

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERY TIZI-OUZOU**

**FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION**

**Département génie mécanique**



***MEMOIRE DE FIN D'ETUDES***

En vue de l'obtention du diplôme de Master

**Spécialité** : Génie mécanique

**Option** : Génie des matériaux

***Thème***

**Soudage aluminothermique des rails**

**Encadreur :**

*-Mr. FILALI Said*

**Réalisé par :**

*- Mr. AKEB Amar*

*- Mr. RAHEM Slimane*

***Promotion 2022/2023***

## **Résumé :**

L'amélioration et la fiabilité des structures ferroviaire soudées en service exige une compréhension effective des phénomènes, métallurgiques physiques et mécaniques mis en jeu. L'assemblage soudé est fortement sollicité fortement en mouvement dynamique, il serait donc judicieux de choisir un procédé de soudage adéquat. Selon les expériences réalisées, il s'est avère que l'utilisation du procédé aluminothermique offre des soudures aux structures fortement bauxitiques qui répondent favorablement aux problèmes d'usure et de ductilité. La qualité de la soudure aluminothermique dépend entre autre de la préparation.

L'exécution répondant aux étapes technologiques préétablies, de la charge des mélanges réactifs et de la qualification opérateurs prédéterminent la tenue des assemblages en service.

Souvent les soudures aluminothermiques sont confrontées aux problèmes de fissuration à chaud nécessitant de choisir des aciers à faible teneurs en s et p, et aussi un préchauffage à prévoir pour un soudage fiable des rails et ce pour éviter la fragilité éventuelle.

### **Mots clés :**

Rail, aluminothermique, soudabilité, réaction chimique, enthalpie standard, aluminium, fer, oxydes, zone fondue (ZF), zone thermiquement affecter (ZAT), ferrite, perlite, bainite, martensite.

## **Abstract :**

The improvement and reliability of welded railway structures in service requires an effective understanding of the physical and mechanical metallurgical phenomena involved. The welded assembly is highly stressed in dynamic movement; it would therefore be wise to choose an appropriate welding process. According to the experiments carried out, it turns out that the use of the aluminothermic process offers welds with highly bauxitic structures which respond favorably to the problems of wear and ductility. The quality of the aluminothermic weld depends, among other things, on the preparation.

The execution meeting the pre-established technological stages, the load of the reactive mixtures and the operator qualification predetermine the performance of the assemblies in service.

Often aluminothermic welds are faced with problems of hot cracking requiring the choice of steels with low s and p contents, and also preheating to be provided for reliable welding of the rails and this to avoid possible fragility.

Rail, aluminothermic, weldability, chemical reaction, standard enthalpy, aluminum, iron, oxides, molten zone (ZF), thermally affected zone (HAZ), ferrite, pearlite, bainite, martensite.

# Remerciements

# *Remerciement*

*Nous remercions le Dieu tout puissant qui nous a donné la santé, la force, le courage et la Patience durant ces années de formation.*

*Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier sincèrement notre promoteur Mr FILALI.*

*Nous remercions vont aussi à l'endroit des membres de l'administration de L'UNIVERSITE MOULOUD MAMMERIE « BASTOS » ainsi que tous les professeurs de département génie mécanique spécialité génie des matériaux.*

*Nous remercions l'entreprise « ANESRIF » qui nous a acceptés pour le stage pratique et tous les travailleurs de l'anesrif.*

*Nous remercions les membres du jury qui nous ont honorés en acceptant d'évaluer notre travail.*

*Enfin, nos sincères remerciements sont adressés à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**Dédicaces**

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère, qui a toujours été présente pour m'encourager et me donner de la force pour ma réussite, de par son amour, tous ses sacrifices et ses précieux conseils, pour tout son soutien et sa présence dans ma vie. Qu'elle reçoit dans ce modeste travail, l'expression de mes sentiments les plus sincères et mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui j'espère va trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privation pour m'aider à avancer dans la vie. Père ! merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venus de toi.*

*A mes petits frères Mohamed Amine et Younes qui sont toujours pour moi une source de motivation.*

*A toute ma famille paternelle et maternelle.*

*Mon binôme RAHEM Slimane.*

*En particulier Mr FILALI qui nous a suivi pas à pas et contribuer à l'élaboration de ce mémoire. Il nous a donné une connaissance que je considère un fruit qui ne mourra jamais.*

*Ainsi que tous les professeurs de département génie mécanique spécialité génie des matériaux.*

