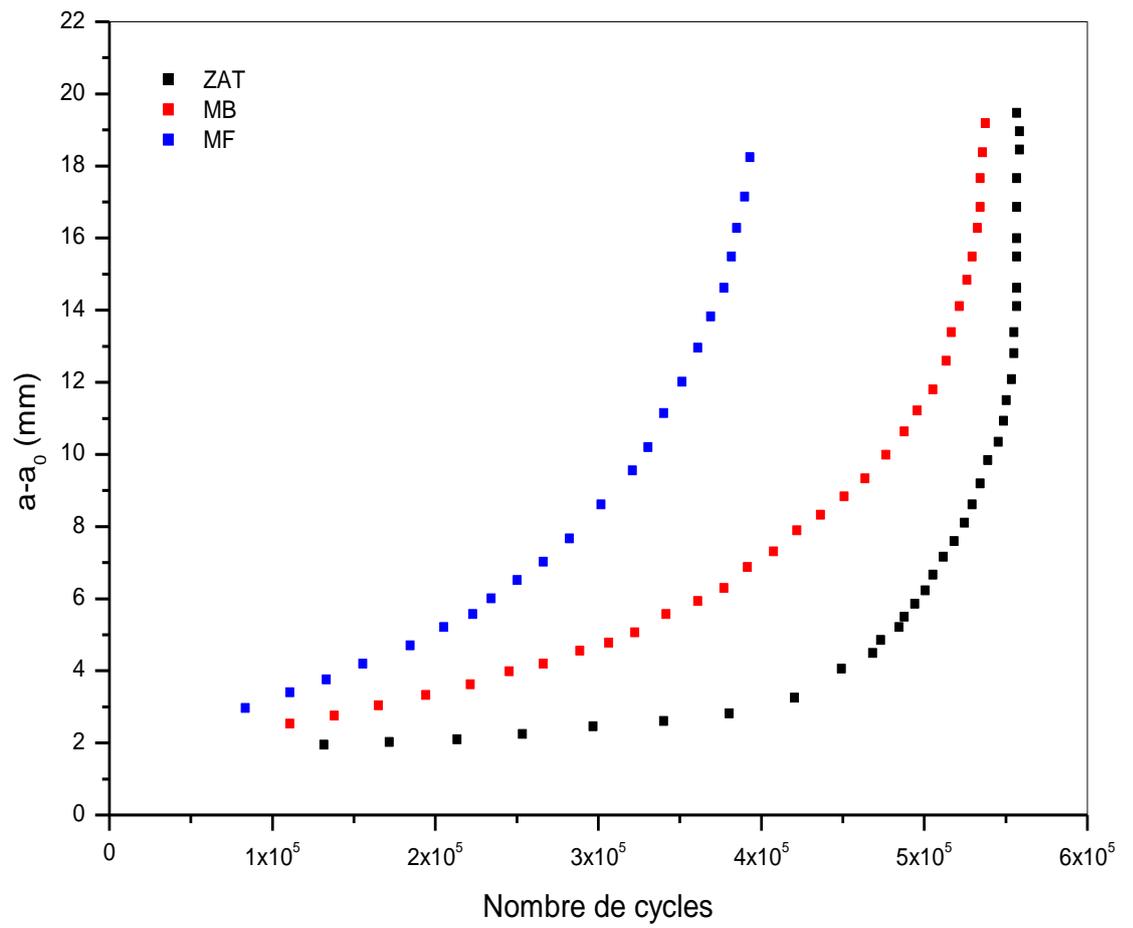
- 4,2 dans le métal de base (MB)
- 4,3 dans la zone affectée thermiquement (ZAT)
- 4,9 dans le métal fondu (MF)

Le tableau (II-3) indique les résultats des essais de fissuration obtenus dans les deux zones consignés respectivement

Désignation	Loi de Paris	$\Delta K$
MF	$Da/dN=1,08e^{-12}\Delta K^{4,2}$	29 à 70 MPa $\sqrt{m}$
MB	$Da/dN=8,63e^{-11}\Delta K^{4,3}$	31 à 80 MPa $\sqrt{m}$
ZAT	$Da/dN=6,33e^{-11}\Delta K^{4,8}$	29 à 80 MPa $\sqrt{m}$

**Tableau II-3:** Loi de Paris dans les différentes zones étudiées

Les résultats obtenus concernant les différentes éprouvettes possédant une entaille mécanique traversant l'épaisseur de la tôle et située dans les trois zones (MB – MF – ZAT) sont représentés par les figures (II-B-6) et (II-B-7). A même niveau de  $\Delta K$ , on observe généralement une vitesse de fissuration  $da/dN$ , inférieur dans la ZAT à celle du métal de base MB qui est inférieur à celle du métal fondu. Cependant, l'écart entre ces vitesses diminue lorsque  $\Delta K$  augmente. Ce même phénomène est rencontré dans le cas des aciers austénitiques [39] et des aciers ferritiques [40]. Pour ces deux types d'aciers cette réduction de vitesse s'accompagne généralement d'une déviation de la fissure de son plan initial vers le métal de base. Certains auteurs [80] ont tenté d'expliquer cette déviation par la différence de caractéristiques mécaniques entre les trois zones, la fissure se dirigeant d'une microstructure plus dure, vers une microstructure plus douce. Pour notre acier au carbone A48AP aucune déviation de la fissure de son axe de propagation n'est remarquée (figure II-B-8), ce qui nous pousse à conclure que la soudure a été seine et le choix du métal d'apport qui présente une limite d'élasticité inférieur à celle du métal de base était adéquat.



**Figure II-B-6 :** Extension de la fissure en fonction du nombre de cycles pour les trois zones étudiées

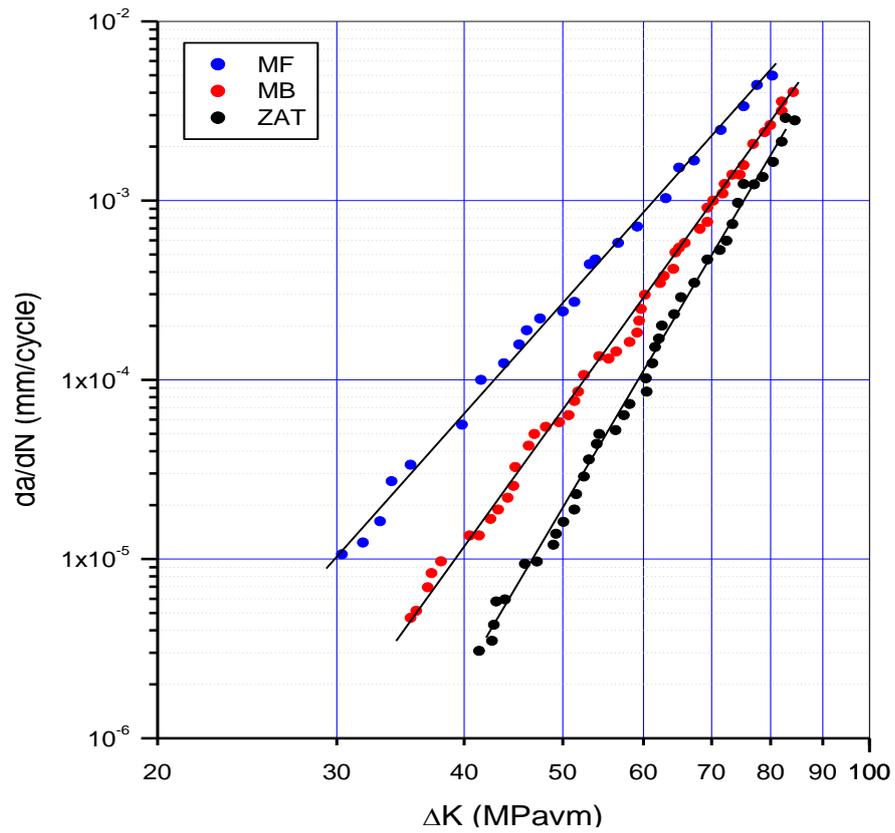


Figure II-B-7 : Evolution de la vitesse de fissuration en fonction de  $\Delta K$  pour les trois zones étudiées



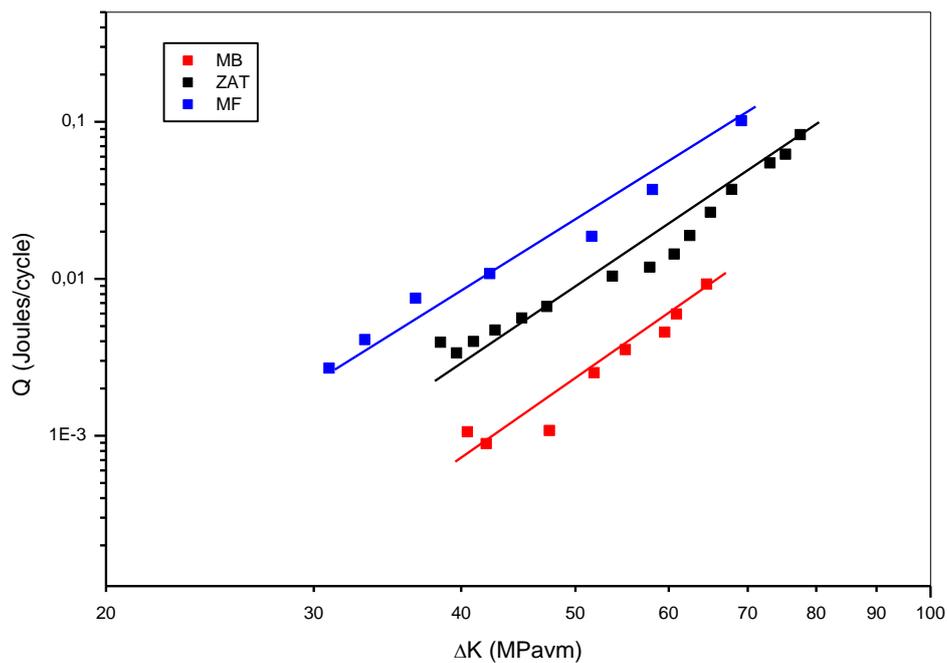
Figure II-B-8 : Position de la fissure par rapport à l'axe de propagation de la fissure

