

République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur  
& de la recherche scientifique



**Université de Blida**  
**Faculté de science de l'ingénieur**  
**Département de mécanique**



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de master  
En mécanique  
Option : Matériaux et traitement des surfaces

### THEME

**L'influence des traitements thermiques post-  
chauffage sur la structure et les propriétés  
mécaniques d'une soudure.**

Proposé et dirigé par :

M<sup>me</sup> N. Hamedi Boudina

réalisé par :

Chebouki Abdellah

Promotion:2014

# ***Remerciements***

*Je remercie tout d'abord Allah le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage afin de réaliser ce modeste travail...*

*J'exprime toute ma gratitude à l'ensemble du département de Génie Mécanique de l'université Saad Dahleb de Blida, à leur tête ma promotrice Mme. N.BOUDINA pour m'avoir pris en charge et pour m'avoir confié un travail aussi intéressant et pour ses conseils et ses encouragements qui m'a permis de faire mener à bien ce travail de mémoire pour l'obtention le diplôme de Master...*

*Je n'oublie de remercier tous les enseignants de Département de Mécanique, spécialité matériaux et traitements de surfaces, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation...*

*J'aurais une pensée toute particulière pour ma chère famille dont le soutien m'a été précieux...*

*Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouve ici l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude.*

# ***Dédicaces***

*A la personne la plus chère maman au monde qui par sa douceur et son amour sans limite est donnée pour l'éducation de ses enfants et qui sans elle je ne serai jamais devenue ce que je suis...*

*A mon père qui, par ses conseils judicieux ses encouragements et sa tendresse m'a mené sur le chemin de la réussite. Qu'il trouve dans ce travail, une bonne mince récompense...*

*A mes frères et mes sœurs...*

*A tous mes collègues...*

*A tous mes amis...*

*Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment, ou qu'ils soient...*

***Abdellah***

# SOMMAIRE

---

TABLE DES MATIERES.

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATION.

INTRODUCTION .....	1
<b>I Le soudage</b> .....	<b>2</b>
I.1 Généralités.....	2
I.2 Les procédés de soudage à l'arc.....	3
I.2.1 Le soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	3
I.2.2 Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène (GTAW).....	5
I.2.3 Le soudage à l'arc submergé sous flux solide (SAW).....	6
I.3 Soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil fusible (GMAW).....	6
I.3.1 Introduction.....	6
I.3.2 Principe du soudage MIG.....	7
I.3.3 L'arc de soudage MIG.....	8
I.3.4 Le transfert du métal.....	8
I.3.4.1 Le transfert d'arc par court-circuit.....	8
I.3.4.2 Le transfert en pulvérisation axiale.....	9
I.3.4.3 Le soudage par transfert globulaire.....	9
I.3.5 les Consommables.....	10
I.3.5.1 Le fil plein.....	10
I.3.5.2 Le fil fourré.....	10
I.3.6 Le gaz de protection.....	11

# SOMMAIRE

---

I.3.6.1 Argon (Ar).....	11
I.3.6.2 Hélium (He).....	11
I.3.6.3 Hydrogène (H2).....	11
I.3.6.4 Oxygène (O2).....	12
I.3.6.5 Azote (N2).....	12
I.3.7 Eléments constitutifs d'un poste de soudage.....	12
I.3.7.1 Le générateur.....	12
I.3.7.2 Le fil.....	12
I.3.7.3 Le dévidage.....	13
I.3.7.4 Le Pistolet de soudage.....	13
I.3.7.5 Le manodétendeur-débitmètre.....	14
I.3.8 Domaine d'utilisation.....	14
I.3.9 Avantages et inconvénients du procédé.....	15
I.3.10 La soudabilité des aciers au carbone.....	15
I.3.10.1 La température de préchauffage et notion de carbone équivalent.....	15
<b>II Les défauts de soudage.....</b>	<b>16</b>
II.1 Introduction.....	16
II.2 Le Manque de fusion (collage).....	16
II.3 Le Manque de pénétration.....	17
II.4 La Fissuration à froid.....	18
II.5 La Fissuration à chaud.....	18
II.6 Les inclusions solides ou de laitier.....	19

# SOMMAIRE

---

II.7 Les porosités.....	20
II.8 Les retassures et criques de solidification.....	20
II.9 Les morsures et caniveaux.....	21
II.10 Débordements du cordon.....	21
II.11 Les soudures concaves et convexes.....	22
II.12 Désalignement.....	22
II.13 Les contraintes résiduelles.....	23
<b>III Les contrôles non destructifs.....</b>	<b>24</b>
III.1 Introduction.....	24
III.2 Les différents procédés de contrôle non destructif.....	24
. III.2.1 Le contrôle par examen visuel.....	24
III.2.2 Le contrôle par ressuage.....	25
III.2.3 Le contrôle par courants de Foucault.....	26
III.2.4 Le contrôle par ultrasons.....	27
III.2.5 Le contrôle par magnétoscopie.....	28
III.3 Le contrôle par radiographie (rayon x).....	29
III.3.1 Principe.....	29
III.3.2 La nature des rayonnements ionisants.....	30
III.3.3 Propagation, interaction avec la matière.....	31
III.3.4 Matériels utilisés.....	31
III.3.4.1 Les tubes à rayons X.....	31
III.3.4.2 Le film radiographique.....	33
III.3.4.3 La cassette de film.....	34

# SOMMAIRE

---

III.3.5 Domaines d'application .....	34
<b>IV Les techniques expérimentales.....</b>	<b>35</b>
IV.1 Introduction.....	35
IV.2 Matériau de base.....	35
IV.3 Présentation de l'acier xc 10.....	35
IV.4 Présentation du métal d'apport.....	36
IV.5 Préparation des échantillons pour le soudage.....	36
IV.5.1 Etape de coupe des tôles.....	36
IV.5.2 Réalisation du chanfrein.....	36
IV.5.3 Le préchauffage.....	<b>36</b>
IV.5.4 Les paramètres de soudage.....	38
IV.5.5 Exécution du soudage.....	39
IV.6. Examen macrographique .....	39
IV.6.1 Examens Métallographique .....	40
IV.6.1.2 Découpage des échantillons.....	40
IV.6.1.3 Enrobage.....	40
IV.6.1.4 Le polissage.....	<b>41</b>
IV.6.1.5 Le polissage de finition.....	41
IV.6.1.6 L'attaque chimique.....	42
IV.6.1.7 Observation microscopique.....	42
IV.7 Méthodes d'essais mécaniques.....	43
IV.7.1 Essai de traction.....	43

## SOMMAIRE

---

IV.7.2 Essai de la microdureté.....	44
IV.7.3 Le contrôle par radiographie x.....	45
<b>V Résultats et interprétations.....</b>	<b>46</b>
V.1 Introduction.....	46
V.2 composition chimique du métal de base.....	46
V.3 Examen macrographique .....	46
V.4 Examen micrographique .....	49
V.3 Essai de microdureté.....	50
V.4 Essai de traction.....	50
V.5 Radiographie par rayon x.....	57
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>59</b>



## Liste des Figures et Tableaux

---

Figure I .1 : les différentes zones d'une soudure.....	3
Figure I .2 : Procédé de soudage avec électrode enrobée.....	4
Figure I .3 :procèdè de soudage TIG.....	5
Figure I .4 : procède de soudage à l'arc sous flux solide.....	6
Figure I .5 :principe de soudage MIG/MA.....	7
Figure I .6 : transfert par court-circuit.....	8
Figure I .7 : Transfert par pulvérisation axiale.....	9
Figure I .8 : Transfert globulaire.....	10
Figure I .9 : Coupe transversale d'un fil plein et d'un fil fourré.....	10
Figure I .10 : Système de dévidage.....	13
Figure I .11 : Pistolet de soudage.....	14
Figure II. 1 : manque de fusion en bord de chanfrein et sous cordon.....	17
Figure II. 2 : manque de pénétration.....	17
Figure II. 3 : fissure à froid détecté en macrographie.....	18
Figure II. 4 : fissure de solidification (fissure à chaud).....	19
Figure II.5 : inclusions de laitier décelées par radiographie.....	19
Figure II.6 : macrographie d'une soudure avec porosités.....	20
Figure II.7 : retassures.....	20
Figure II. 8 : caniveaux.....	21
Figure II. 9 : débordement du cordon.....	21
Figure II. 10 : Convexité et concavité d'un joint soudé.....	22
Figure II. 11 : désalignement.....	22
Figure III. 1 : calibres utilisés pour vérifier les soudures d'angles convexes ou concaves d'une soudure.....	25
Figure III. 2 : Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant prémulsifié.....	26
Figure III. 3: Principe de la détection par courants de Foucault.....	27
Figure III. 4 : Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide.....	28
Figure III. 5 : un champ magnétique est créé près d'une soudure par le passage, au travers de la soudure, d'un courant électrique allant d'une touche à l'autre.....	29
Figure III. 6 : variation du coefficient d'absorption.....	30
Figure III. 7 : spectre émis par un générateur de rayon x en fonction de la tension d'accélération $V_0$ .....	30
Figure III. 8 : schéma principe rayon x.....	32

## Liste des Figures et Tableaux

---

Figure III. 9 : types de tubes à rayon x.....	33
Figure III. 10 : film radiographique.....	34
Figure IV. 1 : thermomètre infrarouge Entreprise Moussaoui/hallouaya.....	37
Figure IV. 2 : fiche de soudage des tôles .....	38
Figure IV. 3 : les tôles soudés.....	39
Figure IV. 4 : Enrobeuse STREURS.....	40
Figure IV. 5 : polisseuse.....	41
Figure IV. 6 : polisseuse de finition.....	41
Figure IV. 7 : Microscope optique Carl Zeiss.....	42
Figure IV. 8 : Dimensions de l'éprouvette de traction selon ASTM A 370.....	43
Figure IV. 9 : machine hydraulique de traction.....	44
Figure IV. 10 : filiation de micro-dureté.....	44
Figure IV.11 : <b>CDTA</b> (centre de développement des technologies avancées de Baba Hassen micro-duromètre.....	45
Figure V. 1 : Micrographie d'échantillon non préchauffé.....	47
Figure V. 2 : Micrographie d'échantillon préchauffé.....	48
Figure V. 3 : macrographie de la soudure de l'échantillon non préchauffé.....	49
Figure V. 4 : macrographie de la soudure de l'échantillon préchauffé.....	49
Figure V. 5 : Evolution de la micro-dureté en fonction de déplacement.....	50
Figure V. 6 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette non préchauffé NP1.....	51
Figure V. 7 : l'éprouvette non préchauffé NP 1 après rupture.....	51
Figure V. 8 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette non préchauffé NP2.....	52
Figure V. 9 : l'éprouvette non préchauffé NP2 après rupture.....	52
Figure V. 10 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette préchauffé P1.....	53
Figure V. 11 : l'éprouvette préchauffé P1 après rupture.....	53
Figure V. 12 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette préchauffé P2.....	54
Figure V. 13 : l'éprouvette préchauffée P° 2 après rupture.....	54

## Liste des Figures et Tableaux

---

Figure V. 14 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette préchauffé P3.....	55
Figure V. 15 : l'éprouvette préchauffée P3 après rupture.....	55
Figure V. 16 : Image radiographique de l'échantillon non préchauffé.....	57
Figure V. 17 : Image radiographique de l'échantillon préchauffé.....	57
Tableau IV. 1 : caractéristiques mécaniques de l'acier XC38.....	35
Tableau IV. 2: caractéristiques mécaniques de l'acier XC 10.....	35
Tableau IV. 3 : composition chimique du métal d'apport.....	36
Tableau V. 1 résultats de l'essai de traction.....	56

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

---

Z.F : zone fondue.

Z.A.T : zone affectée thermiquement.

M.B : métal de base.

SMAW : Shielded metal arc welding.

° C : degré Celsius.

Fe : fer.

O : oxygène.

Ca : calcium.

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone.

Si : silicium.

Mn : manganèse.

Mg : Magnésium.

O<sub>3</sub> : trioxygène.

GTAW : Gas tungsten arc welding.

SAW : submerged arc welding.

GMAW : gas metal arc welding.

MIG : metal inert gas.

MAG : metal active gaz.

t : temps.

V : volt.

U : tension de courant.

Hz : hertz.

m : mètre.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

---

min : minute.

% : pourcent.

mm : millimètre.

Kg : kilogramme.

Ar : argon.

He : hélium.

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone.

H<sub>2</sub> : Hydrogène.

N<sub>2</sub> : Azote.

I : intensité du courant.

CND : Contrôle non destructifs.

LOF : Lack of fusion : manque de fusion.

LOP : Lack of penetration : manque de pénétration.

TIG : tungstène inerte gas.

KHz : kilo hertz.

MHz : méga hertz.

V<sub>0</sub> : vitesse initiale.

λ<sub>L</sub> : longueur d'onde.

KV : kilovolt.

Nm : nanomètre.

EV : l'électronvolt.

KeV : kilo électronvolt.

Pm : pico mètre.

E : module de Yong.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

---

$v$  : fréquence de l'onde.

$h$  : constante de Planck.

exp : exponentiel.

XC : nuance de l'acier ordinaire non allié.

C : carbone.

Mo : molybdène.

Ni : nickel.

Cr : chrome.

P : phosphore.

S : soufre.

Mpa : méga pascal.

Rm : résistance à la traction.

R<sub>0,2</sub> : limite élastique.

A : allongement.

KUC : unité de résilience.

J : joule.

Cm : centimètre.

Ceq : carbone équivalent.

e : épaisseur.

HNO<sub>3</sub> : acide nitrique.

ASTM : American Society for the Testing of Materials.

## Introduction générale

---

Dans la construction métallique les techniques d'assemblages sont en continuelle évolution car la qualité des soudures n'est pas toujours celle que l'on attend, la recherche est souvent orientée vers la découverte des méthodes permettant de diminuer les défauts présents dans une soudure en conciliant la technologie et l'économie puisque les opérations de soudage coutent souvent cher.

Parmi les méthodes utilisées les traitements thermiques sont toujours un choix nécessaire pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux et augmenter leur performance.

Notre étude au départ était orientée vers l'influence des traitements thermiques post chauffage sur la structure et les propriétés mécaniques d'un acier XC38, néanmoins les dans caractérisation des échantillons s'est rendu compte que la composition chimique des pièces était 0,1% de carbone et non pas 0,38% de carbone

On a du réorientée notre sujet vers une étude de comportement mécanique et l'évolution microstructurale d'une soudure MIG de l'acier XC10, avec et sans traitement thermique de préchauffage.

Dans le chapitre I nous exposons des généralités sur le soudage.

Une étude sur les défauts liés au soudage est présentée au chapitre II.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre est consacré à la description de différentes techniques de contrôles non destructifs.

Le chapitre IV est consacré à la partie expérimentale et puis le cinquième chapitre est consacré à la présentation et interprétations des résultats obtenus.

Enfin une conclusion générale dans laquelle nous mettons en évidences les points essentiels de la présente étude.

**I.1 Généralités**

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones, voir figure (I. 1) :

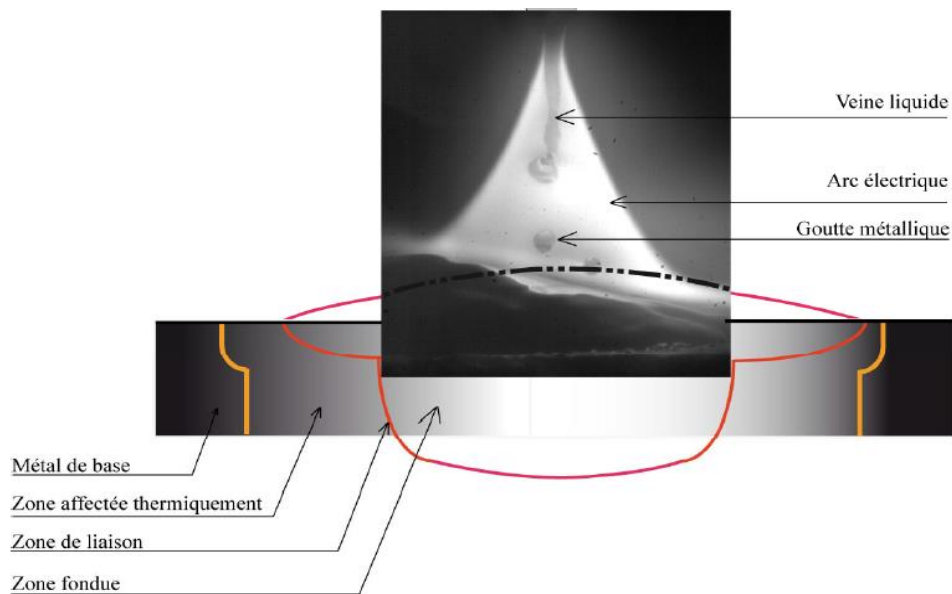
**La zone fondue:** (nommée ZF) Zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

**La zone affectée thermiquement :** (nommée ZAT) Région se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

**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.

**Le métal de base :** Au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée. [1]





FigureI .1 : Les différentes zones d'une soudure.[2]

## I.2 Les procédés de soudage à l'arc :

Le soudage à l'arc est un terme générique pour qualifier l'acte au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler afin de conduire à une fusion superficielle et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure. Il regroupe quatre procédés[3] :

### I.2.1 Le soudage à l'arc avec électrode enrobée : (SMAW) :

Un générateur de courant électrique alternative ou continu (ou sans transformateur) permet de produire un arc électrique libre entre l'électrode métallique fusible et la pièce. La chaleur dégagée par cet arc électrique fait fondre localement les pièces à souder créant un bain de fusion et simultanément l'électrode métallique qui fournit le métal d'apport. L'atmosphère gazeuse de l'arc est portée à très haute température (5000° à 8000° C) et est fortement ionisée (Figure I. 2).[4]

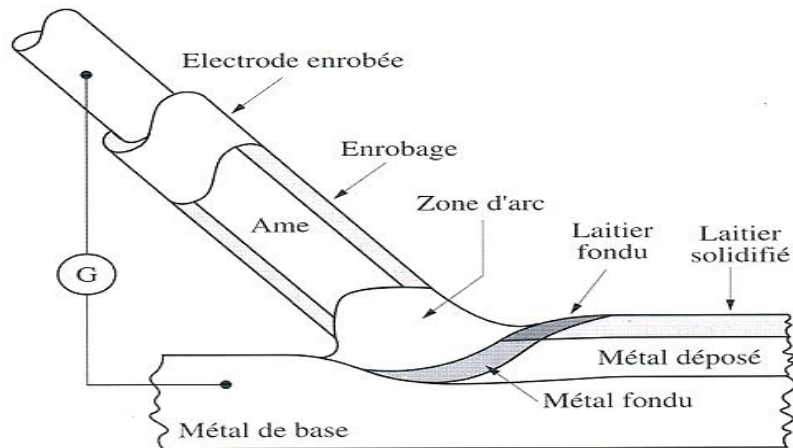


Figure I.2 : Procédé de soudage avec électrode enrobée.[4]

L'électrode est une baguette qui comporte une âme métallique (métal d'apport) et un enrobage, l'électrode joue le rôle de la cathode.