*A tous mes amis*

*Merci à tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce travail.*

**AMAR**

## *Dédicace*

*A mes chers parents qui m'ont toujours encouragée, pour leurs sacrifices, leurs soutiens et leurs précieux conseils durant toute ma vie. Que Dieu vous bénisse, vous garde en bonne santé et vous prête longue vie, je vous aime.*

*A mes chères sœurs qui représentent les personnes les plus importantes dans ma vie et qui m'ont toujours soutenue, je ne saurai traduire l'amour que j'ai pour vous.*

*À toutes ma famille, à mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines,*

*A mon binôme et amie Amar, qui a partagé les bons comme les moments difficiles tout au long de ce laborieux parcours, je ne saurai jamais te remercier ainsi que ta famille.*

*A mes chers amis qui me rendent la vie plus belle,*

*Slimane.*

## **Sommaire**

## Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....1

### *Chapitre I:Generalité sur les aciers*

Introduction .....	3
I. Définition de l'acier .....	3
I.1. Les types d'acier.....	4
I.1.1. Acier au carbone.....	4
I.1.2. Acier allié .....	4
I.1.3. Acier à outils.....	5
I.1.4. Acier inoxydable.....	5
I.2. Structure des aciers.....	5
I.2.1. Phases et structures des aciers .....	6
I.3. Classification des aciers.....	11
I.3.1 Classification en fonction de leur composition chimique.....	11
I.3.2 Classification en fonction de leurs traitements thermiques .....	11
I.3.3 Classification en fonction de leurs microstructures .....	11
I.3.4 Classification en fonction de leurs résistances .....	11
I.3.5 Classification en fonction de leurs applications .....	12
Introduction.....	13
II.1. Définition de soudage.....	13
II .1.1. Historique.....	13
II .1.2. Domaine d'application du soudage .....	14
II.1.3. Types de soudures .....	14
II.2. Procédés de soudage .....	16
II.2.1 Procède de soudage à l'arc à l'électrode enrobé (SMAW) .....	16
II.2.2 Procèdes de soudage semi-automatique MIG-MAG FCAW .....	18
II.2.2.1. Soudage MIG (Métal Inert Gas ).....	18
II.2.2.2 Soudage MAG ( Metal Active Gas ) .....	19
II.2.2.3 Procède de soudage TIG(GTAW).....	20
II.2.2.4 Procède de Soudage à Gaz (FO) : .....	21
II.2.2.5 Procède de soudage par friction (FSW).....	22
II.2.2.6 Procède de soudage aluminothermique (TW) .....	24

II.3. Différentes parties d'une soudure .....	25
II.3.1 Zone fondue (ZF) .....	25
II.3.2 Zone affectée thermiquement (ZAT) .....	26
II.3.3 Zone de liaison .....	26
II.3.4 Métal de base.....	26
II.4. Classification des défauts de soudures .....	27
II.4.1. Fissures.....	27
II.4.1.1 Fissuration à chaud.....	27
II.4.1.2 Fissuration à Froid.....	28
II.4.2. Défauts des cavités .....	29
II.4.2.1 Soufflures .....	29
II.4.3. Défauts des retassures .....	30
II.4.3.1 Inclusions .....	30
II.4.4. Morsures et Caniveaux.....	32
II.4.5. Manque de pénétration .....	32
II.4.6. Manque de fusion (collage).....	33
II.4.7. Défauts de forme du joint du cordon.....	34
II.4.7.1 Défauts de géométries des cordons .....	34
II.4.7.2 Défaut d'alignement :.....	34
II.4.7.3 Défauts angulaires .....	34
II.4.8. Défauts des projections .....	34
II.4.9. Facteurs exogène favorisant les défauts de soudage .....	35
Introduction .....	37
III.1. Rail.....	37
III.2. Différents types des rails.....	38
III.3 Composition chimique de la nuance de rail R260.....	39
III.4. Rôles métallurgiques des éléments chimiques.....	40
III.5. Procèdes et Méthodes de soudage des rails .....	42
III.5.1 Soudage à l'arc en bain de fusion (en coffrage).....	42
III.5.2 Soudage bout à bout par étincelage.....	42
III.5.3 Soudage aluminothermique.....	43
III.5.3.1 Processus de soudage aluminothermique.....	43
III.5.3.2 Composition chimique de la soudure (zone fondue).....	44
III.5.3.3 Recommandation du procédé de soudage aluminothermique .....	45
III.5.3.4 Différents types de moule de coulée .....	46
III.5.3.5 La réaction aluminothermique : .....	46