### II-3-3-2 : Evolution des paramètres énergétiques :

#### II-3-3-2-1 : Evolution de l'énergie Q en fonction de $\Delta K$ :

L'évolution de l'énergie hystérétique Q dissipée pendant un cycle en fonction de  $\Delta K$  pour un rapport de charge  $R=0,1$  et dans les trois zones étudiées (MB – ZAT – MF) et ce représenté dans la figure (II-B-9).

Cette énergie est déterminée par une intégration numérique des cycles (P-  $\delta'$ ), son expression est obtenue en calculant l'aire de cette boucle obtenue par acquisition et traitement par un programme écrit sous LABVIEW. L'avantage de ce programme est de pouvoir faire l'estimation de cette énergie hystérétique pour les faibles valeurs de  $\Delta K$ . Nous remarquons que Q augmente quand  $\Delta K$  augmente pour les trois zones étudiées.



**Figure II-B-9 :** Evolution de l'énergie hystérétique en fonction de  $\Delta K$

#### II-3-3-2-2 : Evolution de l'énergie spécifique U en fonction de $\Delta K$ :

La figure (II-B-10) représente l'évolution de l'énergie spécifique dépensée par cycle U en fonction de  $\Delta K$  pour un rapport de charge  $R=0,1$  et dans les trois zones étudiées (MB – ZAT – MF). Cette énergie est donnée par la relation suivante :

$$U = \frac{\text{Air de la boucle } (P \cdot \delta')}{2B \left( \frac{da}{dN} \right)}$$

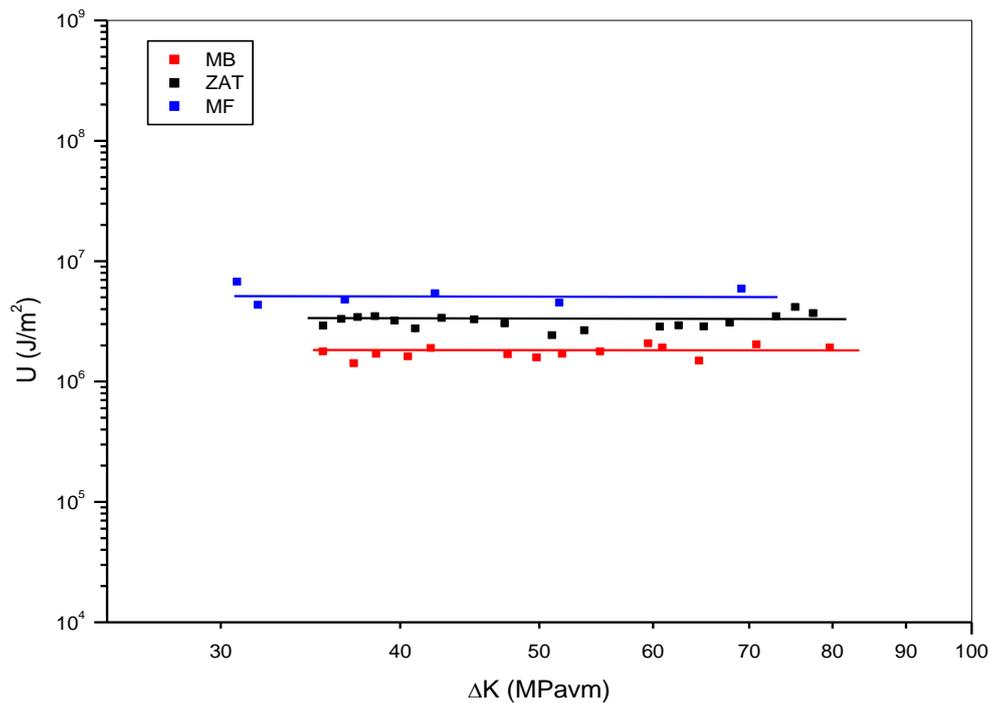
Ou

$$U = \frac{Q}{2B \left( \frac{da}{dN} \right)}$$

D'après les résultats qui ont fait, on peut remarquer que cette énergie spécifique U est constante par rapport à  $\Delta K$  pour les différentes zones du joint de soudure étudié avec des valeurs moyennes de :

- 1,81E10<sup>6</sup> pour le métal de base (MB)
- 3,34 E10<sup>6</sup> pour la zone affectée thermiquement (ZAT)
- 5,67 E10<sup>6</sup> pour le métal fondu (MF)

Ces résultats sont en accord avec les travaux de KIKUKAWA [41], RANGANATHAN [42], et BENGUEDIAB [43] où Ils considèrent que le travail hystérique est essentiellement dissipé dans la zone plastifiée et que dans le cas où les phénomènes de fermeture sont importants, il est envisageable qu'une partie de l'énergie U est dissipée dans la zone située dans le sillage plastifié le long du front de fissure. Aussi ils ont constaté qu'au delà d'une valeur de  $\Delta K$  appelée  $\Delta K_{cr}$ , la valeur de (U) est constante est indépendante du rapport R et de l'environnement.



**Figure II-B-10 :** Evolution de l'énergie spécifique en fonction de  $\Delta K$

#### II-4 : CONCLUSION :

Les matériaux avec leur combinaison de résistance et de soudabilité, jouent un rôle essentiel dans diverses applications industrielles. Cependant, pour garantir leur utilisation efficace, une approche méthodique est nécessaire. L'étude approfondie des propriétés mécaniques et physiques, la comparaison avec d'autres matériaux et la construction rigoureuse de l'objet d'étude sont autant d'étapes cruciales. En somme, les matériaux A48AP représentent un équilibre entre performance et praticité, et leur utilisation judicieuse contribue au succès des projets industriels.

# **Chapitre III**

## **Etude expérimentale**

**III-1- INTRODUCTION :**

Dans la perspective d'une application adaptée des conditions de soudage lors des opérations d'assemblages, Cette étude porte sur l'exploitation des résultats obtenus par un travail mené par B.Bouchouicha, porte sur l'étude du comportement mécanique global d'un joint de soudure en acier inoxydable austénitique 316L, réalisé par le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gaz). Généralement, les caractéristiques mécaniques de ce type de joint soudé dépendent essentiellement de deux paramètres à savoir : La qualité du métal fondu et la qualité du gaz de protection.

Trois qualités de métal fondu : 18/17E/UP, GE SG et 20/10/SG et deux types de gaz de protection : Gaz Argon pur et Gaz Hélium ont été utilisés. Sur chacune des six configurations, des essais mécaniques de caractérisation ont été réalisés : essai de traction, résilience et de rupture.

**III-2- PREAMBULE:**

Les joints de soudures en acier inoxydable austénitique sont révélés des sites privilégiés pour l'apparition des défauts et d'endommagement, par comparaison avec d'autres aciers. Cet endommagement résulte de microcavités et du développement de microfissures dues à l'aptitude à la déformation et à la résistance aux contraintes mécaniques du métal d'apport et à une mauvaise protection du bain de fusion .

Les propriétés du métal fondu obtenu par le procédé de soudage TIG, sont influencées par le gaz d'assistance par présence des porosités qui diminuent la section de travail du joint réalisé et donc les propriétés mécaniques, il est donc important de connaître les propriétés physiques et chimiques qui vont conditionner son efficacité à protéger le joint de soudure réalisé .

L'objectif de ce travail portera sur l'étude du comportement mécanique global d'un joint de soudure en acier inoxydable austénitique 316L, réalisé par le procédé de soudage TIG, qui dépend essentiellement de deux paramètres à savoir : la qualité du métal fondu et la qualité du gaz de protection.

Trois qualités de métal fondu : 18/17E/UP (dépôt austénitique exempte ferrite), GE-SG (dépôt austénitique contenant de 4 à 10% de ferrite) et 20/10/SG (dépôt austéno-ferritique contenant de 30 à 55% de ferrite) et deux types de gaz de protection : Gaz Argon pur et Gaz Hélium associé ont été utilisés.

Sur chacune des six configurations, des essais mécaniques de caractérisation ont été réalisés : essais de traction, résilience, rupture.

### III-3- ETUDE EXPERIMENTALE :

#### III-3-1- Matériau utilisé :

Les différents essais ont été réalisés sur un acier inoxydable austénitique (type 316L), dont la Composition chimique est donnée par le tableau (III-1).