**L'âme métallique** comporte des éléments d'alliage qui doivent assurer une grande part des caractéristiques désirées de la soudure, elle conduit le courant, apporte le métal et forme le cordon.[5]

**L'enrobage** entoure l'âme métallique, c'est un alliage complexe :

- Minerais ( $\text{Fe}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{F}_2\text{T}_1\text{O}_3$ ).
- Silicates ( $\text{KALSiO}_2$ ,  $\text{KALSi}_3\text{O}_3$ ).
- Du graphite.
- **Des bases** ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ).

L'enrobage joue plusieurs rôles :

- **Rôle électrique** : libérer des électrons.
- **Rôle métallique** : émettre des gaz et des vapeurs qui chassent l'air et limitent le risque d'oxydation.

En se diluant dans le cordon l'enrobage peut être une autre source d'élément d'alliage.

- **Rôle mécanique** : comme la température de fusion de l'enrobage est inférieure à la température de fusion de l'âme, l'enrobage joue le rôle d'un canal à l'âme en fusion ce qui procure une bonne qualité du cordon. [5]

### I.2.2 Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode de tungstène : (GTAW) : [6]

Le soudage TIG ou GTAW est un procédé utilisé pour produire des soudures de qualité avec pratiquement tous les métaux soudables. Le soudage peut être effectué manuellement, semi automatiquement ou automatiquement.

Le procédé utilise une électrode de tungstène qui ne fond pas lors du soudage, donc qui ne sera pas intégré au bain de fusion. Le procédé de soudage GTAW peut être effectué dans toutes les positions de soudage et dans plusieurs applications, dont le soudage des tubes et des tuyaux de faible épaisseur. Il est aussi fréquemment utilisé pour effectuer le premier cordon de soudure à la racine des tubes épais dans l'industrie pétrolière, chimique ou de production d'énergie. Un métal d'apport peut être ajouté ou non au bain de fusion selon les besoins. Les joints à recouvrement et les joints d'angle extérieur peuvent être soudés sans métal d'apport avec le procédé GTAW. Les gaz inertes servent à protéger l'électrode et le bain de fusion de la contamination par l'oxygène ambiant.

Le soudeur doit manipuler la torche de soudage du bain de fusion. Il doit aussi ajouter soigneusement le métal d'apport au moment opportun lors de l'exécution d'un cordon de soudure. Le résultat donne une soudure de très haute qualité. Le soudage GTAW manuel exige du soudeur une habileté plus grande que pour tout autre procédé de soudage manuel (Figure I. 3).

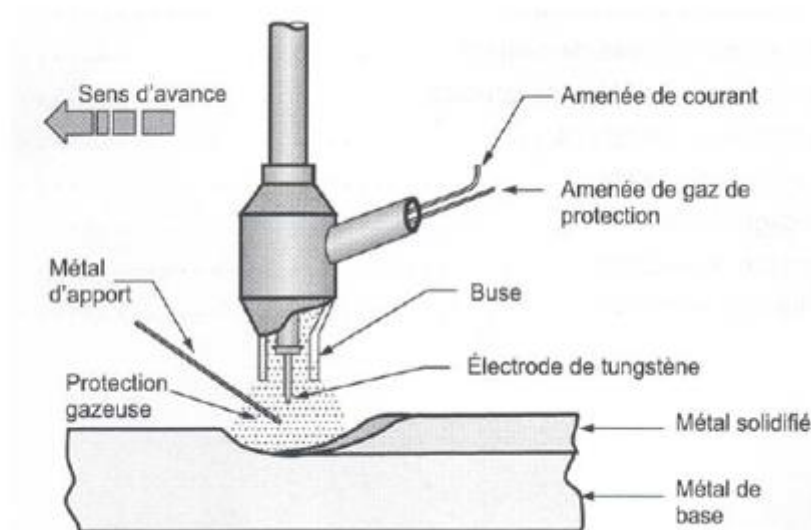


Figure I. 3 : Procédé de soudage TIG.[7]

### I.2.3 Le soudage à l'arc submergé sous flux solide : (SAW) : [7]

Il se produit un arc électrique entre une électrode et le métal de base. L'arc est recouvert d'un flux en granules. Une partie de ce flux protège le bain de fusion et une autre partie est fondue et diluée avec le métal d'apport.

Le procédé à l'arc submergé utilise deux produits d'apport distincts : le fil-électrode est entraîné vers le bain de fusion grâce à un système de dévidage, et le FLUX, qui est en poudre, provient d'un distributeur à débit réglable. Une partie du flux fond et produit un laitier qui recouvre le bain de fusion; l'excédent non fondu et resté intact est recueilli et peut être réemployé (Figure I. 4).

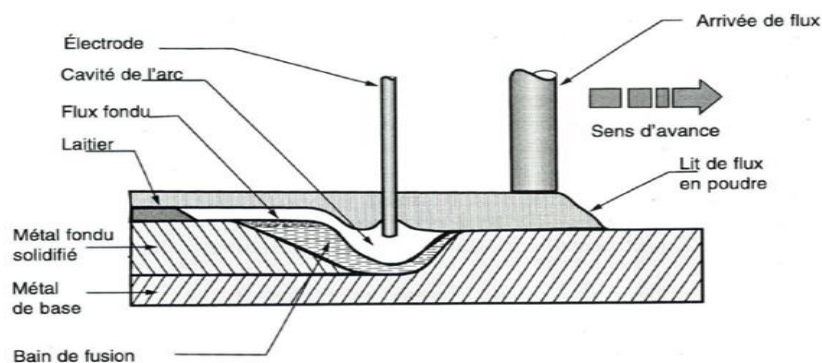


Figure. I. 4 : Procédé de soudage à l'arc sous flux solide. [7]

### I.3 Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil fusible : (GMAW) :

#### I.3.1 Introduction : [8]

Découvert au cours de la Deuxième Guerre mondiale, le développement de ce procédé visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il s'est vite imposé dans l'industrie en raison de son efficacité au regard des soudures importantes au point de devenir, selon le Bureau Canadien de Soudage, le procédé le plus utilisé dans le monde. Les soudeurs ont également mis en évidence son efficacité pour souder l'aluminium grâce à son action nettoyante permettant de produire des soudures de qualité. Enfin, comparativement au procédé GTAW, déjà employé à l'époque, le procédé GMAW s'est aussi révélé plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais. Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW, appelé aussi MIG- MAG (Metal Inert Gas – Metal Actif Gas) se divise en deux catégories. Ainsi, on distingue :

- **Le procédé MAG** (Metal Active Gas) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (Ar-  $\text{CO}_2$ ) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar- $\text{O}_2$ ).
- **Le procédé MIG** (Metal inert gas) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

### I.3.2 Principe du soudage MIG : [8]

Un arc électrique est amorcé puis entretenu entre l'électrode fusible (le fil d'apport à dévidage continu, qui fond à mesure qu'il avance) et la pièce à souder. Le fil d'apport se présente en bobine ou en fut.

L'énergie électrique de l'arc est fournie par un bloc d'alimentation. Le courant de soudage est transmis à l'électrode par le tube contact du pistolet à souder.

Le fil est débité par le dévidoir à une vitesse de plusieurs millimètres par minute. La longueur d'arc s'autorégule en fonction de la tension constante du bloc d'alimentation. Le gaz (inerte ou actif) destiné à protéger l'électrode, l'arc et le bain de fusion contre les effets de l'air ambiant est injecté via un diffuseur entourant le tube contact (Figure I. 5).

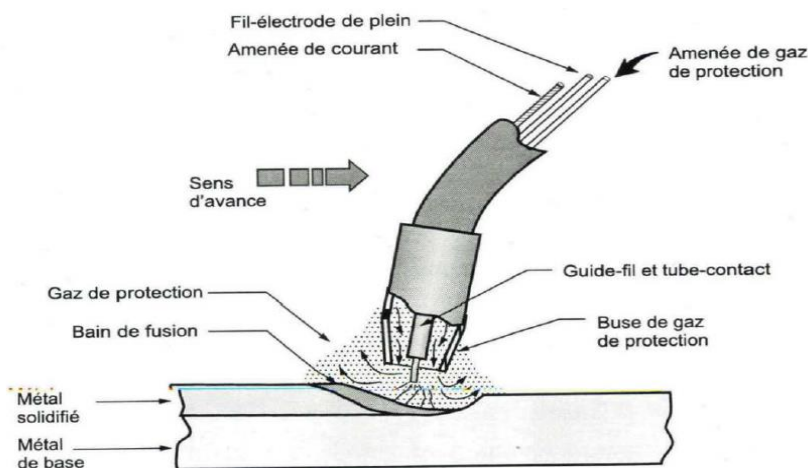


Figure I. 5: Principe de soudage MIG/MAG. [7]

### I.3.3 L'arc de soudage MIG:

Un arc de soudage est un arc électrique amorcé par court-circuit entre l'électrode et la pièce à souder. L'arc chauffe et ionise un gaz appelé plasma, qui transfère le courant électrique à la pièce à souder. La chute de tension et l'intensité du courant dans l'arc donnent la mesure de la puissance électrique émise, dont l'apport calorifique fait fondre l'électrode et la pièce à souder.[8]

### I.3.4 Le transfert du métal:

La stabilité d'un arc en courant continu avec fil-électrode fusible dépend essentiellement du mode de transfert du métal en fusion dans l'arc. Selon les modes, on distingue le transfert d'arc en pulvérisation axiale et le transfert d'arc par court-circuit, le régime de transfert dépend de l'intensité et de la tension mais aussi de la composition du gaz de protection et du diamètre du fil.[8]

#### I.3.4.1 Le transfert par court-circuit:

Le soudage à l'arc par court-circuit (arc court) s'utilise normalement à basse intensité pour souder des tôles dans toutes les positions. En raison du faible dégagement de chaleur, le transfert par court-circuit convient mieux au soudage de pièces plus minces (Figure I. 6).[8]

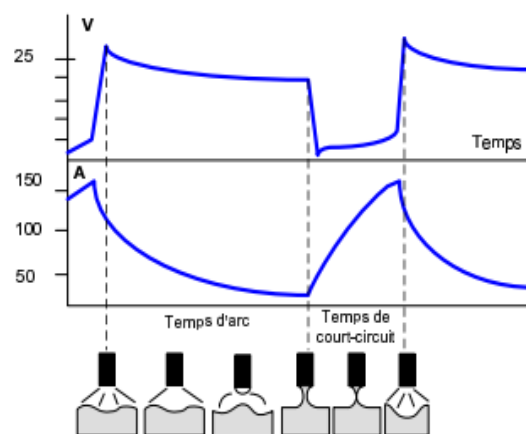


Figure I.6 : Transfert par court-circuit.[9]

### I.3.4.2 Le transfert en pulvérisation axiale: [8]

Le soudage à l'arc en pulvérisation axiale requiert une intensité supérieure à celle du courant de transition et une tension élevée (Figure I.7). La stabilité de l'arc est excellente et le métal d'apport est transféré en une pluie de fines gouttelettes. L'apport de chaleur et le taux de dépôt étant élevés, ce procédé est réservé au soudage à l'arc à plat de matériaux d'au moins 5mm d'épaisseur.

Pour obtenir un arc de pulvérisation parfait, il faut utiliser de l'argon pur ou un mélange d'argon et de faibles quantités de dioxyde de carbone (pas plus de 25 %) ou d'oxygène, mais pas du CO<sub>2</sub> pur. La pulvérisation axiale convient particulièrement pour le soudage MIG d'aluminium ou d'acier inoxydable, pour lesquels on utilise principalement de l'argon pur comme gaz de protection.

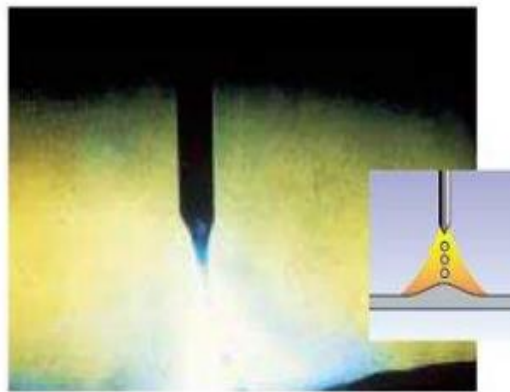


Figure I.7 : Transfert par pulvérisation axiale.[9]

### I.3.4.3 Le transfert globulaire:

Le transfert globulaire (ou soudage à grosses gouttes) intervient lorsque l'intensité est inférieure à celle requise pour le soudage en pulvérisation axiale et la tension supérieure à celle requise pour le soudage à l'arc par court-circuit. Dans cette zone intermédiaire, le diamètre des gouttelettes est supérieur à celui de l'électrode et leur forme est souvent irrégulière (Figure I. 8).[8]

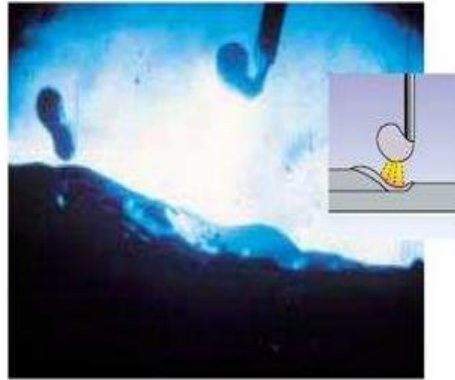


Figure I.8 : Transfert globulaire. [9]

### I.3.5 les Consommables:

Le soudage MIG convient pour les matériaux suivants: aciers doux, faiblement alliés et inoxydable, aluminium, cuivre et alliages de cuivre, nickel et alliages de nickel, etc. On utilise souvent un matériau d'apport de même composition chimique que le matériau à souder.[8]

#### I.3.5.1 le Fil plein:

Les fils-électrodes pleins pour soudage MIG ont, selon leur composition, des diamètres de 0,6 à 2,4 mm. Pour permettre un dévidage parfait, ils sont généralement bobinés (en bobines de fil d'acier de 10 à 15kg ou, pour des applications plus lourdes, en futs de 200kg environ). Ils doivent être lisses, exempts de salissures, d'aspérités ou d'ébarbures. Les fils enrobés d'une mince couche de cuivre présentent les meilleures performances au dévidage.[8]

#### I.3.5.2 le Fil fourré:

Les fils-électrodes fourrés sont constitués d'une gaine métallique remplie de flux ou de poudre métallique (Figure I. 9). Le fourrage peut être rutile ou basique.[8]

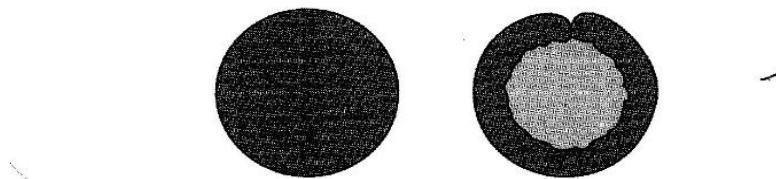


Figure I.9 : Coupe transversale d'un fil plein et d'un fil fourré.[8]



**I.3.6 Le gaz de protection:**

Le gaz de protection protège la soudure contre l'oxydation et les inclusions de laitier dues à la présence d'oxygène (même l'état résiduel), mais aussi contre le risque de porosités. Les principaux composants des gaz de protection sont:[8]

**I.3.6.1 Argon (Ar):**

L'argon est le gaz de protection le plus répandu. C'est un gaz inerte qui, ne réagissant pas chimiquement avec d'autres matériaux, convient parfaitement pour le soudage des matériaux comme l'aluminium ou l'acier inoxydable. Pour le soudage MIG d'aciers doux, l'ajout de faibles quantités de dioxyde de carbone ou d'oxygène améliore la qualité de la soudure, particulièrement en soudage à l'arc court. Si l'on ajoute un maximum de 20% de  $\text{CO}_2$  à de l'argon, on obtient une meilleure pénétration en réduisant le risque de manque de fusion. Si la concentration de  $\text{CO}_2$  se situe entre 5 et 8 % on réduit les projections. [8]

**I.3.6.2 Hélium (He):**

Comme l'argon, l'hélium est un gaz inerte. Il améliore l'apport de chaleur au joint. Mélangé à de l'argon, il augmente la vitesse de soudage et améliore la pénétration des plaques de cuivre ou l'aluminium épaisses: il compense en effet les pertes de chaleur par diffusion dues à la forte conductivité thermique de ces métaux. Il présente cependant l'inconvénient d'être cher et peu dense.[8]

**I.3.6.3 Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ):**

Le dioxyde de carbone pur convient pour le soudage à l'arc court. C'est un gaz bon marché et bien adapté au soudage de l'acier galvanisé. En revanche, il génère davantage de projections et ne convient pas pour le soudage à l'arc en pulvérisation.[8]

**I.3.6.4 Hydrogène ( $\text{H}_2$ ):**

On peut ajouter de l'hydrogène en faible quantité afin d'améliorer l'apport de chaleur et d'augmenter la vitesse de soudage (tout comme avec l'hélium, mais à moindre coût). On réserve cependant l'hydrogène au soudage des aciers austénitiques, en raison des risques de fissuration. Antioxydant actif, l'hydrogène s'utilise comme gaz de protection de racine.[8]

**I.3.6.5 Oxygène (O<sub>2</sub>):**

Utilisé en faible quantité d'appoint, l'oxygène contribue à stabiliser l'arc en soudage MIG.[8]

**I.3.6.6 Azote (N<sub>2</sub>):**

L'azote peut être utilisé comme élément d'alliage dans les aciers austéno- ferritiques. L'ajoute d'une faible quantité d'azote au gaz de protection permet de compenser les pertes lors du soudage.[8]

**I.3.7 Matériels utilisés au soudage MIG :**

L'appareillage nécessaire pour l'application des procédés semi-automatiques de type GMAW consiste en une source de courant, un dévidoir, un pistolet ou une torche à souder, un câble de retour et une bouteille de gaz, un manodétendeur-débitmètre et sa canalisation.[8]

**I.3.7.1 Le générateur :**

Le générateur de courant continu, généralement associé à un boîtier de commande permettant l'ensemble des réglages (U et I), doit avoir une gamme de courant et d'intensité correspondant au mode de transfert souhaité. Ce mode de transfert, comme nous l'avons précisé précédemment est choisi, à partir du boîtier de commande en fonction de l'assemblage à réaliser, c'est à dire des épaisseurs à souder, de la préparation, de la position de soudage.[8]

**I.3.7.2 Le fil : [8]**

Le fil tient un rôle prépondérant dans la formation de l'arc électrique et donc dans l'opération d'assemblage, que ce soit par son diamètre ou par sa composition. En effet, plus le diamètre du fil sera grand, plus le taux de dépôt et la profondeur de pénétration décroîtront, plus la largeur du cordon augmentera et plus l'énergie nécessaire à la fusion sera élevée.