III.5.3.6 Chronologie d'exécution d'une soudure aluminothermique .....	49
III.5.3.7 Méthodes de soudage aluminothermique .....	50
III.5.3.8 Contrôle de la soudure Aluminothermique .....	56
III.6. Essais mécaniques et observation métallographique des soudeurs .....	56
III.6. 1. Grandeurs conventionnelles .....	57
III.6. 2. Grandeurs rationnelles .....	58
III.6. 3. Machine de traction.....	59
III.6. 4. Géométrie et dimensions des éprouvettes de traction ISO 5892-2 .....	60
III.6. 5. Conditions de déroulement de l'essai .....	60
III.6.6. Méthodes de mesure de dureté.....	61
III.6.6.1 Méthodes de mesure de la profondeur .....	61
III.6.6.2 Méthode de mesure optique .....	61
III.6.7. Observations métallographiques .....	62
III.6. 8. Aspects métallurgiques de soudage par aluminothermique .....	64
Introduction .....	66
IV.1. Composition chimique de l'acier utilisé.....	66
VI.1.1 Propriétés mécaniques de l'acier .....	66
VI.1.2 Essai de dureté de métal de base(MB).....	67
VI.1.3 Microstructure de l'acier de nuance R260 (MB) .....	67
VI.2. Soudage aluminothermique .....	69
VI.2.1. Composition chimique de la charge aluminothermique .....	69
VI.2.2 Bilan technique de la réaction chimique.....	69
VI.2.2.1 Calcul de la charge.....	69
VI.2.3 processus de la reaction chimique lors de soudage oaluminothermique .....	70
VI.2.4 Température de préchauffage (TP).....	71
VI.2.5 Essai de dureté .....	72
VI.2.6 Essai du dureté de la zone fondue du soudage aluminothermique .....	72
VI.2.7 Microstructure de la zone fondue aluminothermique .....	72
VI.2.8 Essais de traction .....	74
IV.3. Soudage à l'arc électrique(SMAW) .....	75
IV.3.1. Principe de la soudure à l'arc.....	75
IV.3.2. Matériel de soudure à l'arc électrique.....	76
IV.3.3. Méthodologie de soudage de l'acier à l'arc électrique .....	76
IV.3.4. Dimensions des pièces à souder.....	76
IV.3.5. Paramètres de soudage appliqués à l'arc électrique sur l'acier R260 .....	77
IV.3.5. Essais de l'acier R260 de la et de la zone affecte thermique de soudage à l'arc électrique .	78

IV.4. Soudage par friction .....	81
Conclusion générale.....	88
Bibliographie	

**Table des figures**

***Chapitre I***

<b>Figure I.1.</b> micrographie de l'austénite.....	<b>6</b>
<b>Figure I.2.</b> Structure cristalline de l'austénite cfc .....	<b>7</b>
<b>Figure I.3.</b> Micrographie de l'austénite et la ferrite .....	<b>7</b>
<b>Figure I.4.</b> Structure cristalline de la ferrite .....	<b>8</b>
<b>Figure I.5.</b> Micrographie de bainite .....	<b>8</b>
<b>Figure I.6.</b> Micrographie de perlite et ferrite.....	<b>9</b>
<b>Figure I.7.</b> Micrographie de la martensite.....	<b>10</b>
<b>Figure I.8.</b> Microscopie de différentes phases .....	<b>10</b>

***Chapitre II***

<b>Figure II.1.</b> Soudure homogène.....	<b>15</b>
<b>Figure II.2.</b> Soudure hétérogène.....	<b>16</b>
<b>Figure II.3.</b> poste a soudage à l'arc à l'électrode enrobée.....	<b>16</b>
<b>Figure II.4.</b> Constitution d'une électrode enrobée.....	<b>17</b>
<b>Figure II.5.</b> Poste de soudage MIG/MAG. ....	<b>19</b>
<b>Figure II.6.</b> Schéma du procédé MIG/MAG.....	<b>19</b>
<b>Figure II.7.</b> Principe du soudage TIG.....	<b>20</b>
<b>Figure II.8.</b> Flamme oxyacétylénique.....	<b>22</b>
<b>Figure II.9.</b> Chalumeau soudeur.....	<b>22</b>
<b>Figure II. 10.</b> Etapes du soudage par friction.....	<b>23</b>
<b>Figure II.11.</b> Soudage aluminothermique .....	<b>24</b>
<b>Figure II.12.</b> Schématisation des parties suscites et leurs localisations .....	<b>26</b>
<b>Figure II.13.</b> Fissure de cratère.....	<b>27</b>
<b>Figure II.14.</b> Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud .....	<b>28</b>
<b>Figure II.15.</b> Type de fissuration à froid.....	<b>29</b>
<b>Figure II.16.</b> Types de soufflures .....	<b>30</b>
<b>Figure II.17.</b> Les inclusions.....	<b>31</b>
<b>Figure II.18.</b> Morsure et caniveaux.....	<b>32</b>
<b>Figure II.19.</b> Manque de pénétration.....	<b>32</b>
<b>Figure II.20.</b> Collage ou manque de fusion.....	<b>33</b>
<b>Figure II.21.</b> projections.....	<b>34</b>