Matériaux	DIN	%C	%Si	%Cr	%Ni	%Mo
316L	X2CrNiMo1812	0,028	0,52	16,3	12,4	2,2
18/17E/UP	SG-X2CrNiMo 18 16	≤0,045	0,5	18	12,5	2,5
GE SG	SG-X2CrNiMo 19 12	≤0,040	0,7	19	11,5	2,8
20/10/SG	SG-X2CrNiMo 23 93	≤0,045	0,4	19	11	2,2

**Tableau III-1:** Compositions chimiques du métal de base et les métaux fondus.

#### III-3-2-Produits d'apports utilisés :

Le choix du métal d'apport conditionne le taux de ferrite dans le joint soudé. Nous avons choisi trois produits d'apport, avec différents taux de ferrite variant entre 0 à 55% :

- ⇒ 18/17E/UP (noté Mf1): présente un dépôt austénitique exempt de ferrite
- ⇒ GE SG (noté Mf2): présente un dépôt austénitique avec 5 à 14% de ferrite
- ⇒ 20/10/SG (noté Mf3): présente un dépôt austénito-ferritique avec 35 à 55% de ferrite

Lors du soudage d'aciers inoxydables austénitiques 316L, on recherche une teneur en ferrite de 8 à 19% [92] Des teneurs en ferrite supérieures peuvent créer un réseau interallié de ferrite, avec risque alors accru de formation de la phase sigma, qui diminue la résistance à la corrosion et la ténacité de la soudure. Les très faibles teneurs en ferrite augmentent pour leur part les risques de fissuration à chaud dus à une différence des coefficients de dilatation entre le métal de base et le métal d'apport.

### III-3-3-La protection gazeuse :

Le gaz protecteur, empêche la pénétration de l'air dans et aux alentours du bain de fusion à l'endroit de la soudure. Lors du soudage des tubes, il est généralement nécessaire de recourir à une atmosphère protectrice intérieure. Cette protection est indispensable pour réaliser une pénétration de bel aspect et non oxydée. Deux types de protections gazeuses seront utilisés, le Gaz Argon pur (GP1) et le Gaz Hélium (GP2).

### III-3-4-Désignation des éprouvettes :

La désignation des six combinaisons d'éprouvettes utilisées pour le soudage de l'acier inoxydable austénitique est présentée par la figure (III-1).

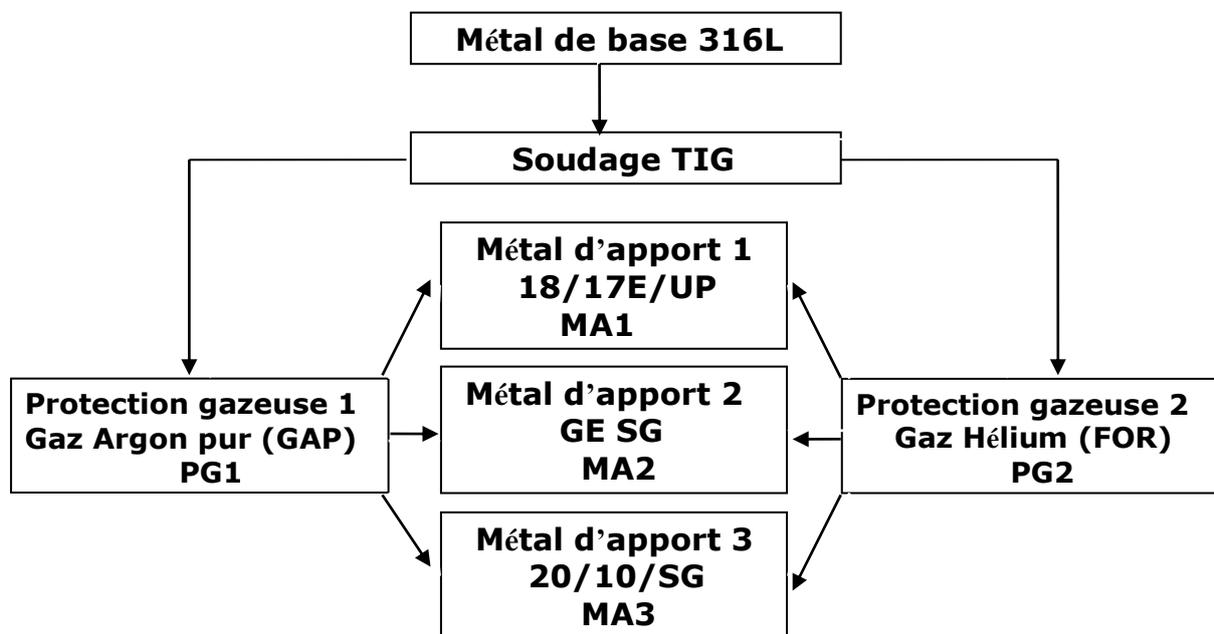


Figure III-1 : Schéma synoptique des éprouvettes utilisées

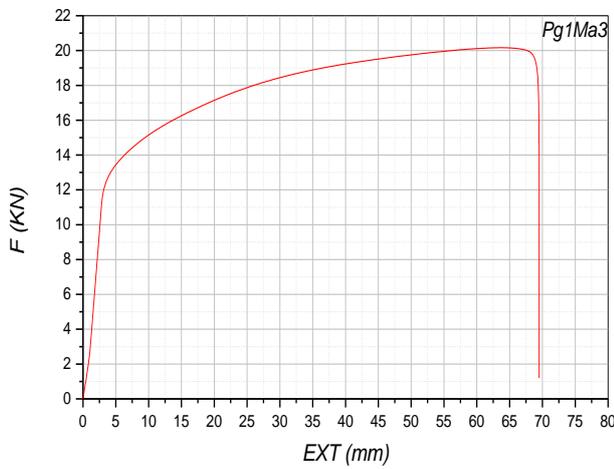
## III-4- RESULTATS ET DISCUSSION :

### III-4-1- Essai de traction :

Les essais de traction effectués sur des éprouvettes de dimensions 220x12x3 mm, prélevées en travers de la soudure du métal de base et des différentes combinaisons métal d'apport -protection gazeuse, ont été conduits sur une machine universelle d'essai électro-hydraulique asservie IBERTEST de capacité 4000 daN en statique et 3300 daN en dynamique. Les différentes caractéristiques de traction  $R_e$  (N/mm<sup>2</sup>),  $R_m$  (N/mm<sup>2</sup>) et A (%) sont enregistré directement sur la machine. Les résultats obtenus sont représentés sur le tableau (III-2) et les figures (III-2 et 3).

Matériaux	Re (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)	k	n
316L	225	485	40	1169	0,608
18/17E/UP	210	440	34	936	0,402
GE SG	210	430	35	1154	0,501
20/10/SG	250	550	35	1180	0,55

Tableau III- 2: Propriétés mécaniques du métal de base et les métaux fondus.



Ext[mm]	F[kN]	Ext[mm]	F[kN]
0	0	7,25	14,4
0,5	1,2	11,5	15,6
1	2,4	17,75	16,8
1,25	3,6	25,25	18
1,5	4,8	37,25	19,2
1,75	6	60	20,22
2	7,2	67,25	20,16
2,25	8,4	69	19,8
2,5	9,6	69,5	18
2,75	10,8	69,5	12
3	12	69,5	6
4,25	13,2	69,5	1,2

FIGURE III-2-a : Résultats Eprouvette PG1MA3

Ext[mm]	F[kN]	Ext[mm]	F[kN]
0	0	4,25	13,2
0,5	1,2	7,25	14,4
1	2,4	12,5	15,6
1,25	3,6	18,5	16,8
1,5	4,8	28,5	18
1,75	6	40	18,84
2	7,2	40,5	18
2,25	8,4	41	12
2,5	9,6	41	6
2,75	10,8	41	1,2
3	12		