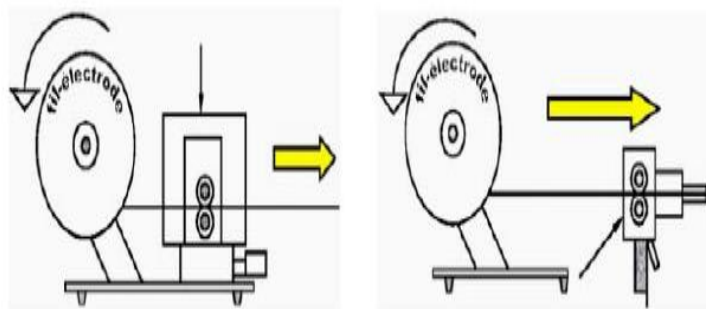
Le fil, de par sa composition, apporte des éléments susceptibles de modifier les caractéristiques de la soudure. Les éléments d'alliages doivent donc être ajustés afin d'obtenir une soudure dont les propriétés sont au moins égales à celle du métal de base.

Le choix de la composition peut aussi conduire à une meilleure stabilisation de l'arc, une réduction des projections et des fumées, et une diminution du taux d'oxygène dans la soudure.

Le choix du fil pour l'opération de soudage s'effectue en tenant compte de quatre points de l'état de surface de la pièce, de la nature de la pièce à souder, du gaz de protection utilisé.

### **I.3.7.3 Le dévidage :**

Le dévidage est la fonction qui assure l'entraînement du fil électrode de la bobine jusqu'au tube contact. Son rôle est primordial car la vitesse du fil détermine la qualité du soudage et la stabilité de l'arc. Le fil devant s'arrêter instantanément, les supports de bobine sont équipés d'un frein. Dans ce but, les dévidoirs sont munis d'un système d'entraînement du fil utilisant des roues, appelées galets d'entraînement, qui s'appuient de chaque côté du fil. En tournant, les galets entraînent le fil dans la gaine de la torche de soudage (Figure I. 10). [8]



FigureI.10 : Système de dévidage.[2]

### **I.3.7.4 Le pistolet de soudage :**

Le pistolet de soudage et la gaine d'amenée du fil apportent l'énergie, l'électrode fusible et le gaz de protection. Le pistolet doit être robuste et capable de résister à des conditions et des environnements et de fonctionnement particulièrement rudes tout en étant suffisamment compact et léger pour permettre le soudage dans des lieux confinés. Lorsqu'il est prévu pour des intensités de courant élevées, un système de refroidissement du câble d'alimentation, de tube contact et de la buse à gaz est généralement prévu et permet de réduire sa taille et son poids (Figure I. 11).[8]



Figure I.11 : Pistolet de soudage.[2]

### **I.3.7.5 Le manodétendeur-débitmètre : [8]**

Sert à réduire la pression du gaz de protection se trouvant dans la bonbonne et à en doser le débit lors du soudage. Un débit de gaz régulier est indispensable à la réussite du travail de soudage. Dans le cas des procédés MIG/MAG avec protection gazeuse, on doit donc utiliser des manodétendeurs-débitmètres pour contrôler la quantité de gaz de protection.

Les débitmètres sont de deux types :

- à bille : le débitmètre prend la forme d'un tube de verre gradué dans lequel est posée une bille dont la position indique le débit.
- à cadran : détendeur surmonté de deux manomètres ; le premier indiquant la pression et le volume du gaz dans la bonbonne, et le second, le débit du gaz de protection.

### **I.3.8 domaine d'utilisation : [10]**

Le soudage MIG convient pour l'assemblage des métaux ferreux et non ferreux. Il permet de souder tous les types de joints en toutes positions et de mettre en œuvre des épaisseurs de 0,5 mm et plus pour le soudage à faible intensité, 6 mm et plus pour le soudage à haute intensité.

Le soudage sous protection gazeuse avec fil plein est utilisé en tôlerie, en construction navale, pour le soudage des aciers métalliques et du matériel métallurgique, ainsi que pour la construction des ponts, des engins de levage, des pipelines et des réservoirs de stockage. Avec fil fourré, on l'utilise en charpentes, en construction navale, ainsi que pour la construction des ponts, des presses lourdes, des wagons et châssis de camion.

**I.3.9 Avantages et inconvénients du procédé :**

Un des principaux avantages du procédé est d'être semi-automatique ou automatique qui ne réclame pratiquement aucune opération de finition. Il permet le soudage de l'acier de l'aluminium en toutes positions et présente une productivité nettement supérieure à celle du soudage manuel à l'arc. Par contre, il demande une main d'œuvre qualifiée : sous certains régimes, le risque de collage est réel et pas toujours décelable, d'où la difficulté dans le choix des paramètres de soudage. D'autre part, le soudage doit se faire dans une atmosphère calme à l'abri du vent et des courants d'air violents, ce qui pose des problèmes sur les chantiers. [11]

**I.3.10 La soudabilité des aciers au carbone :****I.3.10.1 La température de préchauffage et notion de carbone équivalent:[12]**

Pour obtenir un métal d'apport fondu sans criques, les températures de préchauffage et de passes intermédiaires sont très importantes.

Le préchauffage réduit:

- le risque de fragilisation par l'hydrogène
- les contraintes de retrait
- la dureté de la zone affectée thermiquement (ZAT).

La composition du métal de base doit être connue pour déterminer la température de préchauffage qui est fixée par deux principaux facteurs d'influence:

- teneur en carbone du métal de base
- teneur des éléments d'alliages du métal de base

La température de préchauffage croît surtout avec le pourcentage de carbone.

De même avec les éléments d'alliage, mais dans une moindre mesure.

Une méthode pour déterminer la température de préchauffage est le calcul du carbone équivalent, qui se base sur la composition chimique du métal de base.

$$\text{Ceq} = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/15$$

-Plus le Ceq est élevé, plus le soudage devient difficile.

Un autre facteur pour la détermination de la température de préchauffage est l'épaisseur ainsi que les dimensions de la pièce. La température de préchauffage augmente avec l'épaisseur et les dimensions de la pièce.

**II.1 Introduction: [13]**

Les Défauts de soudure peuvent être définis comme des irrégularités de surface de la soudure, de discontinuités, des imperfections ou des incohérences qui se produisent dans des parties soudées. Les défauts de joints de soudure pourraient entraîner le rejet de pièces et d'assemblages, des réparations coûteuses, la réduction significative de la performance dans des conditions de travail et, dans les cas externe défaillances catastrophiques avec la perte de biens et de la vie.

Ces défauts proviennent de différentes sources. Dans la plupart des cas, les défauts se produisent en tant que résultat de la conception de soudure inadéquate et procédés de soudage déconseillés et le choix des matériels incompatibles. En plus d'une connaissance de l'absence de processus, malfaçons, et une formation insuffisante du soudeur peuvent également contribue à ces défauts.

Dans la pratique, il est pratiquement impossible d'obtenir une soudure parfaite et, dans la plupart des circonstances, il n'est pas nécessaire de fournir des fonctions de service appropriées requises. Ainsi, pour de nombreuses industries, les spécifications et les tolérances pour les soudures ont été établis pour déterminer ce qui est acceptable et aptes au service. Ceux-ci sont spécifiés sous forme de codes ou normes, et permettent une variété de types de défauts, tailles et fréquences. Car certains codes sont plus stricts que d'autres, la même soudure peut être acceptée sous un code, mais pas sous un autre code.

**II.2 Le manque de fusion (collage) : [13]**

Manque de fusion (LOF : lack of fusion) est décrit comme attache incomplète ou la pénétration entre le métal de fusion et du métal de base. Ce défaut se produit lorsque le métal de fusion ne fait pas fondre complètement pour former une liaison cohésive avec le métal de base. (Figure II. 1).

Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande. Ce défaut On le retrouve plus fréquemment avec le procédé GMAW. Pour éviter ce problème, on doit s'assurer de la bonne procédure de soudage et effectuer des tests destructifs.



Figure II. 1 : Manque de fusion en bord de chanfrein et sous cordon.[14]

### II.3 Le manque de pénétration: [13]

Le Manque de pénétration (LOP : lack of penetration) se produit lorsque le métal fondu n'a pas complètement pénétré dans la partie inférieure du chanfrein. Le manque de pénétration peut être causé par un faible courant de soudage, vitesse de déplacement excessive, l'application incorrecte de l'électrode, ou la présence de contaminants de surface qui empêchent la pleine fusion du métal de base.

Les techniques possibles utilisées pour observer ces types de défauts sont la radiographie, l'inspection de particules à ultrasons, et l'inspection des particules magnétiques. Cependant, la radiographie est incapable de détecter de petites zones de discontinuité (fig. II. 2).

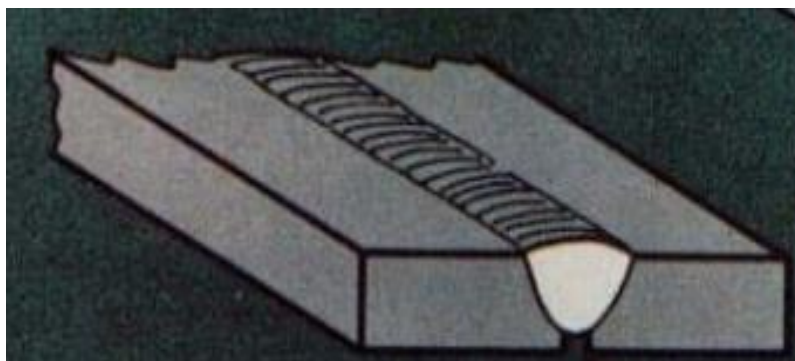


Figure II. 2 : Manque de pénétration.[14]

**II.4 La fissuration à froid : [15]**

La fissuration à froid est le résultat de la dissolution de l'hydrogène dans le métal de fusion qui ensuite diffuse dans la zone affectée par la chaleur. Les fissures se développent bien après la solidification du métal de fusion. Cette fissuration est le plus souvent trouvée dans la ZAT, très proche de la zone de liaison. Pour cette raison, on l'appelle aussi la fissuration sous cordon. Généralement, ces fissures ne sont pas en surface et peuvent être vues seulement par radiographies ou en sectionnant les soudures. Parfois, il est dans une région de la soudure qui s'étend parallèlement à la zone de fusion.

Avec des aciers à haute résistance, la fissuration induite par l'hydrogène se produit, des fissures transversales dans le métal de fusion que l'on voit facilement avec très faible grossissement. Dans des conditions très sévères, le facteur temps joue un rôle important, la fissuration peut se produire en quelques minutes, avec des conditions très marginaux, des fissures peuvent ne pas apparaître pendant des semaines pour laisser le temps pour des fissures potentielles qui pourraient se développer (Figure II. 3).

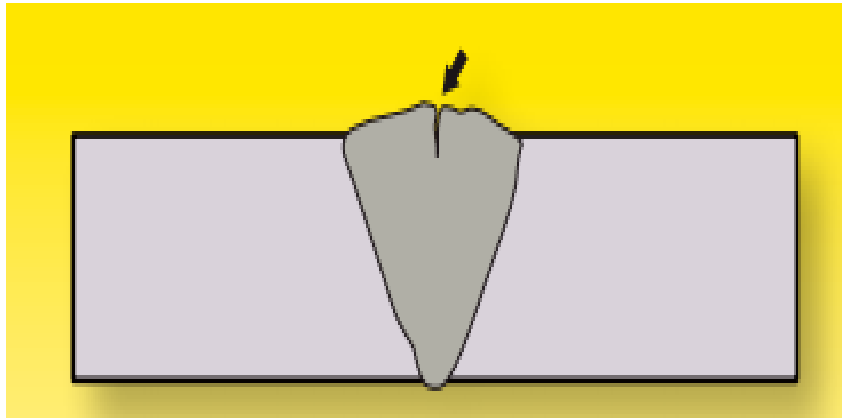


FigureII. 3 : Fissure à froid détecté en macrographie.[14]

**II.4 La fissuration à chaud :**

Les Fissures à chaud sont différentes des fissures à froid discutés précédemment, les fissures à chaud surviennent au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore). Ces fissures longitudinales se trouvent dans les centres des soudures (FigureII. 4).[15]





FigureII. 4 : Fissure de solidification (fissure à chaud). [16]

### II.5 Les inclusions solides ou de laitier : [17]

C'est le défaut le plus important et le plus fréquent, qui représente un corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu.

L'inclusion de laitier ou flux, est un résidu de laitier ou flux emprisonné dans le métal fondu, ces défauts peuvent être alignés, isolés ou distribués de façon aléatoire (Figure II. 5).

L'inclusion d'oxydes se trouve, particulièrement dans des soudures en aluminium lorsqu'elles résultent de pré-nettoyage insuffisant des surfaces articulaires.

Les inclusions de tungstène sont des défauts associés au soudage TIG ou l'utilisation d'un courant excessif pour une taille donnée de l'électrode ou de la possibilité de touché le sol de l'électrode dans le bain de fusion provoquer la fusion d'une partie de l'électrode.