***Chapitre III***

<b>Figure III.1.</b> Champignon, amé et patin de rail.....	<b>38</b>
<b>Figure III.2.</b> Rail Vignol.....	<b>39</b>
<b>Figure III.3.</b> Rail de type Broca.....	<b>39</b>
<b>Figure III.4.</b> Rail à double champignon.....	<b>39</b>
<b>Figure III.5.</b> Diagramme d'équilibre de l'acier nuance R260.....	<b>40</b>

<b>Figure.III.6.</b> soudage bout à bout .....	<b>43</b>
<b>Figure III.7.</b> Le soudage aluminothermique des rails.....	<b>44</b>
<b>Figure III.8.</b> Principe de la soudure aluminothermique.....	<b>47</b>
<b>Figure III.9.</b> Schéma illustrant le procédé de soudage aluminothermique.....	<b>49</b>
<b>Figure III.10.</b> Réglage du joint.....	<b>50</b>
<b>Figure III.11.</b> Pose de moules et Lutage .....	<b>51</b>
<b>Figure III.12.</b> Préchauffage.....	<b>52</b>
<b>Figure III.13.</b> Réaction.....	<b>52</b>
<b>Figure III.14.</b> Meulage Final.....	<b>53</b>
<b>Figure.III.15.</b> Courbe de traction.....	<b>57</b>
<b>Figure III.16.</b> La machine de traction.....	<b>60</b>
<b>Figure III.17.</b> L'éprouvette de l'essai de traction .....	<b>60</b>
<b>Figure III.18.</b> Unite pour L'essais de dureté de brinell.....	<b>62</b>
<b>Figure III.19 .</b> Microscope optique.....	<b>63</b>
<b>Figure III. 20.</b> La polisseuse utilisée.....	<b>64</b>
<b>Figure III. 21.</b> Phénomènes physiques impliqués et leurs couplages lors de soudage.....	<b>65</b>

*Chapitre IV*

<b>Figure IV.1.</b> Microstructure du métal de base R260 X40.....	<b>67</b>
<b>Figure IV. 2.</b> Micro structure du métal de base R260 X100.....	<b>68</b>
<b>Figure IV.3.</b> Microstructure du métal de base R260 X200.....	<b>68</b>
<b>Figure IV.4.</b> Microstructure du métal de base R260 X400.....	<b>68</b>
<b>Figure IV.5.</b> la poudre aluminothermique .....	<b>69</b>
<b>Figure IV.6.</b> Durete HRA de la soudure aluminothermique.....	<b>72</b>
<b>Figure IV. 7.</b> Microstructure de la zone fondue X40.....	<b>72</b>
<b>Figure IV.8.</b> Microstructure de la zone fondue X100.....	<b>73</b>
<b>Figure IV.9.</b> Microstructure de la zone fondue X400.....	<b>73</b>
<b>Figure IV.10.</b> La géométrie de l'éprouvette .....	<b>74</b>
<b>Figure IV. 11.</b> Courbe de traction.....	<b>75</b>
<b>Figure IV .12 .</b> le profil de cardon dureté de la zone affectée thermique .....	<b>78</b>
<b>FigureIV.13.</b> Microstructure de la zone fondue X200.....	<b>79</b>
<b>Figure IV.14.</b> Microstructure de la zone fondue X400.....	<b>79</b>
<b>Figure IV.15.</b> Microstructure de la ZAT x 400.....	<b>80</b>
<b>Figure IV.16.</b> Courbe de traction.....	<b>81</b>
<b>Figure IV.17.</b> Soudage par friction.....	<b>82</b>
<b>Figure IV.18.</b> variation de la dureté HRA de la soudure par friction sur R260.....	<b>83</b>
<b>Figure IV.19.</b> Microstructure de la zone fondue X40.....	<b>84</b>
<b>Figure IV.20.</b> Microstructure de la zone fondue 400.....	<b>84</b>