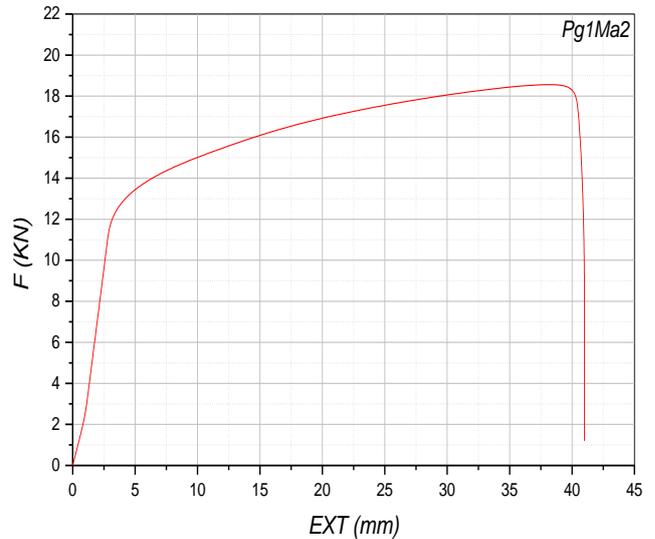
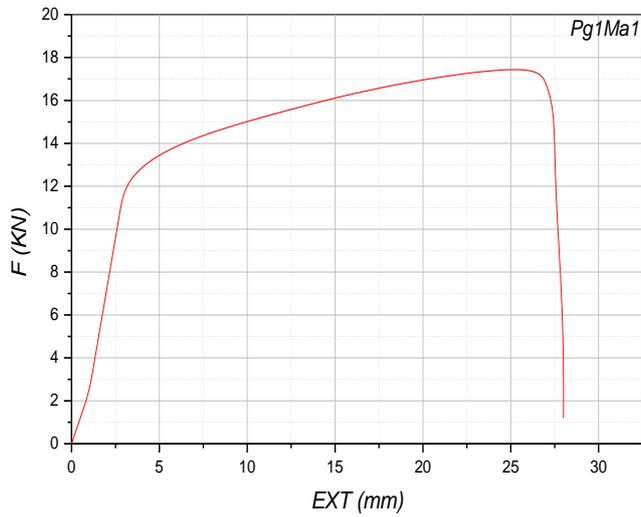
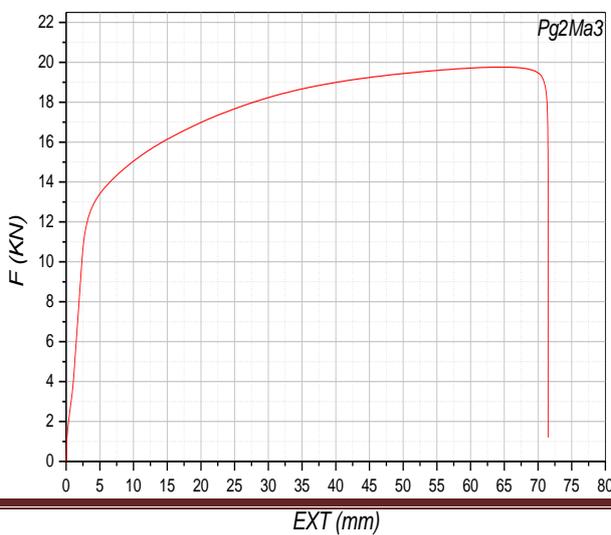


FIGURE III-2-b : Résultats Eprouvette PG1MA2



Ext[mm]	F[kN]	Ext[mm]	F[kN]
0	0	4,25	13,2
0,5	1,2	7,25	14,4
1	2,4	12,5	15,6
1,25	3,6	18,25	16,8
1,5	4,8	26,5	17,76
1,75	6	27	16,8
2	7,2	27,5	15,6
2,25	8,4	27,5	12
2,5	9,6	28	6
2,75	10,8	28	1,2
3	12		

FIGURE III-2-c : Résultats Epreuve PG1MA1



Ext[mm]	F[kN]	Ext[mm]	F[kN]
0	0	7,5	14,4
0,1	1,2	12	15,6
0,5	2,4	18,5	16,8
1	3,6	27	18
1,25	4,8	40,25	19,2
1,5	6	69	20,04
1,75	7,2	71	19,2
2	8,4	71,5	18
2,25	9,6	71,5	12
2,5	10,8	71,5	6
3	12	71,5	1,2
4,25	13,2		

FIGURE III-2-d : Résultats Epreuve PG2MA3

Ext[mm]	F[kN]	Ext[mm]	F[kN]
0	0	7,5	14,4
0,5	1,2	12,5	15,6
1	2,4	19	16,8
1,25	3,6	25	18
1,75	4,8	42	19,2
2	6	60	19,92
2,25	7,2	60,5	19,2
2,5	8,4	61	18
2,75	9,6	61	12
3	10,8	61	6
3,5	12	61	1,2
4,5	13,2		

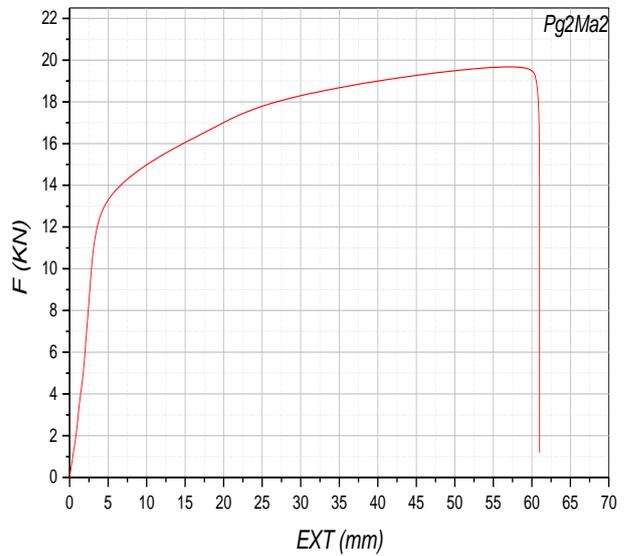
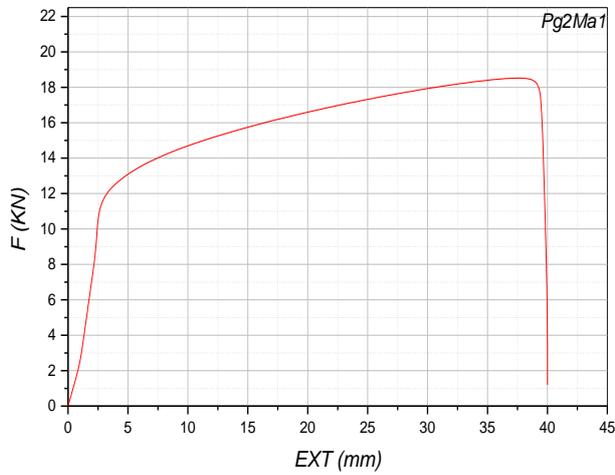


FIGURE III-2-e : Résultats Eprouvette PG2MA2



Ext[mm]	F[kN]	Ext[mm]	F[kN]
0	0	5	13,2
0,5	1,2	8,5	14,4
1	2,4	14	15,6
1,25	3,6	21	16,8
1,5	4,8	30	18
1,75	6	39	18,78
2	7,2	39,5	18
2,25	8,4	39,75	12
2,4	9,6	40	6
2,5	10,8	40	1,2
3	12		

FIGURE III-2-f : Résultats Eprouvette PG2MA1

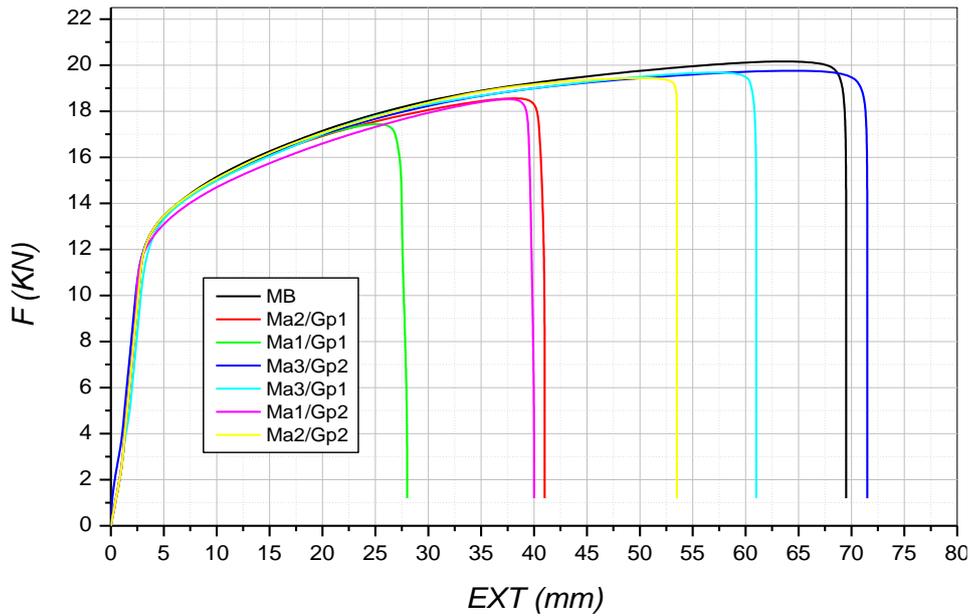


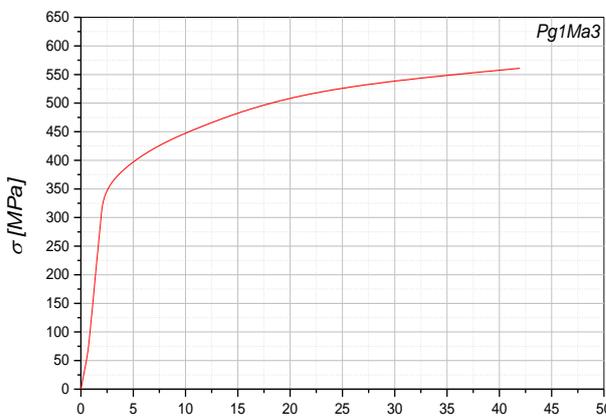
Figure III-2: Courbe conventionnelle de traction des différentes éprouvettes.