FigureII. 5 : Inclusions de laitier décelées par radiographie.[14]

## II.6 Les porosités :

La Porosité se produit lorsque le métal fondu est sursaturé avec un gaz particulier (de l'hydrogène, de l'azote ou le monoxyde de carbone), qui ensuite forme des pores en raison de la nucléation des bulles de gaz sur les discontinuités dans le métal (joints de grains, les micros inclusions, etc.). L'incidence de la porosité dans un métal fondu est donnée en fonction du degré de sursaturation du gaz (Figure II. 6).[17]

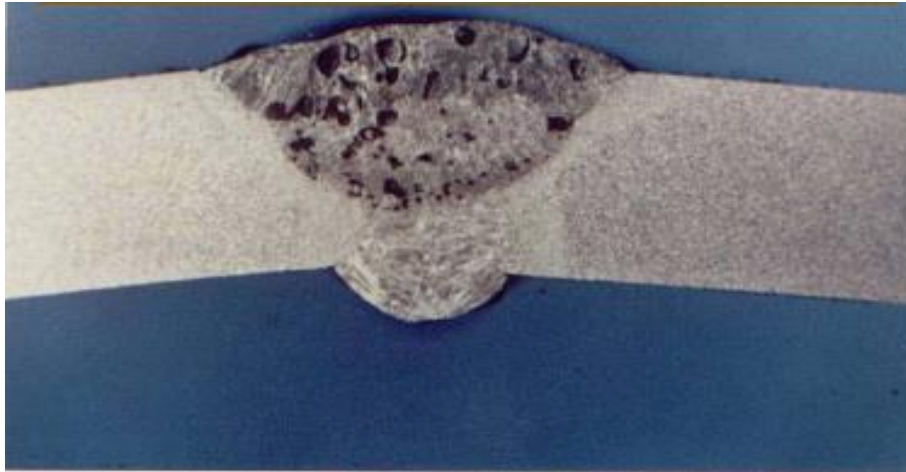


Figure II. 6 : Macrographie d'une soudure avec porosités. [14]

## II.7 Les retassures et crique de solidification :

A la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît visuellement à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (Figure II. 7). Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope. Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes. Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante.[18]

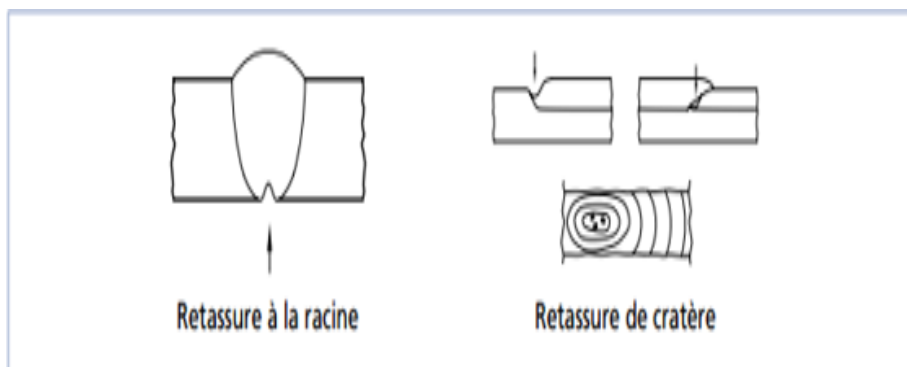


Figure II. 7 : Retassures.[18]

**II.8 Les morsures et caniveaux :**

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie de cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (Figure II. 8). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveau. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine.[18]



Figure II. 8 : Caniveaux.[14]

**II.9 Débordements du cordon :**

De ce type de défaut il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier (Figure II. 9). [18]

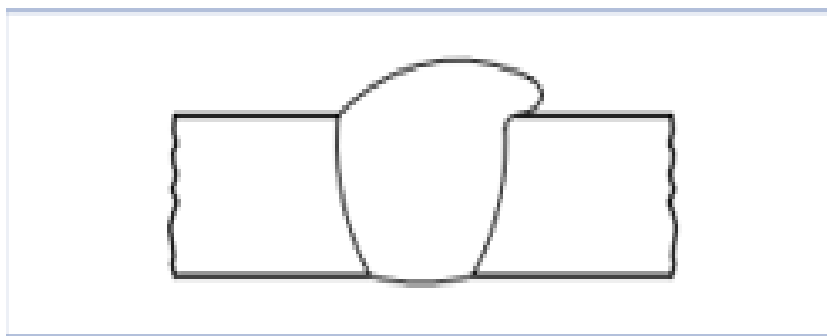


Figure II. 9 :Débordement du cordon.[18]

### II.10 Les soudures concaves et convexes: [18]

Les soudures difformes sont causées par une combinaison de courant d'électrode et la vitesse incorrecte. La concavité excessive (manque de renforcement) résulte de l'épaisseur de la gorge insuffisante par rapport à la taille de soudure désigné (Figure II. 10).

Les résultats de convexité excessive est le mauvais contour de soudure. Dans cette soudure multicouche peut donner lieu à des inclusions de laitier, tandis que dans la soudure finie elle fournit un motif de contrainte faible et un effet d'encoche locale au bord de la soudure. Ils peuvent être évités en utilisant un courant approprié de la taille de l'électrode.

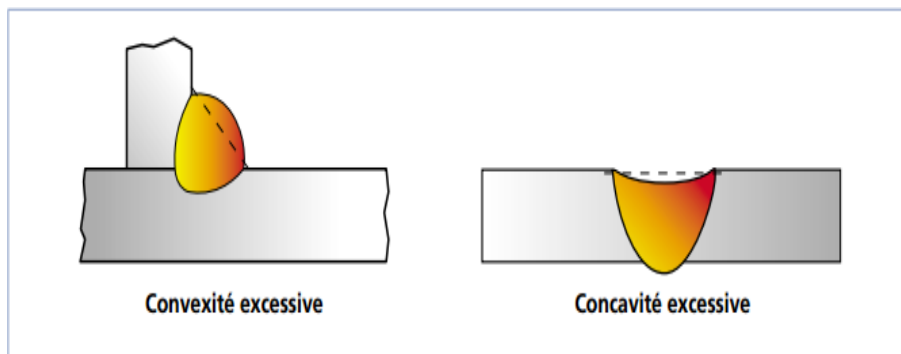


Figure II. 10 : Convexité et concavité d'un joint soudé.[18]

### II.11 Désalignement:

Ce type de défaut géométrique est généralement causée par un problème d'installation / ou d'assembler des tôles de différentes épaisseur (Figure II. 11). [19]

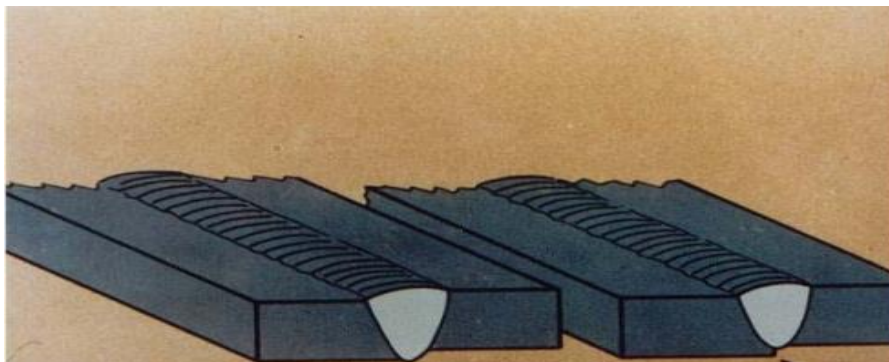


Figure II. 11 : Désalignement.[14]

## II.12 Les contraintes résiduelles : [20]

L'origine des contraintes résiduelles de soudage est liée à la localisation de la source de chaleur et aux variations des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température. Très schématiquement, on peut distinguer deux sources de contraintes résiduelles.

1/ Les contraintes résiduelles d'origine purement thermiques, qui proviennent du fait suivant :

- Soumis à une élévation de température  $\Delta\theta$ , un élément de la zone centrale chauffée devrait se dilater d'une quantité  $\epsilon = \alpha \Delta\theta$ ,  $\alpha$  désignant le coefficient de dilatation linéaire du matériau. En réalité, cette expansion est très limitée puisque les parties froides avoisinantes jouent le rôle d'éléments de bridage (« auto bridage »). L'élément est donc soumis à une compression de leur part. La limite d'écoulement étant très faible à haute température, toutes les déformations apparaissant correspondent à des déformations plastiques. Au refroidissement, la situation s'inverse : la zone centrale chauffée ne peut se rétracter librement, et est mise en tension par les zones avoisinantes. Après refroidissement, les zones chauffées (métal fondu et **ZAT**) seront soumises à des contraintes résiduelles de traction, les zones avoisinantes étant, pour des raisons d'équilibre, en compression. Dans le métal fondu, les contraintes ainsi créées peuvent être très élevées. De l'ordre de grandeur de la limite d'élasticité du matériau à température ambiante.

2/ Les contraintes résiduelles aux transformations allotropiques au refroidissement : dans le cas des aciers de construction, la transformation de l'austénite s'accompagne toujours d'une expansion plus ou moins marquée. Si celle-ci intervient à température relativement basse (cas de matériaux trempant, de refroidissement rapide...), la déformation associée ne sera plus plastique, mais élastique. L'expansion, contrariée par les zones avoisinantes, se traduit par la formation de contraintes de compression résiduelle. Superposées aux contraintes thermiques, celles-ci peuvent diminuer le niveau des contraintes de traction, voire même conduire à des contraintes globales de compression en **ZAT**.

Ces contraintes résiduelles provenant du soudage se superposent aux contraintes de service, et jouent donc à ce titre un rôle sur différents phénomènes ou propriétés : fissuration à froid, résistance à la rupture, rupture, corrosion sous tension.

**III.1 Introduction:**

On regroupe sous le vocabulaire essais non destructifs ou encore contrôles non destructifs (ce dernier évoquant mieux l'aspect qualité industrielle que le premier qui évoque plutôt les examens en laboratoire) l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des modifications dommageable à leur utilisation ultérieure. Le terme de santé, s'il souligne une certaine parenté avec le domaine des examens d'aide au diagnostic médical, comme la radiologie ou l'échographie, délimite bien l'objectif des contrôles non destructifs qui est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité, la sécurité d'emploi et /ou, plus généralement, la conformité d'un produit à l'usage auquel il est destiné. En ce sens, le contrôle non destructif (CND) apparaît comme un élément majeur du contrôle de la qualité des produits. Il se différencie de l'instrumentation de laboratoire et industrielle puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou les cotes d'une pièce.[21]

**III.2 Les différents procédés de contrôle non destructif:****III.2.1 Le contrôle par examen visuel: [22]**

Le type le plus courant de contrôle non destructif est le contrôle visuel. Le contrôle visuel permet de vérifier la dimension, la forme et la position des soudures. Ce type d'examen est destiné à déceler les défauts tels que les fissures, les inclusions, les caniveaux et le manque de pénétration.

Le contrôle visuel permet également de détecter les projections, les surépaisseurs excessives et de vérifier que la totalité du laitier a été éliminée.

Un contrôle visuel peut impliquer l'utilisation de gabarits et de calibres (Figure III. 1). Certains entreprises ont mis au point des normes de bonne pratique que les inspecteurs utilisent pour décider si une soudure est acceptable ou non. Le contrôle visuel se limite aux surfaces externes de la soudure. Il s'agit d'un contrôle très efficace dans la mesure où la forme et la dimension représentent des paramètres très importants de la soudure.

Les soudures présentes dans les applications critiques exigent des contrôles complémentaires pour mettre en évidence les défauts internes.

On utilise également d'autres outils pour le contrôle visuel des soudures tels que des loupes,

descamérasvidéominiatures, des calibres et des règles graduées.

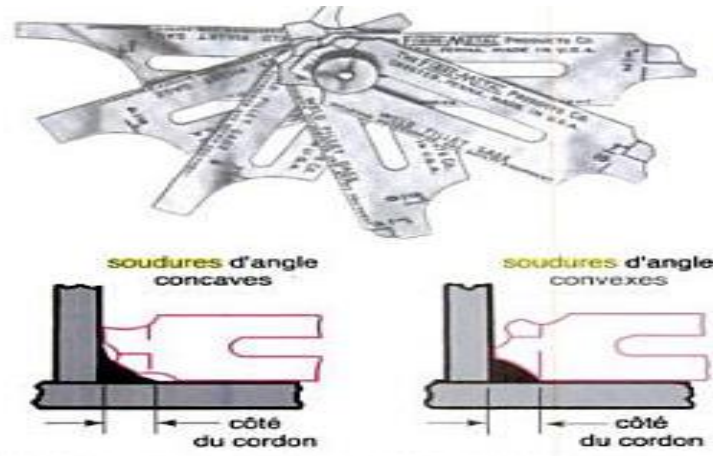


Figure III. 1 : Calibres utilisés pour vérifier les soudures d'angles convexes ou concaves des soudures.[22]

### III.2.2 Le contrôle par ressuage: [22]

Le contrôle par ressuage utilise des liquides pénétrants colorés ou fluorescents pour révéler les défauts débouchant. Cette méthode peut être utilisée pour détecter les défauts débouchant sur les métaux, les plastiques, les céramiques ou le verre, mais ne permet pas de détecter les défauts ou les discontinuités non débouchant.

Les différentes étapes de réalisation d'un contrôle par ressuage correct utilisant un liquide pénétrant coloré ou fluorescent sont les suivantes:

1. Nettoyez la pièce avec le produit spécial fourni avec le nécessaire de ressuage.
2. Appliquez le liquide pénétrant et attendez qu'il ait pénétré dans la fissure ou les piqures.
3. éliminez l'excès de liquide pénétrant à l'aide d'eau, de solvant ou d'un émulsifiant de type de pénétrant utilisé détermine le produit à utiliser pour éliminer l'excès.
4. Appliquez le révélateur.
5. Recherchez les discontinuités et les défauts.
6. Nettoyez la surface après avoir terminé l'examen.

Avant l'application du révélateur, on doit éliminer l'excès de pénétrant. Certains pénétrants sont éliminés à l'eau, d'autres en utilisant un solvant. Un troisième type de pénétrant exige l'utilisation



d'émulsifiant, qui permet au pénétrant d'être soluble dans l'eau. L'eau est utilisée pour éliminer à la fois le pénétrant et l'émulsifiant.

Le révélateur est ensuite appliqué. Une partie du pénétrant qui se trouve à l'intérieur du défaut ressort. Une coloration est visible à l'endroit du défaut, ce qui en révèle la présence. Des défauts débouchant seront mis en évidence (Figure III. 2).

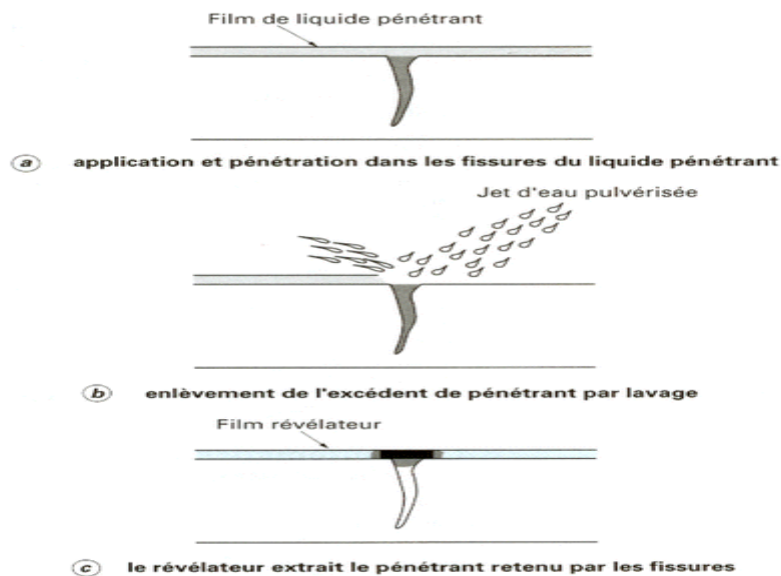


Figure III. 2 : Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant pré émulsifié. [22]

### III.2.3 Le contrôle par Courants de Foucault : [22]

Le contrôle par courants de Foucault utilise une bobine alimentée en courant alternatif pour créer des courants de Foucault dans la pièce à contrôler. La bobine alimentée en courant alternatif produit un champ magnétique dans la pièce. Ce courant alternatif circule suivant un trajet en boucle fermée. Ces courants induits sont connus sous le nom de courants Foucault.

Pour réaliser un contrôle par courants de Foucault, une bobine alimentée en courant alternatif est placée sur la pièce à contrôler. La bobine est étalonnée ou réglée afin d'obtenir une valeur d'impédance connue. La valeur de réglage de l'impédance peut être visualisée sur un oscilloscope.

Le contrôle par courants de Foucault ne détecte que les défauts situés près de la surface de la pièce. La profondeur de détection est fonction de la fréquence du courant alternatif. En utilisant les fréquences habituelles, la profondeur de contrôle, pour les métaux courants, ne dépassera pas 3mm. Les courants de Foucault peuvent être utilisés pour contrôler aussi bien les pièces planes



que les pièces de formes courbes telles que les tubes. Les courants de Foucault sont utilisés pour détecter les soufflures et les fissures ainsi que pour contrôler la qualité d'un traitement thermique (Figure III. 3).

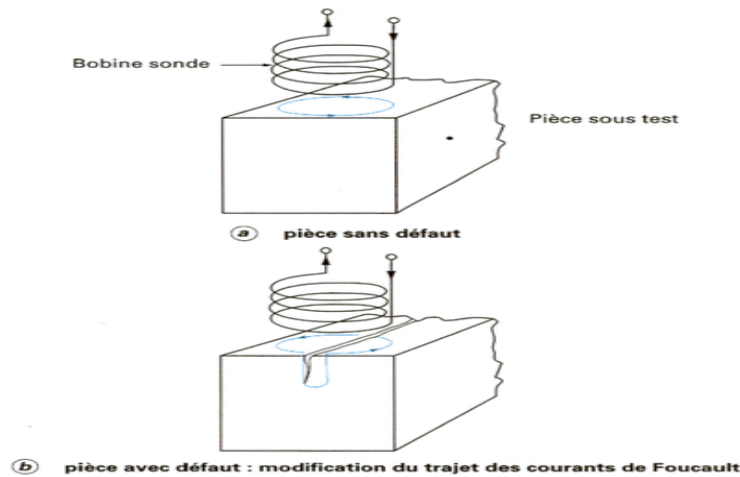


Figure III. 3 : Principe de la détection par courants de Foucault.[22]

### III.2.4 Le contrôle par Ultrasons: [7]

Le contrôle par ultrasons est une méthode d'inspection impliquant des ondes sonores, qui varient entre 20 kilohertz (kHz) et 10 mégahertz (MHz).

Aujourd'hui, Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif très sophistiquée au point de vue technique.

Pour détecter les défauts de soudure à l'aide de l'ultrason, il faut déplacer à la main un petit palpeur sur la surface de la pièce, à côté du joint de soudure, et observer les indications sur l'écran de la machine.

Le palpeur doit être utilisé avec un liquide (glycérine) afin qu'il glisse bien sur la pièce. Le palpeur produit alors un faisceau d'ultrasons qui traverse le métal et qui, ensuite, est réfléchi sur l'écran. Ce signal se nomme un écho (Figure III. 4).