<b>Figure IV.21.</b> Microstructure de la ZAT x 100.....	<b>84</b>
<b>Figure IV.22.</b> Microstructure de la ZAT x 400.....	<b>85</b>
<b>Figure IV.23.</b> Courbe de traction.....	<b>86</b>

**Liste des tableaux**

***Chapitre II***

**Tableau II.1.** Type d'inclusions..... **31**

***Chapitre III***

**Tableau III.1.** Composition chimique de rail R260 ..... **39**

**Tableau III.2.** La composition chimique de la zone fondue ..... **45**

**Tableau III.3.** Composition initiale de la charge aluminothermique..... **48**

**Tableau III.4.** Les erreurs et problèmes dans le soudage aluminothermique..... **54**

**Tableau III.5.** Les conditions de l'essai de traction..... **61**

***Chapitre IV***

**Tableau IV.1.** Composition chimique de l'acier R260..... **66**

**Tableau IV.2.** Propriété mécanique de l'acier R260..... **66**

**Tableau IV. 3.** Les valeurs de l'essai de dureté (HRA/R260)..... **67**

**Tableau IV. 4.** Les résultats de laissai de traction..... **74**

**Tableau IV.5.** Paramètre de soudage..... **77**

**Tableau IV.6.**Durete HRA de la soudure sur R260..... **78**

**Tableau IV. 7.** Les résultats de laissai de traction..... **80**

**Tableau IV.8.** Les valeurs de l'essai de la zone fondue et la ZAT..... **83**

**Tableau IV. 9.** Les résultats de laissai de traction..... **85**

### **Abréviation**

**A** : allongement [%]

**A**: Austénite;

**AT** : Soudage aluminothermique

**B**: Bainite;

**CC** : cubique centrée

**CFC** : cubique a face centrée

**Cr**: chrome ;

**d** : diamètre

**F** : force

**F**: Ferrite ;

**Fe<sub>3</sub>C** : cémentite ou carbure de fer ;

**FSW** : soudage par friction

**HB** : la dureté Brinell ;

**Hv**: la dureté Vickers ;

**I** : intensité [A]

**K** : température en kelvin

**Lc** : longueur calibrée

**M** : Martensite ;

**MAG**: Metal Activ Gaz

**MB** : métal de base

**MIG**: Metal Inert Gaz

**Mo** : le molybdène ;

**Ni** : le nickel ;

**Rm**: la résistance maximale ;

**SMAW** : Soudage à l'arc électrique

**Tf** : température de fusion

**TIG** : Tungstène Inert Gaz

**ZAT** : zone affectée thermiquement

**ZF** : zone fondue

**ZL** : zone de liaison

## **Introduction générale**

Le chemin de fer ne crée pas la richesse, mais la déplace. On s'accorde à dire qu'il suffit de créer un réseau ferré pour créer la richesse. Il permet un développement économique reposant sur la complémentarité, l'échange et la dépendance réciproquement acceptée.

Le secteur ferroviaire doit s'évoluer pour s'adapter aux mutations rapides d'un monde de plus en plus interconnecté. Pour survivre et se développer, il lui faut cependant élaborer des stratégies et des initiatives lui permettant d'améliorer ses performances commerciales. Dans cette ère nouvelle des technologies intelligentes, ANESRIF (Agence nationale étude suivie réalisation investissement ferroviaire) et ses membres s'emploient à « fournir les meilleures technologies pour répondre aux défis de mobilité accrue, à la croissance du volume de transport, à la fiabilité des moyens de transport et à la protection de l'environnement ».

Le chemin de fer (grâce aux rails) est le seul moyen de transport à pouvoir utiliser l'électricité tandis que les autres moyens s'en servent massivement du pétrole comme source d'énergie. Généralement, les aciers destinés aux rails ont des teneurs très élevées en carbone répondant à de résistance d'usure, néanmoins leur soudabilité métallurgique, opératoire et constructive pose un problème épineux notamment la fragilité de la structure soudée avec les procédés usuels tel que le SMAW et le FSW.

Pour répondre efficacement au problème du mouvement dynamique des cordons de soudure des rails, l'idéal serait d'utiliser un procédé approprié offrant une possibilité d'avoir une structure à prédominance bainitique. Selon les expériences effectuées dans ce domaine, l'utilisation du procédé thermo-chimique s'avère très efficace.