**III-4-2 Courbes rationnelles de traction :**

Les mêmes éprouvettes ont été utilisées, après la détermination de la limite conventionnelles d'élasticité et avant rupture, pour le tracé des courbes rationnelles de traction ( $\sigma, \epsilon_t$ ), où :

$\sigma$  est la contrainte vraie : 
$$\sigma = \frac{F}{S_0} (1 + e) \tag{III-2}$$

Et  $\epsilon_t$  est la déformation rationnelle totale :  $\epsilon_t = \log(1 + e)$  avec  $e = \frac{\Delta l}{l_0}$ , déformation totale mesurée (élastique + plastique). Les résultats obtenus sont présentés en figure (III-3)



$\epsilon \%$	$\sigma [MPa]$	$\epsilon \%$	$\sigma [MPa]$
0	0	1,92	300
0,35	33	2,09	333
0,69	66	2,97	366
0,87	100	5,06	400
1,05	133	8,04	433
1,22	166	12,41	466
1,39	200	17,65	500
1,57	233	26,04	533
1,74	266	41,95	561

FIGURE III-3-a : Résultats Epreuve PG1MA3

$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]
0	0	1,74	300
0,35	33	2,09	333
0,69	66	3,49	366
0,87	100	5,94	400
1,05	133	9,79	433
1,22	166	14,68	466
1,39	200	20,97	500
1,57	233	27,27	521
1,67	266		

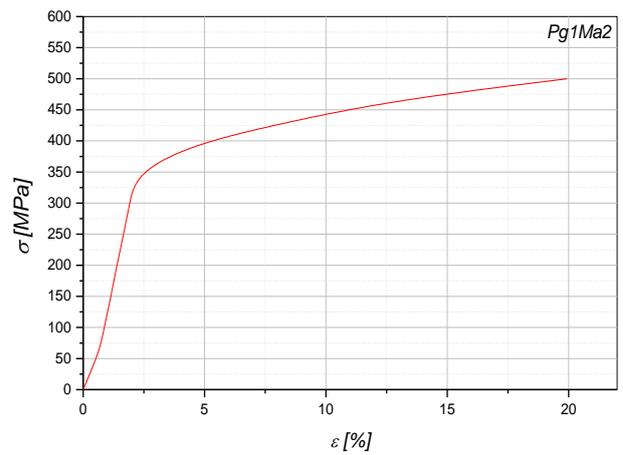


FIGURE III-3-b : Résultats Epreuve PG1MA2

$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]
0	0	1,92	300
0,35	33	2,09	333
0,69	66	2,97	366
0,87	100	5,06	400
1,05	133	8,74	433
1,22	166	12,93	466
1,39	200	19,93	500
1,57	233	27,97	523
1,74	266		

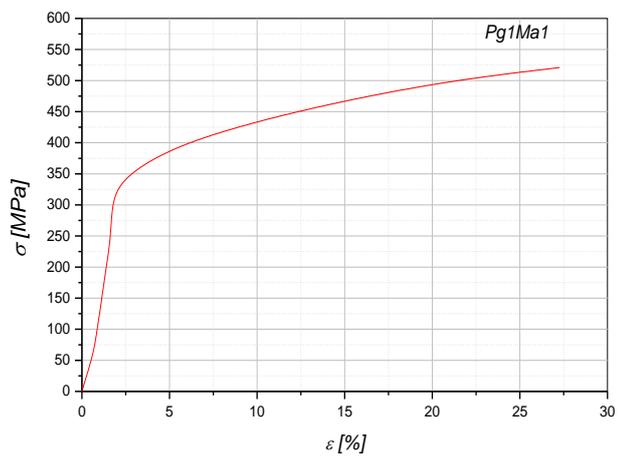
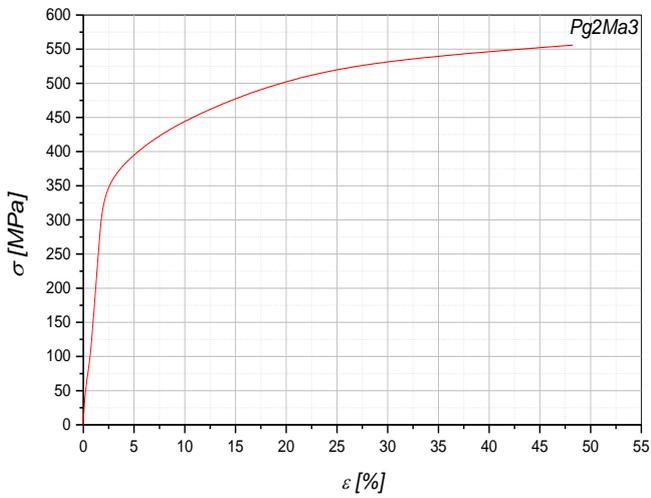


FIGURE III-3-c : Résultats Epreuve PG1MA1



$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]
0	0	1,74	300
0,1	33	2,09	333
0,35	66	2,97	366
0,69	100	5,24	400
0,87	133	8,39	433
1,05	166	12,93	466
1,22	200	18,88	500
1,39	233	28,14	533
1,57	266	48,25	556

FIGURE III-3-d : Résultats Eprouvette PG2MA3

$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]
0	0	2,09	300
0,35	33	2,44	333
0,69	66	3,14	366
0,87	100	5,24	400
1,22	133	8,74	433
1,39	166	13,28	466
1,57	200	17,48	500
1,74	233	29,37	533
1,92	266	41,95	553

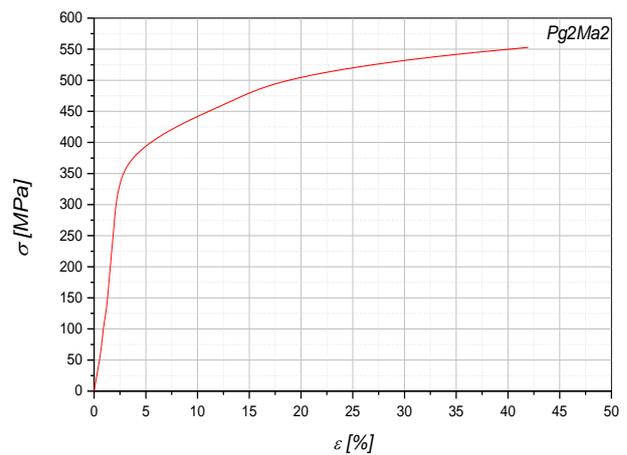
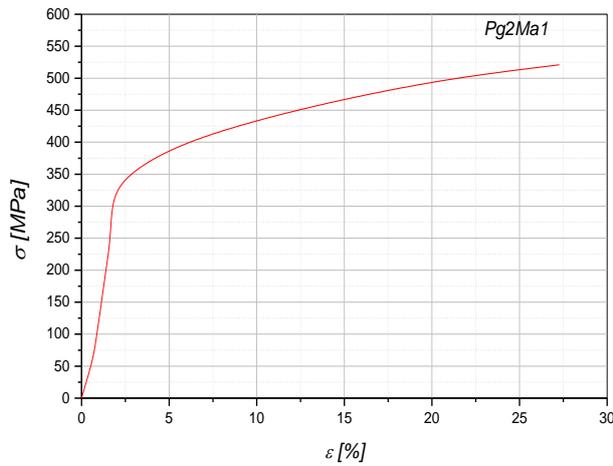


FIGURE III-3-e : Résultats Eprouvette PG2MA2



$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	$\sigma$ [MPa]
0	0	1,74	300
0,35	33	2,09	333
0,69	66	3,49	366
0,87	100	5,94	400
1,05	133	9,79	433
1,22	166	14,68	466
1,39	200	20,97	500
1,57	233	27,27	521
1,67	266		

FIGURE III-3-f : Résultats Eprouvette PG2MA1

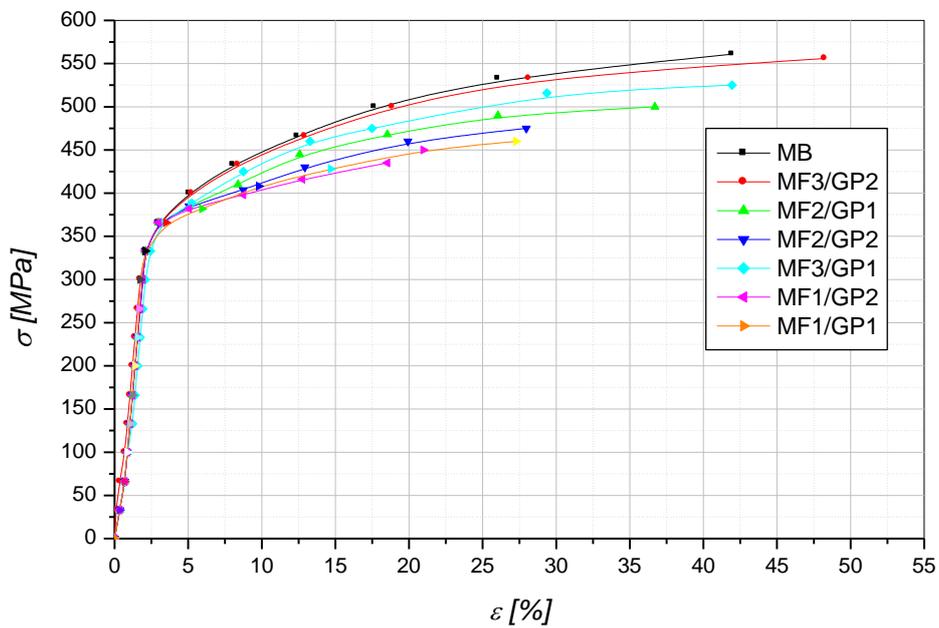


Figure III-3: Courbe rationnelle de traction des différentes éprouvettes.