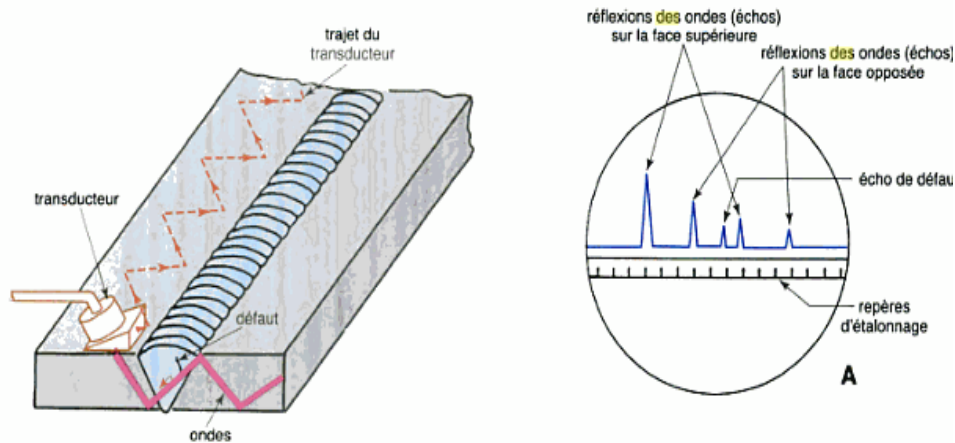


Figure III. 4 : Types d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide.[22]

### III.2.5 Le contrôle par Magnétoscopie: [7]

Le contrôle par magnétoscopie est une méthode d'inspection des défauts de surface qui permet de détecter les discontinuités telles que les fissures qui débouchent à la surface de la pièce. Etant donné que cette méthode dépend du magnétisme des pièces, elle se limite aux métaux ferreux.

C'est un moyen de contrôle simple, peu coûteux et qui nécessite peu d'équipement. Cependant, il demande une très bonne compréhension de la méthode, des modes d'opération ainsi que de l'interprétation des résultats.

Le principe de la magnétoscopie est bien simple. On utilise un champ magnétique. Un courant électrique traverse les deux pôles et un champ magnétique est créé autour du courant. On dépose une poudre métallique sur le joint et, en actionnant la poignée, la poudre est projetée à l'extérieur du joint. S'il y a un défaut de surface, la poudre entre à l'intérieur de la fissure et on peut, dès lors, constater un défaut de soudure (Figure III. 5).

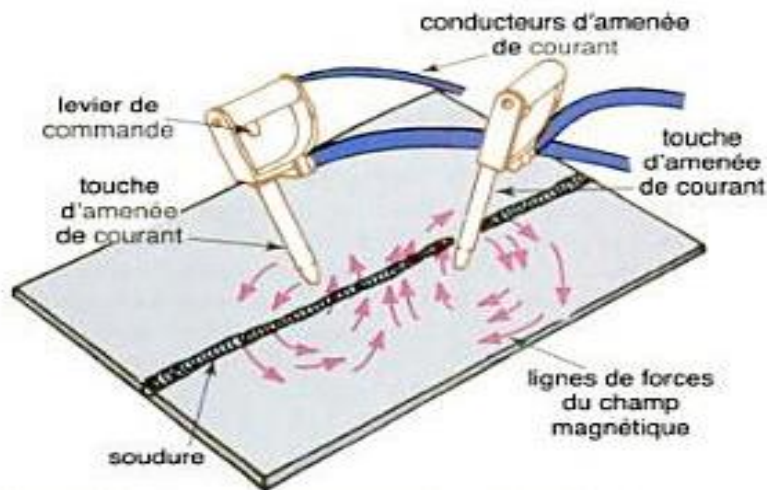


Figure III. 5 : Un champ magnétique est créé près d'une soudure par le passage, au travers de la soudure, d'un courant électrique allant d'une touche à l'autre. [22]

### III.3 Le contrôle par Radiographie (rayon x):

#### III.3.1 Principe: [21]

On obtient des rayons X en bombardant un matériau cible à l'aide d'un faisceau d'électrons pourvus d'une certaine énergie cinétique. L'interaction électrons-cible produit un rayonnement de freinage correspondant à un spectre continu borné. On définit ainsi une longueur d'onde limite  $\lambda_L$  reliée à la tension d'accélération des électrons  $V_0$  par la relation :

$$\lambda_L = 1/V_0$$

Avec en  $\lambda_L$  nm,  $V_0$  en kV.

La longueur d'onde d'intensité maximale  $\lambda_m$  dans le spectre est d'environ 1,5 fois  $\lambda_l$ . Le spectre est borné vers les hautes énergies dans la mesure où les rayons X émis ne peuvent avoir une énergie supérieure à celle des électrons excitateurs, elle-même liée à la tension d'accélération du faisceau (Figure III. 6). Le spectre comporte aussi des raies de fluorescence généralement absorbées par la fenêtre du générateur. L'intensité totale du flux de rayons X dépend par ailleurs de celle du faisceau d'électrons, sachant toutefois que le rendement de conversion est très faible (de l'ordre du pour-cent), la presque totalité de l'énergie électrique amenée étant transformée en chaleur et devant être évacuée en conséquence. La nature et la conception des générateurs de rayons X sont liées à ces considérations d'énergie et d'intensité.

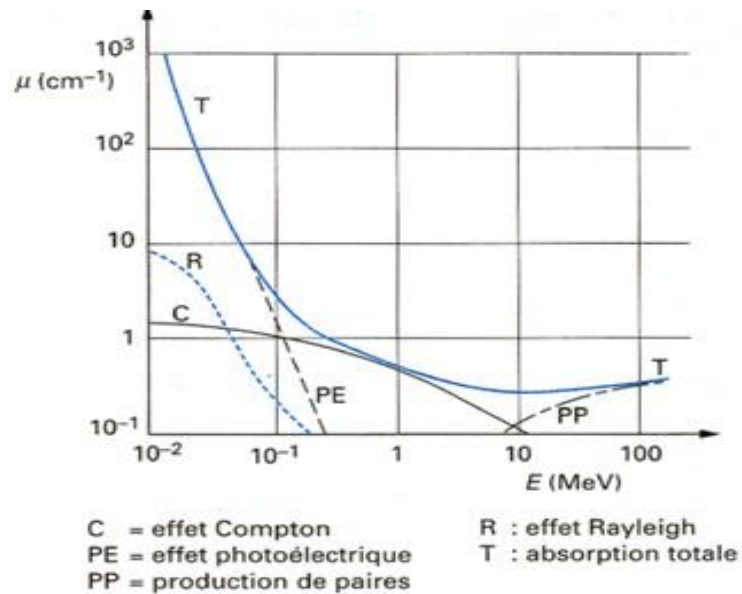


Figure III. 6 : Variation du coefficient d'absorption. [21]

La variation du coefficient d'absorption des rayonnements ionisants en fonction de leur énergie, dans le fer est présentée sur le graphe suivant (Figure III. 7) :

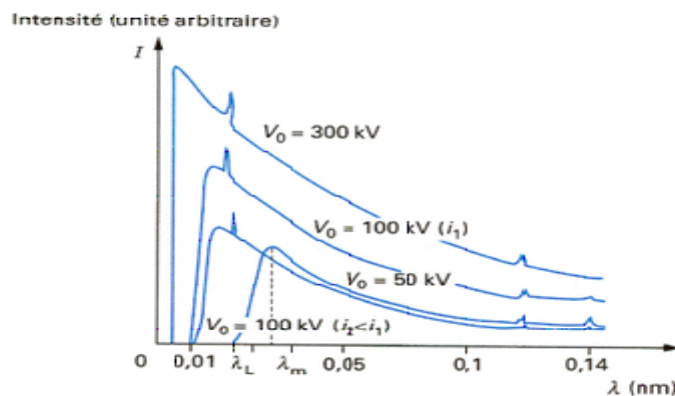


Figure III. 7 : Spectre émis par un générateur de rayon xen fonction de la tension d'accélération  $V_0$ . [21]

### III.3.2 La nature des rayonnements ionisants: [21]

Les rayonnements de même nature mais d'origine différente, les rayons X et  $\gamma$  sont des ondes électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes (comprises entre environ 0,1 pm et 1 000 pm). On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire E des photons associés, exprimée en électronvolts (eV). Si l'on exprime E en MeV et la longueur d'onde  $\lambda$  en pm, on tire de la relation du photon :

$$E = h \cdot \nu$$

Où :

$h$  : est la constante de Planck

$\nu$  : la fréquence de l'onde

La relation pratique :

$$E = 1,24 / \lambda$$

Les énergies requises en contrôle non destructif se situent dans une gamme allant de 50 keV à 20 MeV.

### **III.3.3 Propagation et interaction avec la matière: [23]**

Lorsqu'un faisceau de rayons x pénètre dans un milieu matériel, on constate une diminution progressive de son intensité. Cette diminution du nombre de rayons, l'atténuation du faisceau, est due essentiellement à l'interaction des rayons avec les électrons.

Dans un tel processus, l'énergie perdue se trouve sous deux formes :

Une partie EA est absorbée par le milieu, et une partie ED est diffusée et sort de la matière dans une direction différente de la direction initial. Les phénomènes d'atténuation et d'absorption sont à l'origine des applications et des effets des rayons x.

### **III.3.4 Matériels utilisés:**

#### **III.3.4.1 Les tubes à rayons X: [21]**

Imaginé par Crookes et perfectionné par Coolidge à la fin du siècle dernier, le tube à rayons X est aujourd'hui un tube, en verre ou en céramique sous vide poussé, comportant une cathode émettrice d'électrons par effet thermo-ionique et une anti-cathode encastrée dans une anode refroidie et inclinée, portée à un potentiel élevé. Le champ électrique ainsi créé permet l'accélération des électrons arrachés à la cathode qui viennent frapper la cible et provoquer l'émission du rayonnement ; on récupère généralement celui-ci à travers une fenêtre latérale (Figure III. 8).

À partir de ce principe commun, il existe plusieurs familles de tubes à rayons X ; elles diffèrent par la géométrie du faisceau, la technologie de réalisation et la nature de l'alimentation électrique, et regroupent des tubes délivrant des énergies maximales allant couramment de 100 à 420 kV.

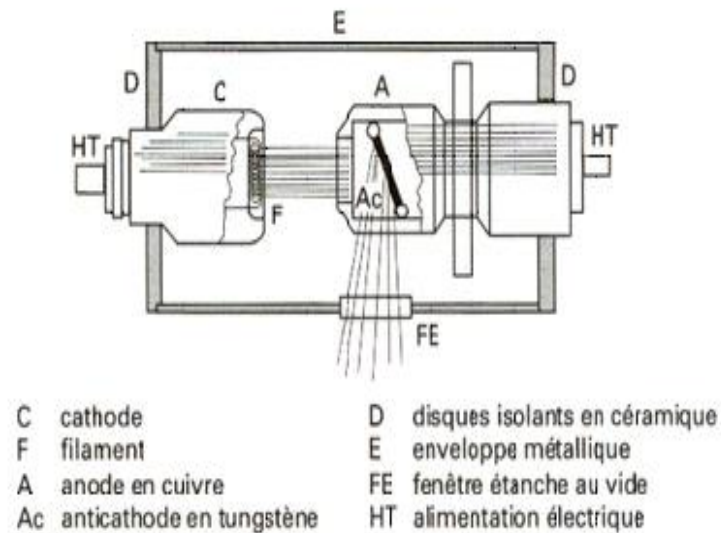


Figure III. 8 :Schéma principe rayon x. [21]

Les tubes sont conçus pour fournir des faisceaux de configuration particulière, directionnels (figure III. 9), faisceaux en cône selon un axe précis, panoramiques c'est-à-dire selon un cône de  $360^\circ$  autour du tube ; cette disposition est bien adaptée au contrôle des soudures de tubes par exemple. Pour les alésages de petits diamètres, on peut utiliser des tubes à anode longue dans lesquels la cible se trouve à l'extrémité d'un tube de petit diamètre. Une option assez récente de tube à rayons X est celle des tubes à micro-foyer pour lesquels la surface d'émission X est réduite à quelques centaines de  $\mu\text{m}^2$ , contre quelques  $\text{mm}^2$  pour les tubes classiques. Sur le plan constructif, les tubes X modernes résultent de compromis entre de nombreux paramètres tels que poids, prix, robustesse, fiabilité, maniabilité, performance de l'alimentation électrique et du refroidissement, stabilité et simplicité des réglages électriques et géométriques. Pour les tubes utilisés en radiographie sur chantier, on utilise généralement des appareils monoblocs, robustes, regroupant dans une même cuve le tube et son alimentation électrique.

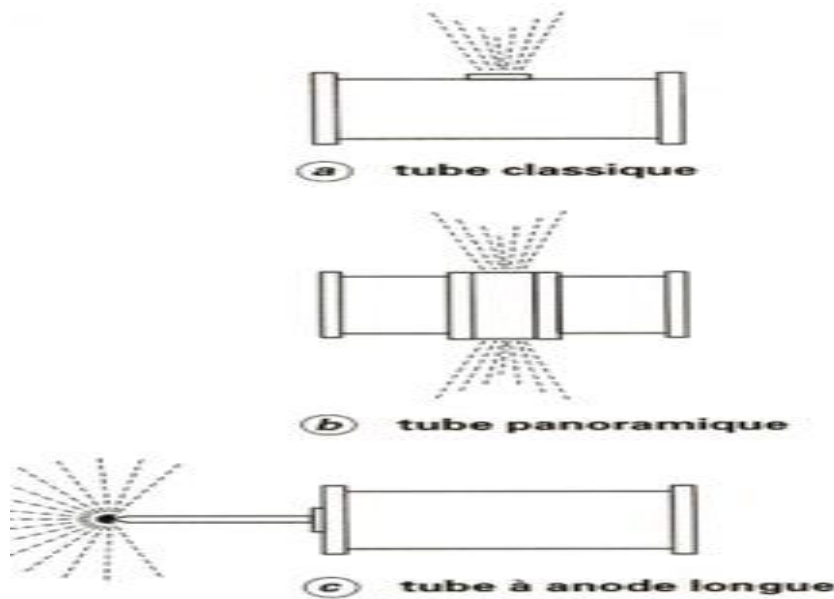


Figure III. 9 : Types de tubes à rayon x. [22]

### III.3.4.2 Le film radiographique:

Les films radiographiques pour la radiographie généralement se composent essentiellement d'une émulsion gélatine contenant des cristaux d'halogénures d'argent sensibles au rayonnement (tels que le bromure d'argent ou de chlorure d'argent). L'émulsion est habituellement appliquée sur les deux côtés d'une base de couleur bleue souple, transparente en couches d'environ 0,012 mm d'épaisseur. Une sous-couche de colle se fixe l'émulsion à la base du film et un revêtement très mince mais ferme l'émulsion pour le protéger contre l'abrasion mineure. L'épaisseur totale du film typique des rayons X est d'environ 0,23 mm. Bien que les films sont faits pour être sensible à des rayons X ou gamma, mais ils sont également sensibles à la lumière visible. Lorsque les rayons X, aux rayons gamma ou de la lumière, frappent le film, une partie des atomes d'halogène sont libérés à partir du cristal d'halogénure d'argent et en laissant ainsi les atomes d'argent seul. Cette modification est d'une si petite qu'elle ne puisse pas être détecté par des méthodes physiques ordinaires et est appelé une " image latente (cachée). Lorsque le film est exposé à une solution chimique (révélateur) les résultats de la réaction à la formation de noir, de l'argent métallique (Figure III. 10). [24]

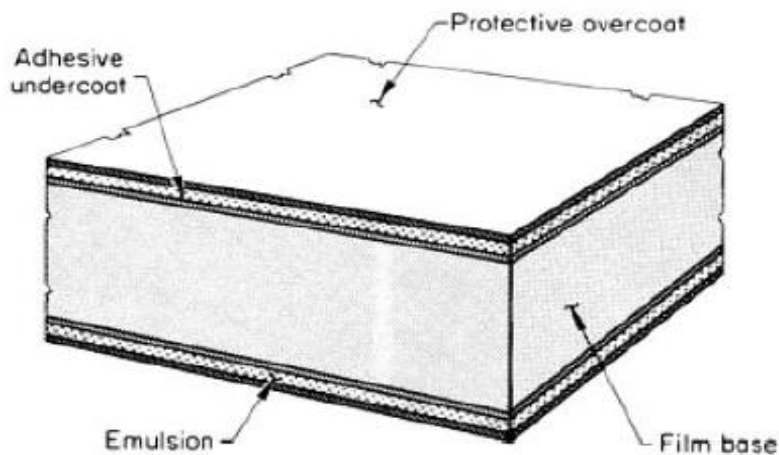


Figure III. 10 : Film radiographique. [24]

### III.3.4.3 La cassette de film :

Les films doivent être protégés de la lumière visible parce que, tout comme les rayons X, la lumière visible est une onde électromagnétique et peut exposer le film.

Les films sont donc placés dans une cassette à l'épreuve de la lumière ambiante. [25]

### III.3.5 Domaine d'application : [26]

La radiographie est utilisée industriellement pour contrôler la santé interne d'une pièce. Elle permet de détecter tout type de cavité ou de matériaux étrangers inclus dans la pièce. Les discontinuités planes sont révélées lorsque le rayonnement est parallèle au plan de l'indication. La taille des discontinuités détectables dépend de l'épaisseur traversée. La sensibilité de la méthode est plus limitée pour des matériaux denses et épais.

La radiographie est utilisée pour le contrôle des soudures ainsi que pour rechercher des imperfections de fonderie. Elle est également très utilisée pour vérifier l'intégrité des structures composites.



### IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure obtenus par le soudage MIG des tôles et l'influence des traitements thermiques de préchauffage sur leur structure et leurs propriétés mécaniques.