Dans cette étude, on se sert d'un acier de rail contenant une teneur en carbone de 0,6% de structure à prédominance perlitique. Sa soudabilité nécessite donc des précautions spéciales (préchauffage et post chauffage) lors d'utilisation des procédés classiques.

Dans ce travail, on a essayé d'évaluer par caractérisation structurale et mécanique des cordons de soudures réalisés par les procédés : SMAW, FSW et de les comparer à celui réalisée en aluminothermique.

Cette étude est subdivisée en deux parties : théorique et pratique.

Partie théorique comprend trois chapitres :

## *Introduction générale*

- Dans le chapitre I, nous présentons les généralités sur les aciers.
- Dans le chapitre II, nous présentons les généralités sur le soudage.
- Le chapitre III se focalise sur le matériel d'élaboration et de caractérisation des soudures des rails (SMAW, FSW, aluminothermique).

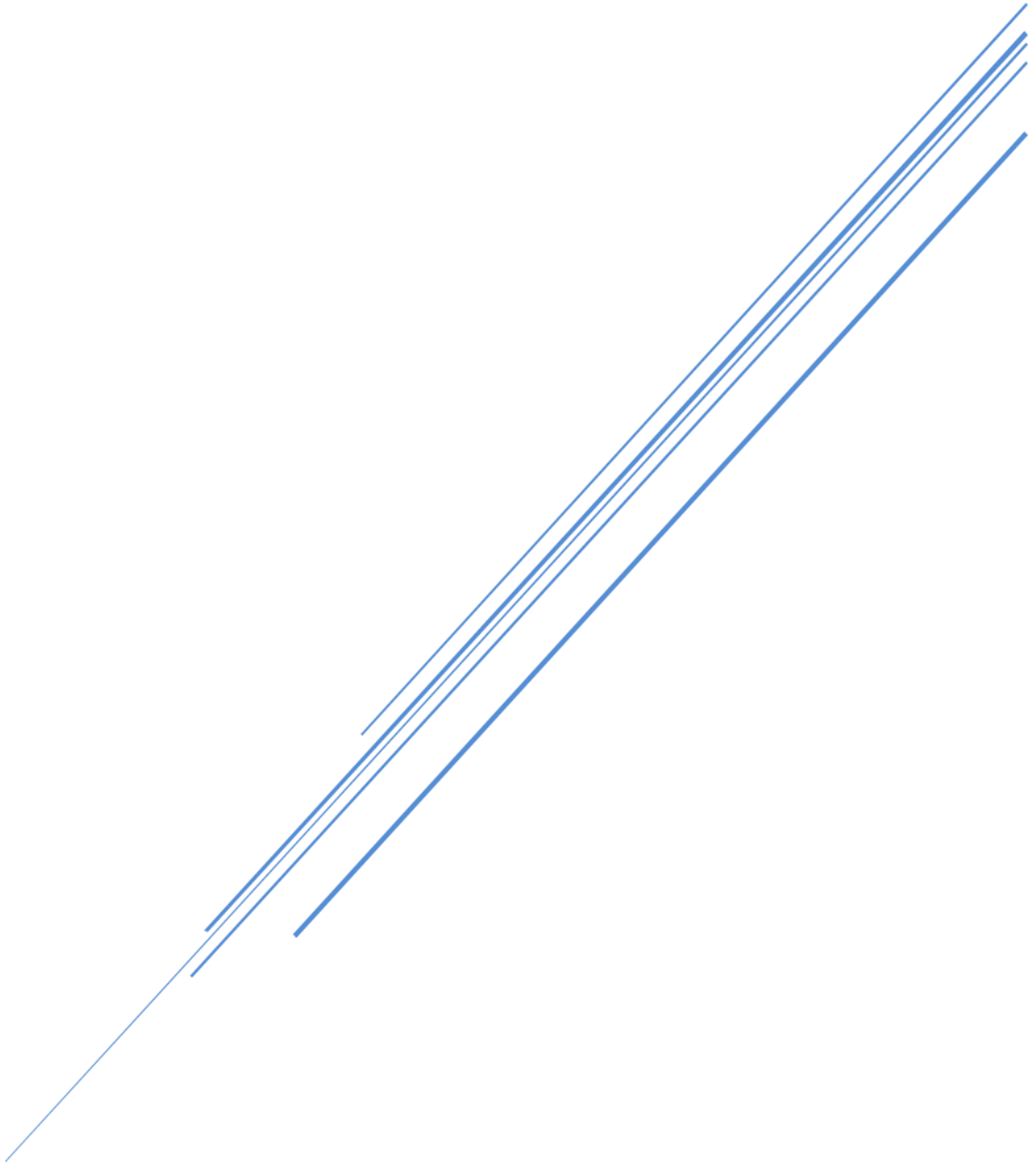
- Partie pratique :

- Le chapitre VI est consacré à l'exécution des soudures suivie de leur caractérisations mécanique et microscopique et enfin, une synthèse de discussions, d'interprétation des résultats.