La résistance à la traction obtenue ( $530 \text{ N/mm}^2$ ) est néanmoins supérieure à la résistance à la traction minimale garantie par les fournisseurs ( $485 \text{ N/mm}^2$ ). Nous constatons que toutes les valeurs de la limite apparente d'élasticité et de la résistance à la traction sont supérieures aux valeurs minimales garanties. Les joints soudés avec le métal d'apport exempt de ferrite sont peu ductiles ( $A=20\%$ ). L'addition de ferrite augmente d'une manière notable la ductilité des soudures. La protection au Gaz Hélium donne de meilleures caractéristiques mécaniques que la protection à l'argon, et ceci quel que soit le métal d'apport.

- ◆ La ferrite augmente la ductilité et la résistance à la traction des joints soudés.
- ◆ Les joints soudés austéno-ferritiques sont peu sensibles à l'effet d'entaille et à la fissuration.
- ◆ Les joints soudés entièrement austénitiques sont peu ductiles.
- ◆ Les caractéristiques mécaniques des soudures réalisées avec le fil d'apport 20/10/SG chutent moins vite que pour les autres fils d'apport.

A la vue des résultats obtenus lors des essais de traction, nous optons pour l'utilisation de la Protection au Gaz Hélium avec le Métal d'apport 20/10/SG.

#### **III-4-3- Essai de dureté (Hv) :**

Des examens métallographiques et mesures de dureté ont été effectués à l'aide d'un appareil de type SHINADZU (JIS-HMV-2251) pour déterminer le taux de dilution et déterminer un profil de dureté dans le cordon de soudure. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III-4).

Ces essais de dureté ont pour but de déterminer si la filiation de dureté dans les joints soudée est régulière ou au contraire elle présente des durcissements.

Les mesures obtenues présentent des durcissements dans les éprouvettes soudées avec le métal d'apport exempt de ferrite, par contre dans les autres cas la filiation de dureté est régulière, en particulier dans les éprouvettes soudées avec le métal d'apport 20/10/SG associé au gaz d'Hélium car il présente un  $\Delta H_v$  min recommandée.

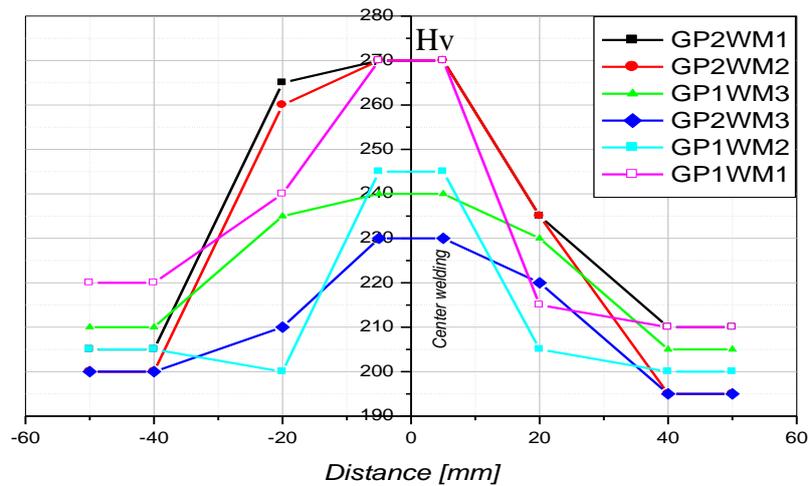


Figure III-4: Evolution de la dureté dans les trois zones de la soudure.

#### III-4-4- Essai de résilience :

Pour les essais de résilience, des éprouvettes Charpy ont été utilisées, voir figure (III-5). La position du prélèvement (norme NF 89-202) est indiquée à la figure (III-6). Cette position est la plus courante car elle permet de tenir compte d'une certaine façon des variations des caractéristiques dans le joint de soudure.

En comparant les résultats présentés dans la figure (III-7), soit les valeurs mesurées, leur variation sur une gamme température, la forme des courbes de transition évaluées pour les types d'éprouvettes testées et les valeurs minimales d'énergie de rupture, les conclusions suivantes peuvent être tirées

⇒ Les résiliences les plus faibles correspondent aux éprouvettes soudées avec un métal d'apport présentant un taux faible de ferrite, ceci quelle que soit la variation de température.

⇒ La résilience semble augmenter avec le taux de ferrite présent dans le joint soudé, surtout pour les faibles températures.

⇒ La comparaison entre les valeurs mesurées avec celles exigées selon [41] [43], montre que les résultats sont très bons avec le métal d'apport présentant un taux élevé de ferrite et cela quelque soit

la protection gazeuse employé, même si l'hélium donne meilleur résultats pour des basses températures.

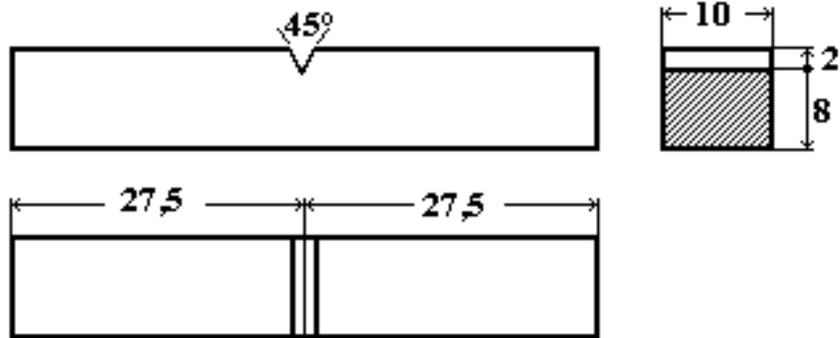


Figure III-C-5: Eprovettes Charpy utilisées.

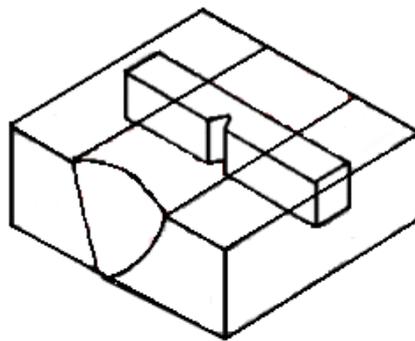


Figure III-6: Position de prélèvement des éprovettes Charpy.

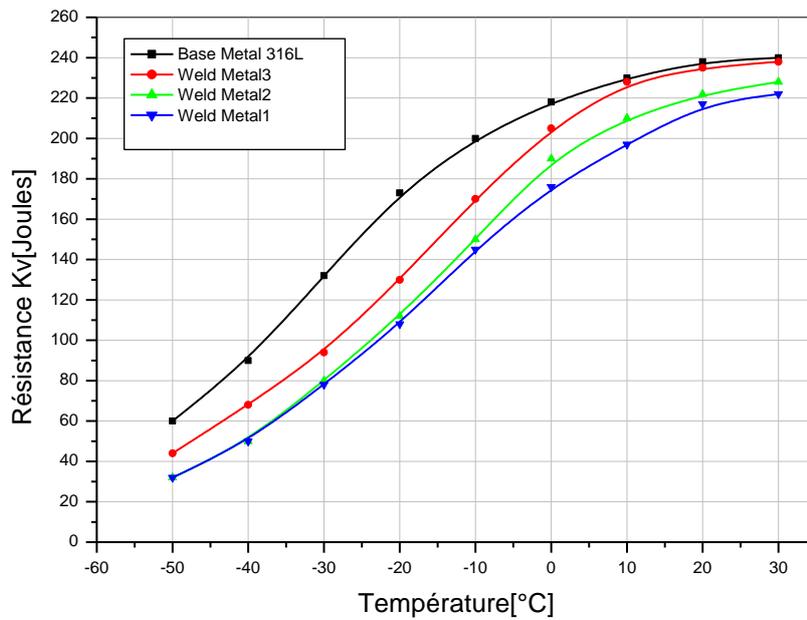


Figure III-7: Représentation de la résilience en fonction de la température.

**III-4-5- Essai de ténacité :**

Les essais sont réalisés sur une machine d'essai servohydraulique ayant une capacité maximal de 100 kN, piloté en asservissement de position (dispositif de montage). Le pilotage de la machine et l'acquisition des données sont effectués par un microordinateur en utilisant le programme (Instron Fast Track  $K_{IC}$ ). La capacité limitée des machines nous a imposé d'utiliser des éprouvettes de type SENB modifiée BxB (figure III-9). Les tailles des différentes éprouvettes ont été choisies conformément à la norme BS 7448 . La dimension B correspond donc à l'épaisseur de la plaque soudée. Sur ces éprouvettes, des mesures de  $K_{IC}$ , ont été effectués.

La plage de températures des essais devait permettre d'obtenir des mesures de la ténacité du palier inférieur jusqu'au début de la courbe de transition. Pour chaque température et chaque zone, quatre essais ont été effectués, seulement sur le type d'éprouvette donnant les meilleurs résultats pour les essais mécaniques déjà effectués, soit (Ma3/Pg2). La figure (III-10), présente les résultats des essais de résilience effectués.