### IV.2 Matériau de base :

Le sujet proposé est d'étudier un acier XC38, qui se présentait sous forme d'une tôle dimensions 259 x 170 (mmx mm) et de 8 mm d'épaisseur. D'où les caractéristiques mécaniques de l'acier XC38 [27]:

<b>Rm (Mpa)</b>	<b>Re (Mpa)</b>	<b>A (%)</b>
500-550	245-300	18-19

Tableau IV. 1 caractéristique mécanique de l'acier XC38. [27]

Après L'analyse chimique de matériau qui s'est fait au niveau de la base centrale logistique de Beni Merad –Blida (B.C.L) on a trouvé que c'est un acier XC 10, sa composition chimique est résumée sur le tableau (V. 1)

### IV.3 Présentation de l'acier xc 10 :

L'acierutilisé est un acier XC10. Le symbole XC indique que c'est un acier ordinaire au carbone à 0,093 % de carbone. C'est un acier extra-doux facile à souder il est couramment utilisé pour tôle de carrosserie, feuillard, quincaillerie, pièces de forge

Lacaractéristiquemécanique de cet acier est montrée dans le Tableau suivant :

<b>Rm(Mpa)</b>	<b>Re (Mpa)</b>	<b>A (%)</b>	<b>KCU (J/cm)</b>
340-420	215-350	16-30	100-110

TableauIV. 2 : Caractéristiquemécaniques de l'acier XC 10.

#### IV.4 Présentation du métal d'apport :

Le métal d'apport utilisé pour l'assemblage par soudage bout à bout par le procédé MIG sous protection de mélange de gaz (Argon et CO<sub>2</sub>) dans notre étude est un fil en bobine de dénomination commerciale SG2. Sa composition chimique selon la fiche technique du fournisseur est présentée sur le tableau ci-dessous :

C %	Si %	Mn %
0,08-0,012	0,4-0,6	1,0-1,3

Tableau IV. 3: Composition chimique du métal d'apport (SG2) selon la fiche technique du fournisseur.

#### IV.5 Préparation des échantillons pour le soudage:

##### IV.5.1 étape coupe des tôles :

Le découpage des tôles à étudier est effectué dans l'atelier d'usinage du département de mécanique à l'aide d'une scie à métaux. On a découpé quatre tôles de forme rectangulaires deux de tailles 50 x 70 x 10 (mm x mm x mm) et deux de tailles 209 x 170 x 10 (mm x mm x mm).

##### IV.5.2 Réalisation du chanfrein :

Les chanfreins ont été réalisés à l'aide d'une fraiseuse sur les quatre tôles dans l'atelier de SFMO (société de fabrication machine outils. Moussaoui hallouaya). Un schéma représentatif des tôles est donné sur la fiche de soudure (Figure IV. 2)

##### IV.5.3 Le préchauffage :

Un préchauffage de deux tôles de dimensions 210 x 170 (mm x mm) et d'épaisseur 8 mm à 87° C et deux tôles de dimensions 50 x 170 (mm x mm) et d'épaisseur 8 mm non pas préchauffé.

La température de préchauffage à états calculer selon la formule de carbone équivalent la plus utilisée selon L'institut international de soudure (IIW). [28]

Le carbone équivalent :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15}$$

$$C_{eq} = 0,093 + (0,51)/6 + (0,086 + 0,015)/5 + (0,150 + 0,469)/15 = 0,239$$

Le carbone équivalent compensé :

$$C_{eq.C} = C_{eq} + (1 + 0,005 e)$$

$$= 0,239 \times (1 + 0,005 \times 8) = 0,248$$

Température de préchauffage :

$$TP = 350 \times (\sqrt{C_{eq}}) - 0,25$$

$$= 350 \times (\sqrt{0,248}) - 0,25 = 87^\circ\text{C}$$

On a vérifié la température de préchauffage des tôles en utilisant le thermomètre infrarouge



Figure IV. 1 : Thermomètre infrarouge.

Entreprise Moussaoui /hallouaya

IV.5.4 Les paramètres de soudage :

<b>Fiche de soudage MIG</b>			
<b>Assemblage bord à bord avec chanfrein</b>		non préchauffé	préchauffé
	<b>Gaz</b>	Argon (90%) CO2 (10%)	Argon (90%) CO2 (10%)
	<b>matière</b>	XC 10	XC 10
	<b>Dimensions : L*H*e (mm)</b>	210 x 170 x 8	50 x 170 x 8
	<b>Nature des fils</b>	SG2	SG2
	<b>Tension (V)</b>	18.3	18,3
	<b>Intensité (A)</b>	128	128
	<b>Nombre de passes</b>	2 4	
	<b>Vitesse du fil (mm/min)</b>	5	5

Figure IV. 2 : fiche de soudage des tôles

### IV.5.5 Exécution du soudage :

Le soudage s'est fait au niveau d'atelier de soudage de **SFMO** (société de fabrication machine outils. Moussaoui hallouaya) en respectant les étapes suivantes :

- Nettoyage des bords pour éliminer les graisses et les huiles qui pourraient être déposées suite aux différentes opérations d'usinage.
- Fixation des bords à souder par la réalisation de points de soudure sur un support métallique fixe
- Prévoir d'importants mouvements de la pièce, dus au retrait ou aux déformations
- Souder selon les paramètres de la spécification. Figure IV. 3

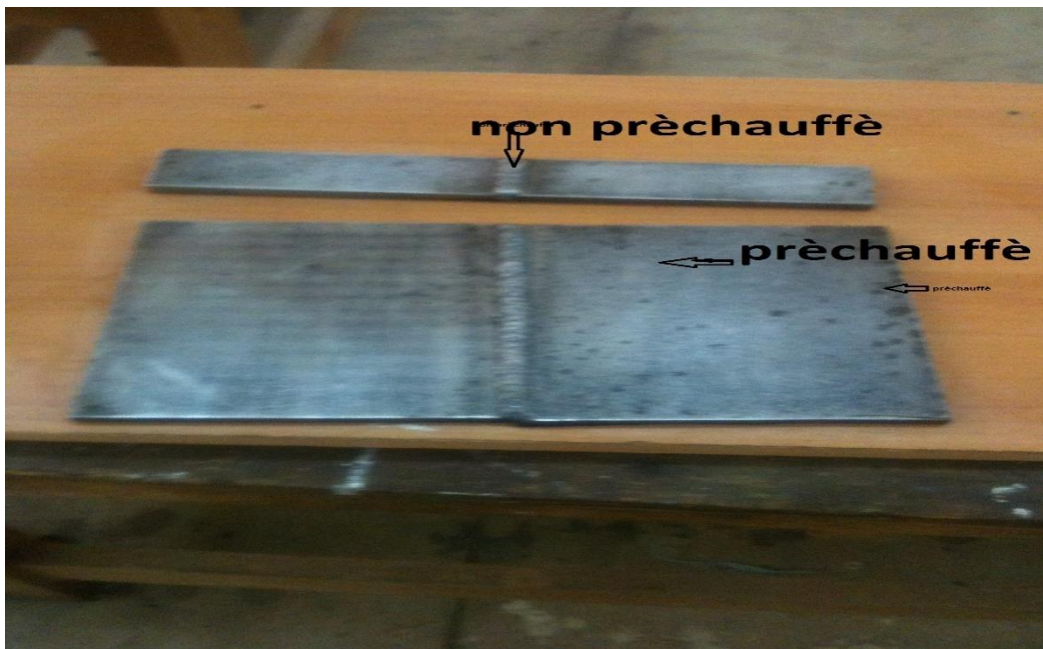


Figure IV. 3 : Les Tôles soudés.

### IV.6 examen macrographique :

L'attaque chimique d'un échantillon pour révéler la structure macrographique fait apparaître entre les zones constitutives de la soudure qui se manifestent par intensités d'attaque ou coloration différentes les unes des autres. Ces différences traduisent les variations de constitution et de structure engendrées par l'opération de soudage.

De plus l'examen macrographique fournit des informations sur les anomalies (défauts) géométrique, compte tenu du renseignement qu'il fournit l'examen macrographie des soudures sont utilisés pour diverses raisons.

### IV.6.1 Examens Métallographique :

L'examen métallographique a pour principal but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. Pour obtenir ces surfaces une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons jusqu'à l'attaque chimique. Nous allons détailler chacune de ces opérations.

#### IV.6.1.1 Découpage des échantillons :

De chaque éprouvette soudée nous avons prélevé à l'aide d'une coupe transversale au cordon de soudure (à froid) un échantillon de dimensions 80x5 mm et d'épaisseur 8 mm.

#### IV.6.1.2 Enrobage :

Pour notre expérience, un enrobage à froid a été utilisé. Ce procédé ne nécessite pas de mise en pression. Il consiste à enrober un échantillon de la matière dans une résine en polyester dans un moule récupérable pour permettre la fixation dans un porte-échantillon ou de faciliter sa prise en main lors du polissage manuel.

- L'enrobage se fait avec une machine **ENROBEUSE**.

L'expérience s'est déroulée au niveau de laboratoire S.D.M de Département de Génie Mécanique à l'Université « SAAD DAHLAB » de BLIDA.



Figure IV. 4 : Enrobeuse STREURS.



**IV.6.1.3 Le polissage :**

Le polissage effectué à l'aide d'une polisseuse avec des papiers abrasif, la granulométrie des papiers utilisés est respectivement de : 280, 400, 600,800 et 1200, cette opération est accompagnée par un refroidissement à l'eau pour éviter l'échauffement des échantillons.



Figure IV. 5 : Polisseuse.

**IV.6.1.4 Le polissage de finition :**

Le polissage est accompli sur un autre disque en feutre comprimé en ajoutant de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) pour avoir un aspect miroir.

Enfin un rinçage à l'eau pour éliminer toute particule solide retenue par les échantillons.



Figure IV. 6 : Polisseuse de finition.

#### IV.6.1.5 L'attaque chimique :

Le réactif est employé en métallographie principalement pour observer la microstructure d'un échantillon approprié à l'attaque doit avoir une surface bien plane et polie.

Les différentes microstructures sont mises en évidence par une attaque chimique ou le réactif est le **nital** composé de 4cl d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$  et de 96cl d'alcool éthylique avec un temps d'attaque qui varie entre 5 secs et 2 minutes.

#### IV.6.1.6 Observation microscopique :

Nous avons procédé à l'analyse micrographique par le moyen du microscope optique.

Après le polissage et l'attaque chimique l'observation micrographique a été faite par un microscope optique de type **Carl Zeiss** (Figure IV. 7) avec un agrandissement de **(20 à 100)**.

Ce microscope s'accompagne d'une caméra, reliée à l'écran d'un ordinateur permettant la capture de photos de la structure observée après avoir choisi la surface à photographier. L'avantage de la microscopie optique, autre sa grande facilité d'utilisation, est permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Les micrographies optiques ont été réalisées dans le sens perpendiculaire au flux de diffusion des éléments afin de montrer l'effet du profil de l'élément diffuser sur la microstructure.



Figure IV. 7 : Microscope optique Carl Zeiss.



### IV.7 Méthodes d'essais mécaniques :

Le but de ces essais est de contribuer à l'évaluation de la qualité d'un assemblage, de caractériser l'interaction entre un matériau et un procédé de soudage, et de fournir des données quantitatives sur le comportement des assemblages soudés.

#### IV.7.1 Essai de traction :

Ces essais ont été réalisés au **G.T.P** (Grands Travaux Pétroliers deReghaia) avec une machine d'essais hydraulique de marque INSTRON (Figure IV. 9) pilotée par le software Merlin® d'une capacité de 1500 kN de capacité. Les essais sont faits avec une vitesse de déformation constante.

De chaque tôle on a prélevé des éprouvettes, qui ont été par la suite usinées au atelier de la base centrale logistique de Beni Merad –Blida (B.C.L) pour obtenir des éprouvettes de traction normalisées selon la norme **ASTM A 370** (voir figure IV. 8). [29]

Les principales caractéristiques mesurées à partir de ces essais sont : la limite d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement.

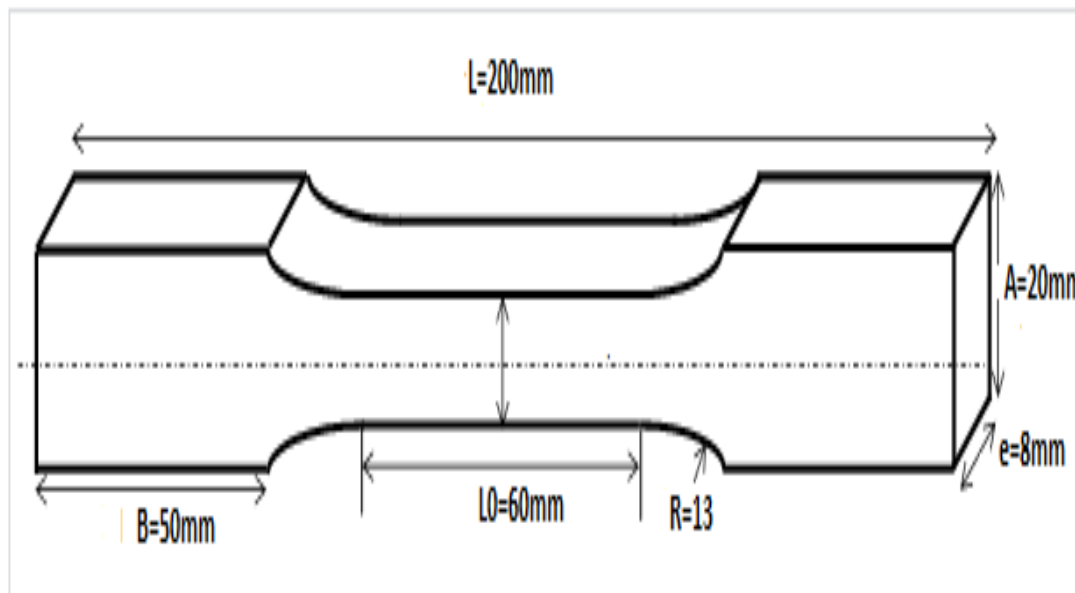


Figure IV. 8 : Dimensions de l'éprouvette de traction selon ASTM A 370.



Figure IV. 9 : Machine hydraulique de traction.

#### IV.7.2 Essai de la micro-dureté :

L'essai de dureté utilisé pour notre cas est l'essai Vickers. Il consiste à évaluer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, sous une charge de 200g, et à mesurer la diagonale de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge.

L'essai s'est déroulé au **CDTA** (centre de développement des technologies avancées de Baba Hassen). Figure IV.11 : Microduromètre.

Nous avons effectué un essai de micro-dureté sur les éprouvettes soudées. La procédure s'est effectuée tout en balayant le métal de base, la zone affectée thermiquement et la zone fondue avec un pas de 2 mm comme la montre la Figure IV. 10 :

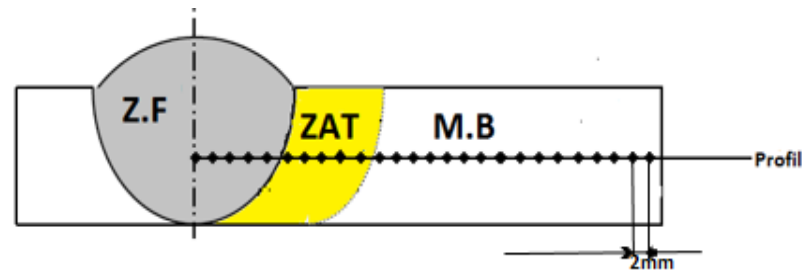


Figure IV.10: Filiation de micro-dureté.



Figure IV.11 : Microduromètre : CDTA (centre de développement des technologies avancées de Baba Hassen)

### IV.7.3 Le contrôle par radiographie x :

Le contrôle par radiographie de rayon x permet la détection des hétérogénéités, comme les fortes ségrégations chimiques ou les inclusions, ainsi que les défauts de continuité, comme les défauts volumiques (soufflures, porosités, retassures, cavités ...) et les défauts bidimensionnels (manque de liaison dans le cas des soudures).

L'essai a été réalisé au CSC (centre de soudage et de contrôle de bous mail).

### V.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude des différents résultats relatifs à la micrographie et aux essais mécaniques. Le chapitre est structuré comme suit :

En premier lieu, on fait une vision à la micrographie réalisée par un microscope optique pour avoir des images micrographiques montrant les différentes phases pour l'échantillon préchauffé et non préchauffé.

Ensuite interpréter les résultats obtenus à l'aide des essais mécaniques : (micro-dureté, radiographie x et traction).

### V.2 Composition chimique du métal de base :

L'analyse chimique de notre matériau s'est fait au niveau de **la base centrale logistique de Beni Merad –Blida (B.C.L)** les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau ci-dessus

<i>élément</i>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
<b>%</b>	0,093	0,155	0,51	0,013	0,022	0,086	0,150	0,015
<i>élément</i>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Co</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>
<b>%</b>	0,036	0,469	0,028	<0,0005	<0,0040	<0,0010	0,024	<0,0020
<i>élément</i>	<b>Mg</b>	<b>B</b>	<b>Sb</b>	<b>Sn</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Bi</b>	<b>Ta</b>
<b>%</b>	<0,0005	0,0026	0,052	0,023	0,011	0,037	<0,0015	<0,010
<i>élément</i>	<b>Ca</b>	<b>Ce</b>	<b>Zr</b>	<b>La</b>	<b>Se</b>	<b>N</b>	<b>Fe</b>	
<b>%</b>	0,0020	<0,0020	<0,0015	<0,0005	<0,0020	0,022	98,2	

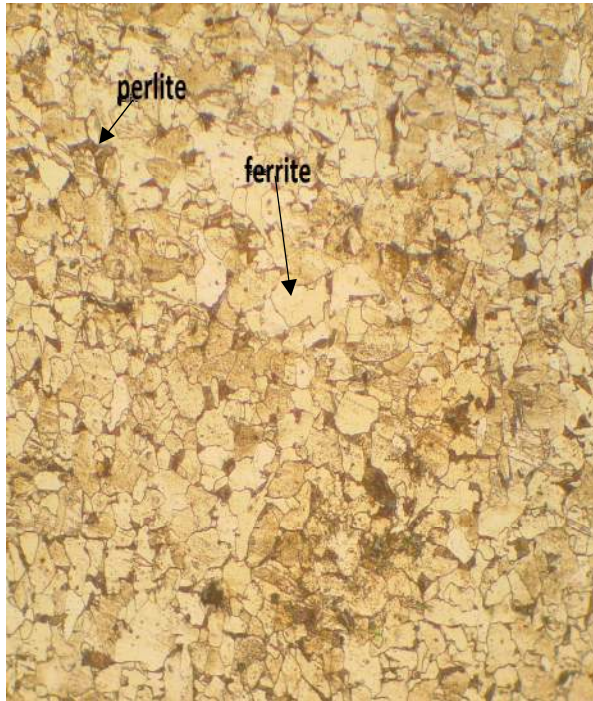
TableauV. 1 : Composition chimique de l'acier XC10 : **base centrale logistique de Beni Merad –Blida (B.C.L)**

### V.3 examen micrographique :

Des micrographies représentatives prises dans les différentes zones du cordon de soudure tout sont présentées ci-dessous.