En outre, ce travail se termine par une conclusion générale qui fera ressortir les remarques fondamentales et les perspectives éventuelles.

# *Chapitre I*

## *Généralité sur les aciers*



## Introduction

L'acier est l'un des principaux matériaux structurels au monde. Il est employé dans pratiquement tous les secteurs : l'automobile, la construction, l'ingénierie mécanique, la construction navale, les appareils domestiques, les ordinateurs et les produits électroniques. Les projets d'infrastructure comme les routes, les ponts ou les voies ferrées seraient impensables sans acier. Lorsqu'un objet ne se compose pas principalement d'acier c'est le cas des Smartphones, des ordinateurs ou des avions se compose cependant d'éléments fabriqués à l'aide de machines en acier. En d'autres termes, l'acier est la base-même du niveau de vie élevé dont bénéficient aujourd'hui les pays industrialisés et de la croissance des marchés émergents. L'acier est un alliage (Fe – c) utilisé dans les domaines de la construction métallique et de la construction mécanique. L'acier est constitué d'au moins deux éléments Fe et c .

## I. Définition de l'acier

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone, avec une teneur en carbone allant généralement de 0,2 % à 2,1 %. La présence de carbone dans l'acier lui confère des propriétés mécaniques supérieures à celles du fer pur, telles que la dureté, la résistance et la ductilité (après traitements thermiques) .

En plus du carbone, l'acier peut contenir d'autres éléments d'alliage tels que le manganèse, le chrome, le nickel, le cobalt, le tungstène et d'autres éléments en petites quantités. Ces éléments ont un impact sur les propriétés de l'acier, en améliorant par exemple sa résistance à la corrosion, sa résistance à haute température, sa résistance à la fatigue, ou encore ses propriétés magnétiques.

L'acier est largement utilisé dans de nombreuses industries telles que la construction, la fabrication d'outils, la construction automobile, l'aérospatiale, l'énergie et bien d'autres. Il peut être produit de différentes manières, notamment par la méthode de coulée continue, la méthode du four électrique à arc, la méthode de la production de l'acier à oxygène, ou encore la méthode du convertisseur.

L'acier est un matériau polyvalent qui peut être transformé de différentes manières pour répondre à une grande variété d'applications. Il peut être laminé, extrudé, embouti,

soudé, percé, découpé et usiné pour créer des formes et des produits complexes. En raison de sa résistance, de sa durabilité et de sa malléabilité, il est l'un des matériaux de choix pour de nombreuses applications industrielles. [1]

## I.1. Les types d'acier

### I.1.1. Acier au carbone

L'acier au carbone a un aspect mat et est connu pour être sensible à la corrosion. Dans l'ensemble, on en distingue trois sous-types : acier à faible, moyenne et forte teneur en carbone, moyenne, 0,60 % 1,5 %. Le nom lui-même dérive du fait que les aciers contiennent une très petite quantité d'autres éléments d'alliage. Ils sont exceptionnellement résistants, c'est pourquoi ils sont souvent utilisés pour fabriquer des produits tels que des couteaux, des fils à haute tension, des pièces de voiture et d'autres articles similaires. [2]

#### Exemple ;

Le C45/AISI 1045 est un acier au carbone moyen adapté aux pièces telles que les engrenages, les boulons, les essieux, les arbres à usage général, clavettes et les goujons.

### I.1.2. Acier allié

Les aciers allié contiennent des teneurs appréciables en éléments tels que le Ni, le Cr, le Cu, le Al , le V , associés à d'autres impuretés comme le carbone .

Ces aciers ont tendance à être moins chers, plus résistants à la corrosion et sont préférés pour certaines pièces automobiles, pipelines, coques de navires et projets mécaniques. Les caractéristiques mécaniques des aciers alliés dépendent donc de la concentration des éléments qu'ils contiennent. Acier allié 18NiCrMo5.[3]

#### Exemple ;

Acier allié AISI 4317/18NiCrMo5 offre une résistance et une ténacité élevée, pour les roulements industriels, les arbres à cames, les accouplements d'embrayage, les roulements de compresseur, les arbres de ventilateur, les engrenages industriels et les arbres de pompe.