Ces courbes ont été obtenues par l'introduction d'un facteur d'incertitude (distribué selon une loi de distribution de Weibull, loi du minimum) dans la corrélation de Wallin [44]. Les valeurs de ténacité qui se trouvent au-dessous de la courbe de probabilité selon Wallin proviennent, pour les zones MB et ZAT, pour la zone MF, des mesures directes de ténacité  $K_{IC}(J)$ . Seules les mesures dans cette zone sont effectivement très basses. Sinon, les estimations de la ténacité minimales, assez basses vu les valeurs de résilience parfois très faibles, sont conservatrices. Néanmoins, les paramètres utilisés par Wallin pour la loi de distribution de Weibull paraissent raisonnables.

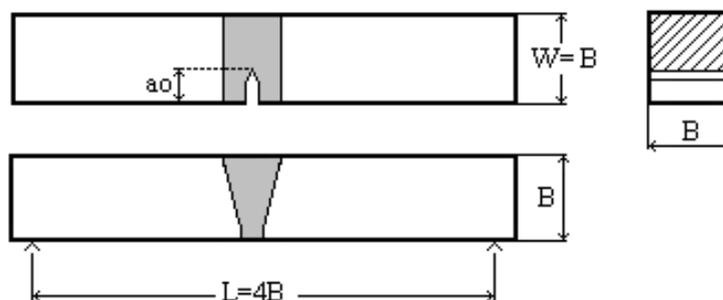
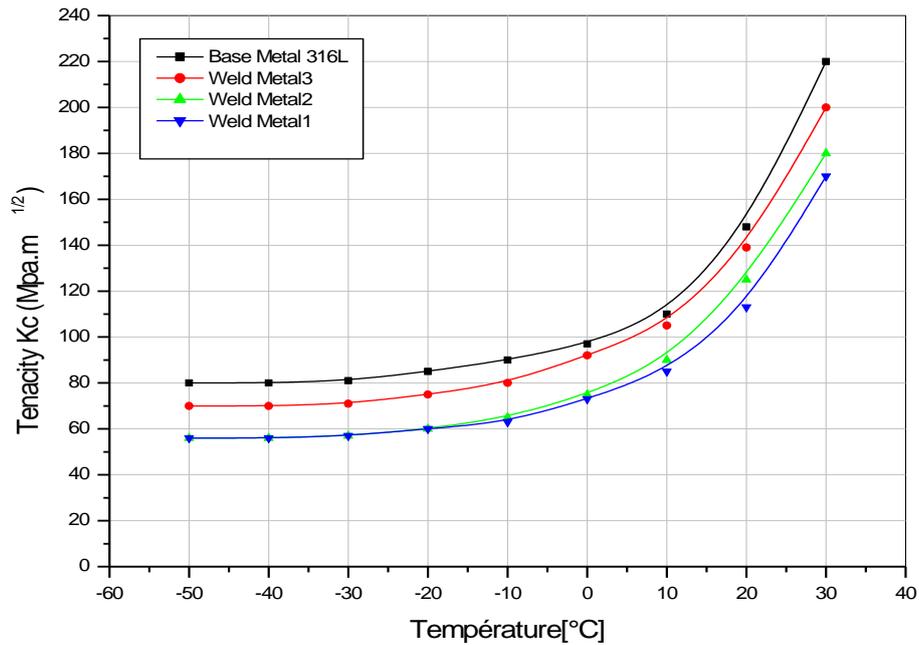


figure III-C-9 : Les tailles des différentes éprouvettes



**Figure III-C-10:** Evolution de la ténacité en fonction de la température.

Des investigations expérimentales effectuées pour étudier l'influence des conditions de soudage sur le comportement mécanique global d'un joint de soudure en acier inoxydable austénitique 316L, réalisé par le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gaz), les conclusions suivantes ont été tirées.

⇒ Les essais de tractions ont permis d'établir que les meilleures résistances à la traction et présentant une bonne ductilité sont obtenues en associant : le métal d'apport contenant 35 à 60 % de ferrite et une protection gazeuse Helium, soit (20/10/SG/Helium)

⇒ Les contrôles métallographiques, dureté et résilience ont permis d'établir que les joints soudés les plus résistants sont obtenus en associant : (Le métal d'apport contenant un taux élevé de ferrite et une protection gazeuse Helium).

**III-4 : CONCLUSION :**

Les résultats obtenus indiquent que des paramètres de soudage optimisés sont essentiels pour obtenir un joint de haute qualité avec des propriétés mécaniques désirées. Par exemple, un courant trop élevé peut entraîner une surchauffe et une déformation excessive, tandis qu'un courant trop faible peut provoquer des défauts de fusion. De même, la vitesse de soudage et la protection gazeuse doivent être soigneusement contrôlées pour éviter les inclusions et les fissurations.

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance d'une maîtrise précise des conditions de soudage pour garantir la performance mécanique optimale des joints soudés en acier inoxydable austénitique 316L. Les connaissances acquises grâce à ces investigations permettent non seulement d'améliorer les pratiques de soudage actuelles mais aussi de développer de nouvelles approches pour des applications industrielles exigeantes, où la fiabilité et la durabilité des joints soudés sont primordiales. En fin de compte, une compréhension approfondie des interactions entre les paramètres de soudage et le comportement mécanique des joints est indispensable pour l'avancement de la technologie de soudage.

### CONCLUSION GENERALE

Cette étude sur la déchirure de l'acier au carbone manganèse (nuance A48-AP), qui repose sur une grande base de données expérimentale, a permis d'obtenir des résultats intéressants aussi bien en expérimentation qu'en modélisation.

Ce travail a permis d'étudier les différents paramètres (liés aux caractéristiques mécaniques des matériaux, à la géométrie du joint soudé et à la géométrie de l'éprouvette) qui interviennent en même temps, pour expliquer les phénomènes de la déchirure ductile et apporter une contribution à l'étude de cette déchirure ductile dans un joint soudé afin de développer une méthode d'analyse, adaptée à ce type de jonction.

L'étude expérimentale nous a permis de déterminer expérimentalement les caractéristiques mécaniques, ainsi que les résistances à la déchirure ductile à la température ambiante, du métal de base (MB), métal fondu (MF) et de la zone affectée thermiquement (ZAT) prélevés à partir d'un joint soudé réalisé dans des conditions représentatives des fabrications industrielles. Cette partie conduit aux conclusions suivantes :

#### *1<sup>er</sup> Partie : Déchirure ductile :*

- Les valeurs les plus faibles du paramètre  $J_{0,2}$  obtenues sont observées pour les éprouvettes dont la fissure est en ZAT, 38 kJ/m<sup>2</sup>. Par contre les valeurs les plus élevées sont observées pour les éprouvettes dont la fissure est en métal fondu MF, 125 kJ/m<sup>2</sup>. On constate alors que la ténacité est trois fois plus importante que dans le cas de la ZAT. Le métal de base présente une ténacité, exprimée par  $J_{0,2}$  d'environ 80 kJ/m<sup>2</sup>.
- Une instabilité plastique limitée se produisant après le maximum de la courbe de chargement pour le cas de la zone affectée thermiquement (ZAT) ce qui justifier l'absence du palier ductile d'ou l'existence d'une forte hétérogénéité structurale, ce qui conduit à des caractéristiques de rupture fragile.

### ***2<sup>ème</sup> Partie : Fatigue de la structure soudée :***

Dans cette partie nous avons montré que la résistance à la fatigue des joints soudés ne dépend pas seulement des propriétés du métal de base et du métal d'apport employé, mais aussi de la présence de défauts géométriques de surface ou de défauts internes (soufflures, manques de pénétration). Nous avons constaté qu'à partir de ces propriétés le stade d'amorçage de la fissure de fatigue peut être réduit et qu'en conséquence une grande partie de la vie des assemblages soudés sollicités en fatigue se déroule en propagation.

A même niveau de  $\Delta K$ , on observe généralement une vitesse de fissuration  $da/dN$ , inférieur dans la ZAT à celle du métal de base MB qui est inférieur à celle du métal fondu. Cependant, l'écart entre ces vitesses diminue lorsque  $\Delta K$  augmente. Aucune déviation de la fissure de son axe de propagation n'est remarquée. L'évolution de l'énergie hystérétique  $Q$  dissipée pendant un cycle en fonction de  $\Delta K$  pour un rapport de charge  $R=0,1$  et dans les trois zones étudiées (MB – ZAT – MF). Cette énergie  $Q$  augmente quand  $\Delta K$  augmente pour les trois zones étudiées. Et l'évolution de l'énergie spécifique dépensée par cycle  $U$  en fonction de  $\Delta K$  pour le même rapport de charge est constante par rapport à  $\Delta K$  pour les différentes zones du joint de soudure étudié avec des valeurs moyennes de :

- $1,81E10^6$  pour le métal de base (MB)
- $3,34 E10^6$  pour la zone affectée thermiquement (ZAT)
- $5,67 E10^6$  pour le métal fondu (MF).

### ***3<sup>ème</sup> Partie : Etude de l'acier Inoxydable Austénitique 316L :***

Pour le soudage TIG, il est souhaitable que les aciers inoxydables austénitiques 316L contiennent un taux de chrome légèrement plus élevé et un taux de nickel légèrement plus faible afin qu'une fraction de ferrite soit stabilisée lors de la solidification, la solution adéquate serait l'utilisation du métal d'apport dont les caractéristiques mécaniques se rapprocheraient au mieux du milieu de la bande de dispersion des propriétés mécaniques du métal de base et qui présente un dépôt

austénitique avec environ 18% de ferrite. Si le taux de dilution est de 58%, lors de la réalisation de la soudure, la structure de celle-ci aura une teneur en ferrite d'environ 15%. Ce joint austénito-ferritique présente une bonne résistance et une bonne tenue à la corrosion intercrystalline.