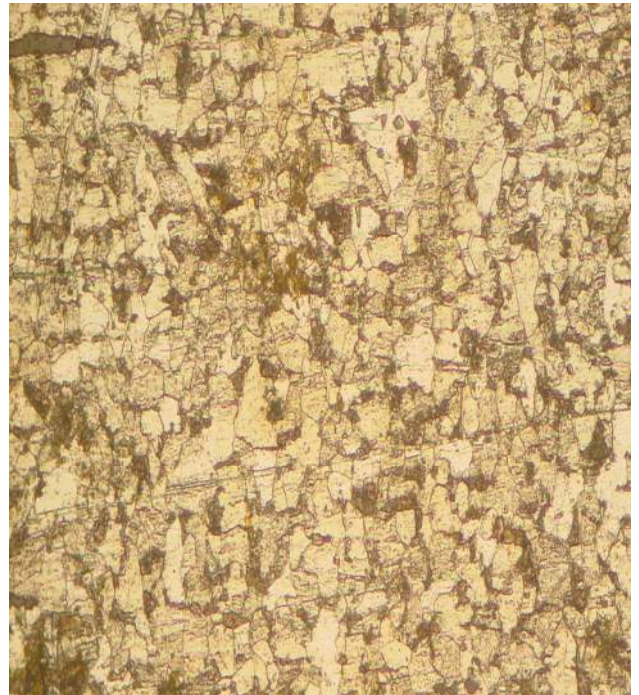


A



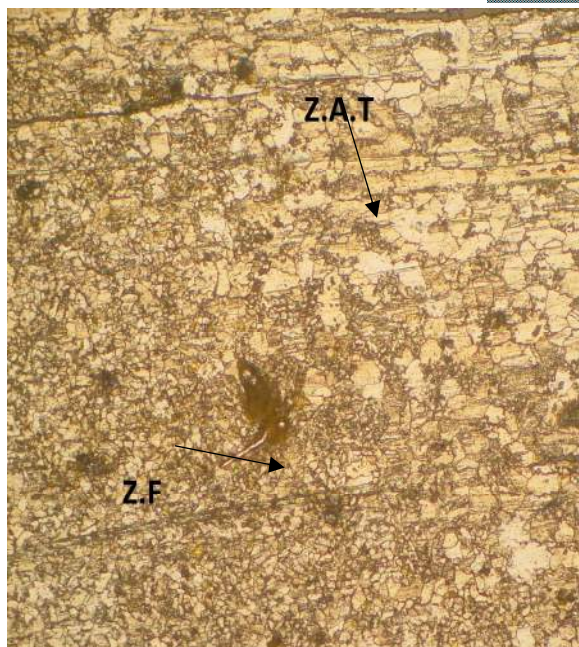
M.B X 500

B



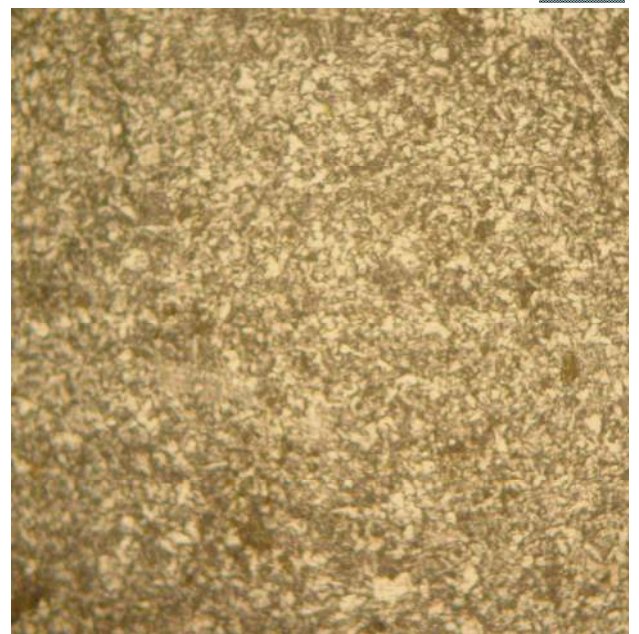
Z.A.T X 500

C



Z.A.T + Z.F X 500

D



Z.F X 500

Figure V. 1 : Micrographie de l'échantillon non préchauffé



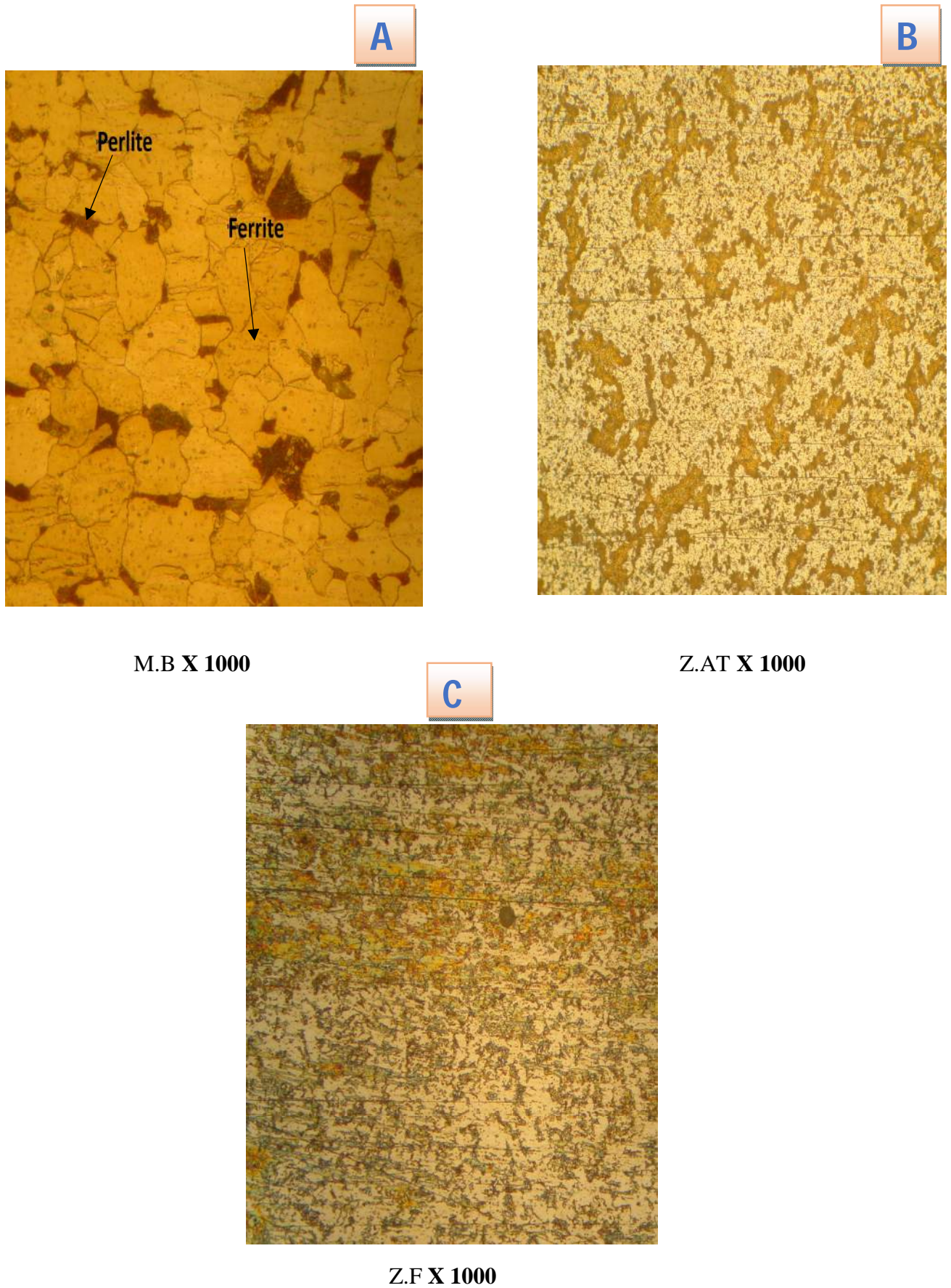


Figure V. 2 : Micrographie de l'échantillon préchauffé

Le métal de base, présente une structure ferrito-perlitique (Figure V. 1 A et V. 2.A).

On constate d'après la micrographie de la ZAT, que la taille des grains augmente légèrement et on observe ainsi que leurs formes est polygonale (dans le même traitement). (Figure V. 1 B)

Dans la zone fondue : représente une zone de mélange du métal fondu et du métal d'apport

#### **V.4 Examen macrographique :**

Les macrographies des tôles (Figures V.3 à V.4) révèlent les différentes zones du joint soudé.

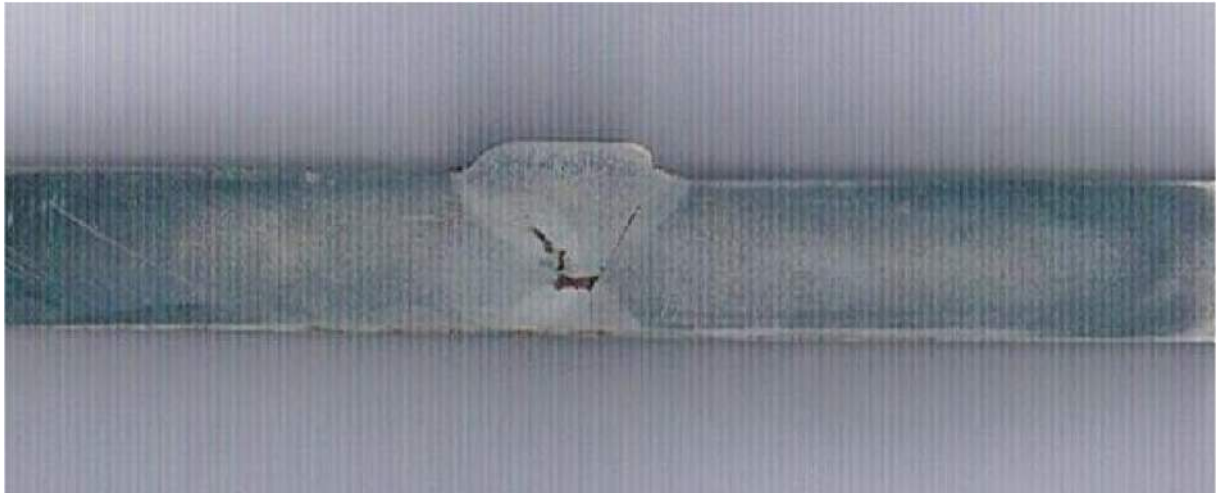


Figure V. 3 : macrographie de la soudure de l'échantillon non préchauffé NP



Figure V. 4 : macrographie de la soudure de l'échantillon préchauffé P

Les photos de la macrographie de l'échantillon non préchauffé et l'échantillon préchauffé (Figure V. 3 et Figure V.4) révèle qu'on a une soudure homogène ainsi les différentes zones du joint soudé et l'existence des défauts de manque de fusion.

### V.5 Essai de micro-dureté :

La figure (V. 5) montre les résultats obtenus de la micro-dureté en fonction de la position. Les mesures ont été prises selon un profil allant du métal de base vers le centre de la zone fondue en balayant bien sur la zone affectée thermiquement.

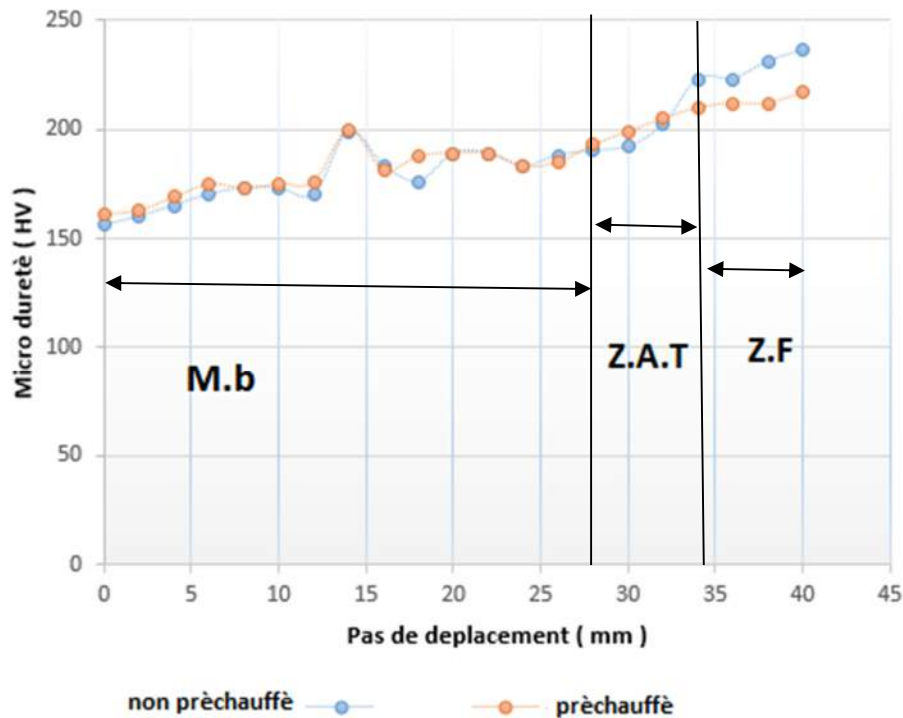


Figure V. 5 : Evolution de la micro-dureté en fonction de déplacement\*

On remarque que :

-Après avoir effectué des filiations de microdureté sur les sections transversales des soudures, on constate que la courbe de dureté de l'éprouvette préchauffée coïncide et se rapproche de la courbe de dureté de l'éprouvette non préchauffé.

- La dureté fonction du pas de déplacement ne varie que légèrement : la variation à l'interface de chaque zone (Métal de base/ zone affectée thermiquement, et zone affectée thermiquement/ zone fondue) est de l'ordre  $\Delta HV \leq 50 HV$



\* : voir annexe pour valeurs de micro-duretés

**V.6 Essai de traction :** Les graphes suivant montre la variation des propriétés mécaniques, la résistance à la traction  $R_m$  et la limite d'élasticité  $R_e$  en fonction de l'allongement  $A\%$  de l'échantillon non préchauffé et préchauffé.