Les observations faites ainsi que les résultats des différents essais mécaniques ont été alors été corrélés de façon à proposer, pour le soudage des aciers inoxydables austénitiques 316L contiennent un taux de chrome légèrement plus élevé et un taux de nickel légèrement plus faible afin qu'une fraction de ferrite soit stabilisée lors de la solidification, l'utilisation de la combinaison métal fondu contenant un taux supérieur à 30% de ferrite associé à l'Hélium comme gaz de protection. Le joint de soudure obtenu est austéno-ferritique, donnant une structure avec une teneur en ferrite adéquate de 15%, ce qui conduit à des caractéristiques mécaniques recherchées, se rapprochant au mieux du milieu de la bande de dispersion du métal de base.

La modélisation numérique a mis en évidence la complexité de la caractérisation de la déchirure ductile dans le cas des joints soudés. Néanmoins, ce travail nous a permis de tirer plusieurs conclusions générales :

- Les caractéristiques mécaniques du métal de base, dans le cas d'un taux d'overmatching important, ont un effet prépondérant sur le comportement global de ce type de structures (les évolutions de la charge, de l'intégrale J, du CTOD, des zones plastiques, ...).
- Le taux de croissance des cavités  $R/R_0$  est sensible à tout changement dans les champs des contraintes et des déformations au fond de la fissure. L'approche locale semble être une alternative valable pour l'étude de la déchirure ductile dans le cas des joints soudés. Cette approche nécessite une modélisation prenant en considération l'hétérogénéité de la structure : configuration bimétal et trimétal, ce qui conduit à la prédiction de la direction de propagation de la fissure.

## Les Références Bibliographiques

- [1]. Cazes. Procédés de soudage (principes généraux et critères de choix). Technique d'ingénieur, (B 7 700), 1995.
- [2] A. Michel. Pièces mécaniques soudées (rappels et définitions). Technique d'ingénieur, (BM 5 185), 2006.
- [3] S. Belakhowsky. Théorie et pratique du soudage. PYC-Edition Paris, 1973.
- [4] Chehaïbou, A., 2004. Soudage laser : les bénéfices des procédés hybrides, Soudage et techniques connexes P33-38.
- [5] Roland, C., Ingénieur de l'École supérieure d'électricité ex-Directeur des recherches, Société Sciaky.
- [6] Blais, L., 2006. "Introduction au soudage laser" ; Centre spécialisé de technologie physique du Québec Inc
- [7] Air Liquide Welding. Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG. SAF, 2002.
- [8] D. Erlandsson. Les fondamentaux du procédé MIG/MAG, Soudage - MIG/MAG. ESAB Welding Equipment, 2007.
- [9] H. Springer. A. Kostka. E.J. Payton. D. Raabe. A. Kaysser-Pyzalla. G. Eggeler. On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys. *Acta Materialia*, (59) :1586–1600, 2011.
- [10] Soudage et coupage au chalumeau. Conseils d'utilisation. Edition INRS ED 742. 2000.
- [11] Ensam Angers, C.E.R., Soudage à l'arc, -Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; [www.angers.ensam.fr](http://www.angers.ensam.fr).
- [12] K. Bouché. F. Barbier. A. Coulet. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. *Materials Science and Engineering*, (A249) :167–175, 1998.
- [13] D. Phelan. B. Jiang Xu. R. Dippenaar. Formation of intermetallic phases on 55 wt.% al-zn-si hot dip strip. *Materials Science and Engineering*, (A420) :144–149, 2006.
- [14] Apfel, A. 2005. Modélisation de l'orientation cristalline des soudures multi-passes en acier inoxydable austénitique: application au contrôle non destructif ultrasonore (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 2012)
- [15] Rehouma, K., 2013. Comportement structural et mécanique de soudures d'acier

inoxydable austénitique du type 316l vieilles. Diss. Ecole nationale polytechnique d'Alger.

[16] Amaouche, S., 2012. Caractérisation d'une soudure hétérogène réalisée par le procédé MAG (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[17] L.LAICHE, Etude mécanique et métallurgique dans les joints de soudure sur le monobloc des pelles 9210 et 9211, thèse de magister, Université de BATNA, Juillet 1998

[18] C.CHAUSSIN, Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques Dunod 1981

[19] Amar Bakdid Bachir El Kihel Technique de Contrôle de la Soudure par la Méthode d'Ultrason Multi-éléments HAL Id: hal-01260805 <https://hal.science/hal-01260805> Submitted on 3] BAUDOT ALICE, Titre : Etude et mise au point de méthodes de mesures non destructives,

[20] Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille.

[21] BOURAS RACHID, Chapitre 1, Contrôle non destructif. 2013

[22] GULLO GIUSEPPE, Hecv-Sante, Thème : L'onde ultrasonores Propriétés physique sémiologie et artefacts, 2007. 22 Jan 2016

[23] L'émission acoustique, cours de contrôle et d'inspection des constructions soudées, Institut de

Soudure, ESSA 1984.

[24] Manuel pour l'examen par ultrasons des soudures, Institut international de la soudure, Publications de la soudure Autogène, 1978.

[25] Contrôle des constructions soudées, contrôle par ultrasons, Institut de soudure, ESSA, 1983.

[26] Le contrôle non destructif et la contrôlabilité des matériaux et structures, Gilles Corneloup, Cécile Gueudré ; Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2016.

[27] Guide ultrasons multiéléments, Principes et applications pour le contrôle non destructif,

François Berthelot – Benoit Dupont, 2013.

[28] Contrôle non destructif (CND) Jacques Dumont-Fillon, Techniques de l'Ingénieur, Traité

[29] Mesure et Contrôle Tsao, C. C., et H. Hocheng. 2004. « Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material ». International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, no 10, p. 1085-1090.

[30] Venkat, Ramanan Sridaran, Andrey Bulavinov, Sergey Pudovikov, Christian Boller et

[31] Thomas Wenzel. 2010. « Quantitative Non-destructive Evaluation of CFRP Components by Sampling Phased Array ». In 2nd International Symposium on NDT in Aerospace. (Hambourg, Allemagne, 22-24 novembre 2010). <<http://www.ndt.net/article/aero2010/papers/mo4a4.pdf>>.

[32] Viens, Martin. 2009a. Essais mécaniques et contrôle non destructif : Notes du cours MEC-761. Chapitre 5 : Ultrasons. Programme en génie mécanique. Montréal : École de Technologie Supérieure, 99 p.

[33] Alain Iost, Régis Bigot et Laurent Bourdeau L'essai de dureté Vickers : Application et influence de la charge Matériaux & Techniques Vol83, 2017

[34] H. Jolivet et G. Vidal Valeur de l'essai de résilience pour l'étude de la fragilité de revenu Rev. Met. Paris, Vol. 41, N°11 (Novembre 1944), pp. 378–388

[35] Matériaux métalliques - Essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy -. Cette norme européenne est basée sur les normes internationales ISO 83 et ISO 148. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-100451/materiaux-metalliques-essai-de-flexion-par-choc-sur-eprouvette-charpy-parti/fa035741/49827>

[36] J. Q. Zhao, L. Daigle, D. Beaulieu, Effect of joint contamination on the quality of butt-fused HDPE pipe joints, NRCC-45337, Canadian J. of Civil Eng., 29 (5)

2002, 787-798.

[37] H. Chen, R. J. Scavuzzo, T. S. Srivatsan, Influence of joining on the fatigue and fracture behavior of high density polyethylene pipe, J. Mater. Eng. & Performance, 1997, 6 (4), 473-480

- [38] D. R. de Courcy, J. R. Atkinson, The use of tensile tests to determine the optimum conditions for butt welding polyethylene pipes of different melt flow index, *J. of Mater. Sci.*, 1977, 12 (8), 1535-1551
- [39] ISO 12176-1:2006, Plastics pipes and fittings - Equipment for fusion jointing polyethylene systems - Part1: Butt fusion. (2006)
- [40] S. NIOU 1, S. AZZOUZ 1, K. CHAOUI 1 Développement d'une méthode pour caractériser la résistance mécanique circonférentielle d'un joint de tube plastique soudé bout-à-bout 1 LR3MI, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba 23000, Algérie.
- [41] **Kikukawa**, S Hosaka, R Imura Silicon *pn* junction imaging and characterizations using sensitivity enhanced Kelvin probe force microscope *Appl. Phys. Lett.* 66, 3510–3512 (1995)  
<https://doi.org/10.1063/1.11378>
- [42] BS Murty, S Ranganathan - Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling International materials reviews, 1998 - Taylor & Francis
- [43] M Benguediab, COMPORTEMENT EN FATIGUE D'ASSEMBLAGES SOUDES EN ACIER A48AP The 3rd International Conference on welding, nondestructive testing and the industry of materials and alloys (ICWINDT-MI'12)2012
- [44] J Wallin Measuring innovation capability—assessing collaborative performance in product-service system innovation conference paper pp207 pp 212 2011