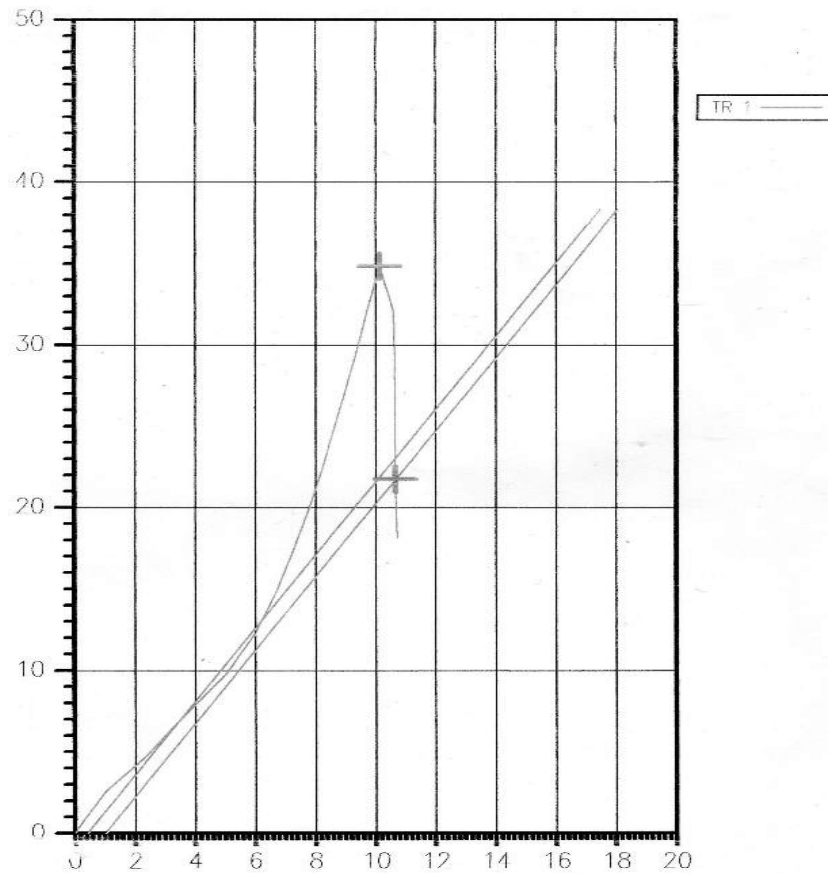


Figure V. 6 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette non préchauffé NP1



Figure V. 7 : l'éprouvette non préchauffé NP1 après rupture

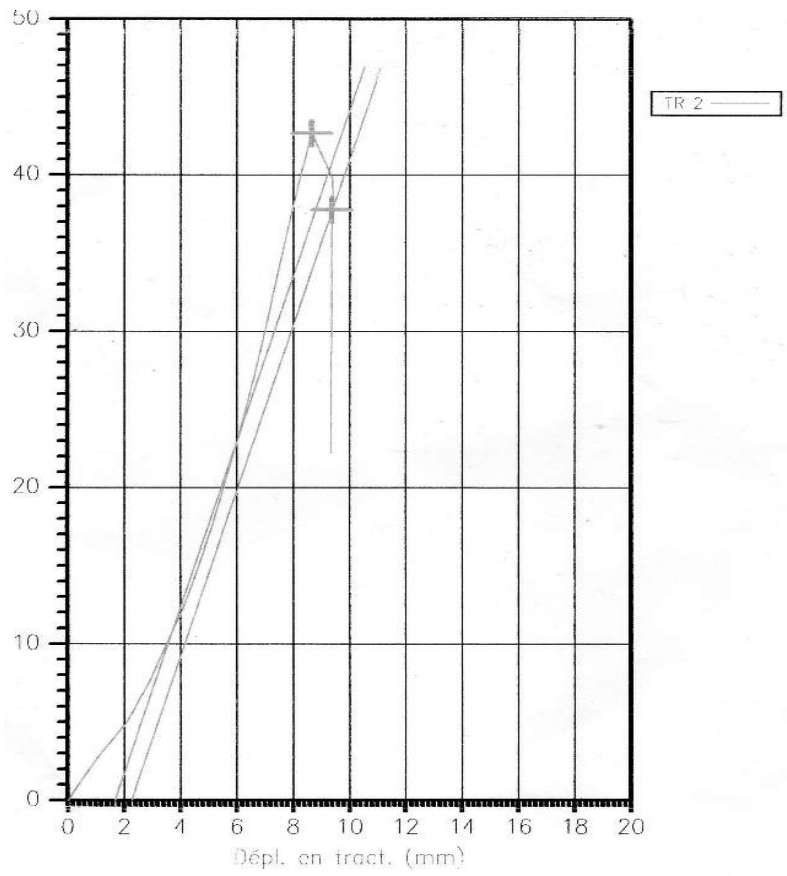


Figure V. 8 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette non préchauffé NP2



Figure V. 9 : l'éprouvette non préchauffé NP2 après rupture

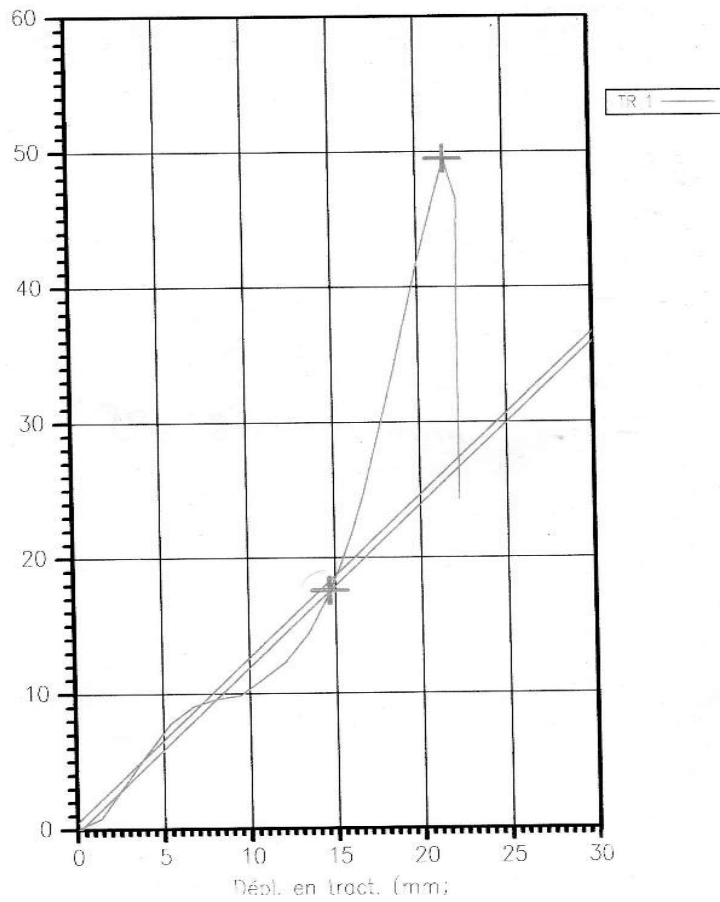


Figure V. 10 : courbe de charge en fonction de l’allongement de l’éprouvette préchauffé P1.



Figure V. 11 : l’éprouvette préchauffée P1 après rupture

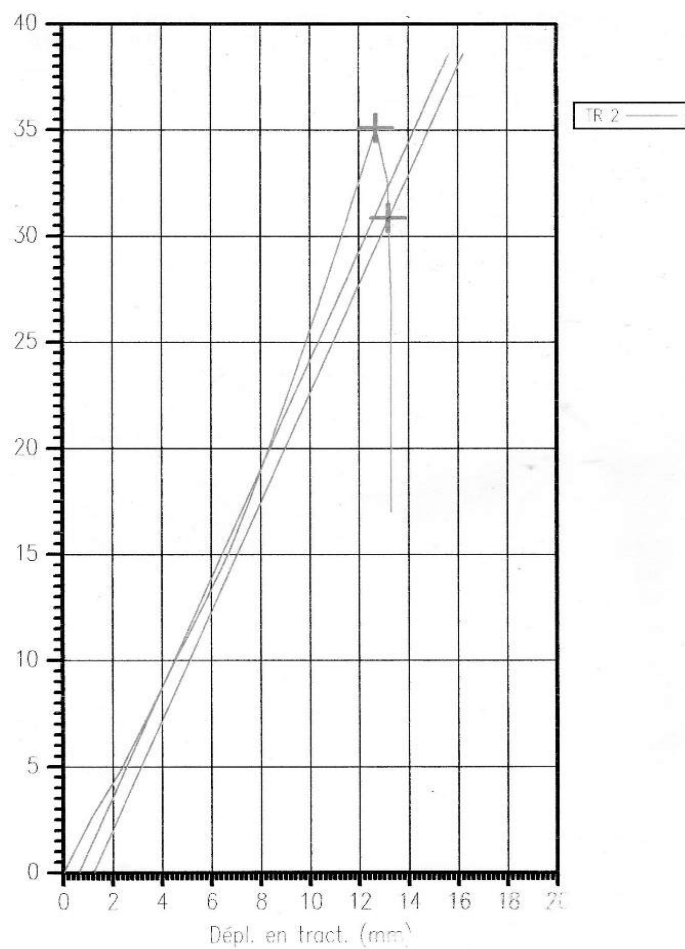


Figure V. 12 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette préchauffé P2



Figure V. 13 : l'éprouvette préchauffée P2 après rupture

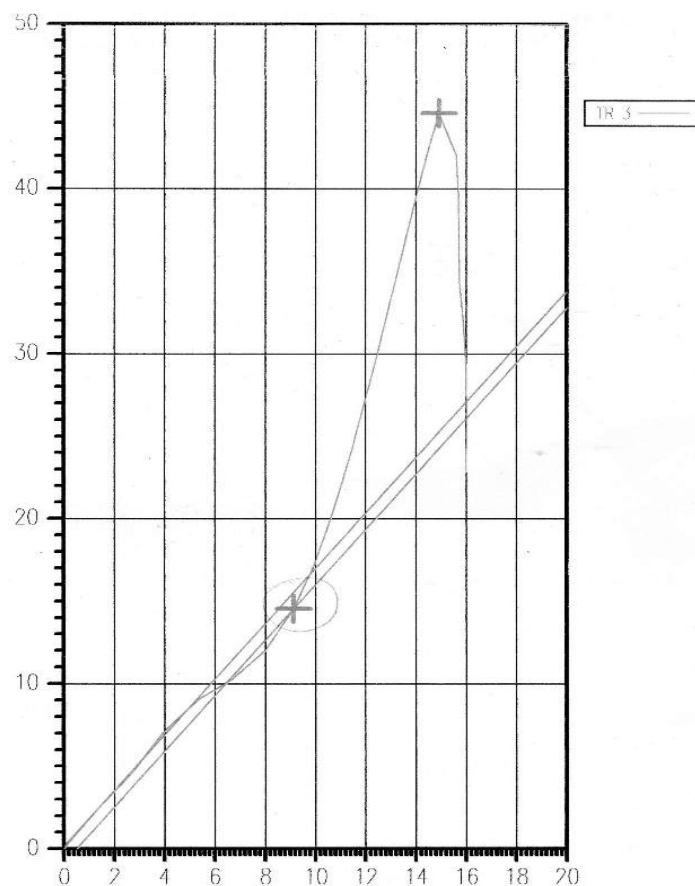


Figure V. 14 : courbe de charge en fonction de l'allongement de l'éprouvette préchauffé P3



Figure V. 15 : l'éprouvette préchauffée P3 après rupture.

Les résultats de l'essai de traction est résumé sur le tableau suivant :

L'échantillon	N °	Rm (Mpa)	Ar (%)
Non préchauffé	NP1	264,60	27
	NP2	315,53	29
préchauffé	P1	354,76	24
	P2	249,99	30
	P3	301,84	26

Tableau V. 1 résultats de l'essai de traction

-On remarque que la résistance mécanique varie de 264 Mpa à 355 Mpa.

-On remarque que l'allongement à la rupture varie de 24 % à 30 %.

Les résultats de la courbe de l'éprouvette non préchauffé NP1 et l'éprouvette préchauffé P2 semble présente des valeurs trop différents des autres résultats ceci peut être attribuée aux défauts que l'on peut trouver dans l'acier (porosités, manque de fusion après soudage ...).

### V.7 Radiographie par rayon x :

Après avoir le film sous forme cliché il était placé sur un écran éclairé dont la luminosité (luminance) est appropriée à la densité du film. Le film est masqué pour éviter l'éblouissement provoqué par la lumière émanant du pourtour du film ou des zones à faible densité photographique.

Le résultat obtenu par la radiographie x de deux échantillons est montré sur la figure V. 16 et V.17 :



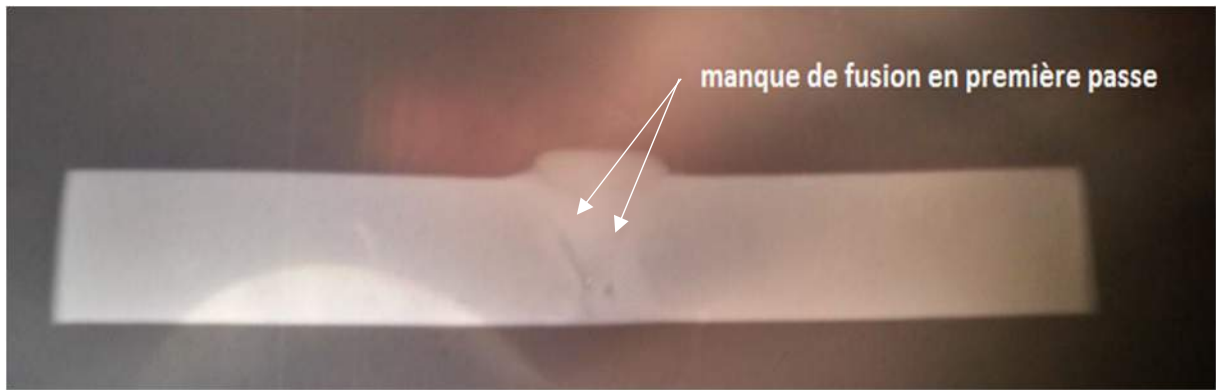


Figure V. 16 : Image radiographique d'échantillon non préchauffé



Figure V. 17 : Image radiographique d'échantillon préchauffé

L'image radiographique pour l'échantillon non préchauffé révèle une ligne droite et un petit point de densité plus sombre situé entre le dépôt de soudure et la surface du joint c'est un défaut de manque de fusion en première passe.

Pour l'échantillon préchauffé l'image radiographique révèle une zone irrégulière de densité plus sombre sur la surface externe du joint de soudure et sur le bord de l'arête c'est un défaut de caniveau externe, ainsi que deux petites lignes droites plus sombre situées au centre de la surface et entre le dépôt de soudure et la surface du joint soudé qui représente un manque de fusion entre passes.

## Conclusion générale

---

Dans notre mémoire nous avons étudié l'acier XC10, du point de vue l'influence des traitements thermiques de préchauffage sur la structure et les propriétés mécaniques.

L'examen macrographique de nos échantillons soudés révèle une soudure homogène avec des défauts liés au manque de fusion.

L'examen micrographique montre une structure ferrito-perlitique pour le métal de base et une structure d'où la taille des grains et légèrement plus grand de forme polygonales et enfin une zone fondu où se mélange le métal de base et le métal d'apport.

L'essai de micro-dureté a révélé que la filiation de micro-dureté des échantillons préchauffé et non préchauffé coïncident, ceci peut être attribué au fait que le traitement de préchauffage n'a pas d'effet sur notre acier.

La variation de dureté en fonction de pas de déplacement reste faible, nous pouvons dire que notre soudure a permis de conserver la dureté pratiquement similaire sur toute les zones (une variation de moins de 50 HV).

L'essai de traction a permis de récolter les propriétés mécaniques suivantes :

-R<sub>m</sub> qui varie de 246 Mpa à 355 Mpa.

-A<sub>r</sub> qui varie de 24 % à 30 %.

Les différentes valeurs de R<sub>m</sub> obtenus de l'échantillon préchauffé (P2) et l'échantillon non préchauffé (NP1) sont très faible ceci peut être attribué au fait que le traitement thermique utilisés n'a pas d'influence sur les propriétés mécaniques.

Dans notre acier les deux résultats des courbes de l'échantillon non préchauffé (NP1) et l'échantillon préchauffé (P2) s'écartent des résultats peuvent être liée à des défauts avant et après soudure.



## **Conclusion générale**

---

Les résultats de la radiographie ont révélé des défauts de manque de fusion dans les deux types d'échantillons avec un caniveau externe à l'échantillon préchauffé.

On peut conclure que notre acier d'où le pourcentage de carbone est de 1% est parfaitement soudable.

---

## Liste des références bibliographie

- [1]: « Metallurgy of welding » par Lancaster, J. F.
- [2]: « Contribution à l'évaluation du champ thermique relatif à l'arc électrique de soudage » par Amar Boutaghane.
- [3]: « Le soudage par fusion Volume 1 » par Cornu, Jean.
- [4]: « Soudage » par R. Varisellaz
- [5]: « Métallurgie et mécanique du soudage » par Régis Blondeau.
- [6]: « Procèdes de Soudage à l'arc » par Chantal Paquet.
- [7]: « Soudage » par commission scolaire de la Beauce-et chemin.
- [8]: « Guide du soudage MIG » par Klass Weman, Gunnar Lindén
- [9]: « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc » par Jean-Pierre Planckaert
- [10]: USINOR ‘‘approche sur la soudabilité métallurgique des aciers ‘’, RAPPORT USINOR-JPJ-09/85-438VL.
- [11]: H.Granjon. ‘‘Bases métallurgique du soudage’’, 2<sup>ème</sup> Edition publication du soudage et de ses applications, 1995.
- [12]: [http://esabsp.esab.net/templates/docOpen.asp?file=files\\_\\_Handbooks\\_\\_Welding%20Consumables\\_\\_XA00086840\\_FR.pdf](http://esabsp.esab.net/templates/docOpen.asp?file=files__Handbooks__Welding%20Consumables__XA00086840_FR.pdf)
- [13]: «Comprehensive materials processing’’ par M.S.J Hashmi.
- [14]:<http://ww2.cnam.fr/physique/DOCUMENTS/POLYS/PHR103>.
- [15]: « welding : principles and applications’’ par Larry F, Jeffus
- [16]: [www.esab.com](http://www.esab.com)
- [17]: « comprehensive materials processing’’ par M.S.J Hashmi.
- [18]: « Soudage et assemblage » par comité csmofmi.
- [19]: « welding defect, cause and correction » par Leigh Baughurst and Grant Voznaks)).

---

[20]: metallurgy and mechanics of welding by Regis Blondeau.

[21]: « technique de l'ingénieur r1400 » Jacques DUMONT-FILLON.

[22]: « Technologie des métaux, contrôles et essais des soudures » par Michel bramât

[23] : (cours rayon x par EPFL « École polytechnique fédérale de Lausanne)

[24]: <http://www.allbookez.com/pdf42y7ln>.

[25] : [https://cours.etsmtl.ca/mec761/Documents/Acetates/07\\_Rayon%20X.pdf](https://cours.etsmtl.ca/mec761/Documents/Acetates/07_Rayon%20X.pdf)

[26] : radiographie par rayon x (RT) par comité de CND cofrend

[27] : <http://www.metaux-detail.com/pdf/acier/xc38.pdf>

[28] : « Lexique de construction métallique et de résistance des matériaux » par EUROLLES

[29] : « tensile testing » par Joseph R. Davis.

# Annexe A

## Annexe A.1 :

<b>Pas de déplacement (mm)</b>	<b>Micro-dureté de l'échantillon non préchauffé (HV)</b>	<b>Micro-dureté de l'échantillon préchauffé (HV)</b>
0	156	161
2	160	163
4	165	169
6	170	175
8	173	173
10	173	175
12	170	176
14	199	200
16	183	181
18	176	188
20	189	189
22	189	191
24	183	183
26	188	185
28	190	193
30	192	199
32	202	205
34	223	210
36	223	212
38	231	212
40	236	217

Tableau : résultats de micro-dureté