## I.1.3. Acier à outils

L'acier à outils est connu pour être dur et résistant à la chaleur et aux rayures.

Son nom vient du fait qu'il soit très couramment utilisé pour fabriquer des outils métalliques, ces aciers sont composés principalement d'éléments comme le cobalt, le molybdène et le tungstène.

## I.1.4. Acier inoxydable

Les aciers inoxydables sont probablement le type le plus connu sur le marché. Ils contiennent généralement environ 10-20 % de chrome, qui est leur principal élément d'alliage. Ce type d'acier se résistant à la corrosion et facilement moulable en différentes formes. Grâce à leur manipulation facile, leur flexibilité et leur qualité, ils peuvent être utilisés dans les équipements chirurgicaux, domestiques, l'argenterie et même comme revêtement externe pour les bâtiments commerciaux/industriels.

Il existe plus de 100 catégories d'acier inoxydable qui en font un matériau incroyablement polyvalent. [4]

### Exemple ;

L'acier inoxydable 316L se utilise pour les échangeurs de chaleur, les pipelines, les matériaux de construction d'extérieur dans les zones côtières, les bracelets de montre, les boîtiers, et etc... Ils sont utilisés aussi pour les montres sophistiquées, les équipements marins, les produits chimiques, les colorants, l'industrie alimentaire.

## I.2. Structure des aciers

La structure des aciers est composée de cristaux métalliques, appelés grains, qui sont formés d'un empilement régulier d'atomes de fer et d'autres éléments d'alliage tels que le carbone, le nickel, le chrome, le manganèse, le molybdène et le vanadium. La taille, la forme et la distribution des grains peuvent varier en fonction de la composition chimique de l'acier et des conditions de traitement thermique utilisées lors de sa production.

Les différentes phases métalliques de l'acier, sont l'austénite, la ferrite, la bainite, la cémentite et la martensite, elles ont des propriétés mécaniques et physiques différentes, ce qui

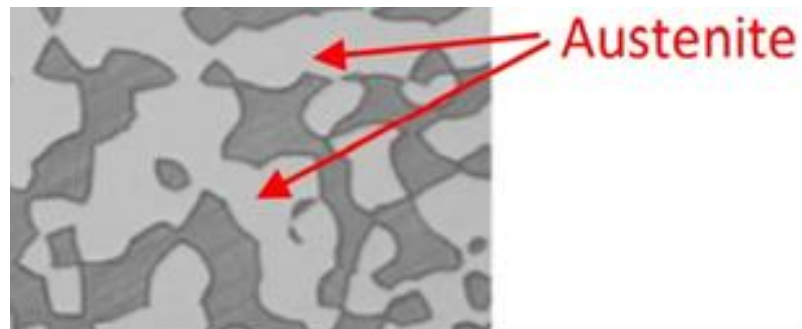
permet aux aciers d'avoir une grande variété d'applications dans différents secteurs de l'industrie. Comprendre la structure des aciers est essentiel pour concevoir et fabriquer des produits en acier adaptés à des applications spécifiques. [5]

## I.2.1. Phases et structures des aciers

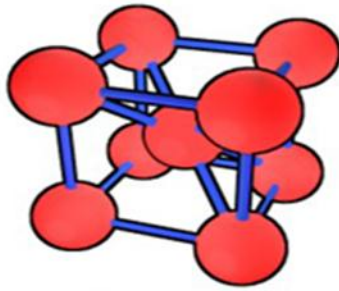
### a. Austénite

L'austénite, également connue sous le nom de fer en phase gamma ( $\gamma$ -Fe), est une phase de fer à structure cubique à faces centrées. L'austénite dans les alliages fer-carbone n'est généralement présente qu'au-dessus de la température eutectoïde critique (723 °C) et en dessous de 1500 °C, selon la teneur en carbone. Cependant, il peut être conservé à la température ambiante par des ajouts d'alliages tels que le nickel ou le manganèse. Le carbone joue un rôle important dans le traitement thermique, car il élargit la plage de température de stabilité de l'austénite. Une teneur en carbone plus élevée abaisse la température nécessaire pour austénitiser l'acier, de sorte que les atomes de fer se réarrangent pour former une structure de réseau cfc.

L'austénite est présente dans les aciers inoxydables à haute tenue en N. [5]



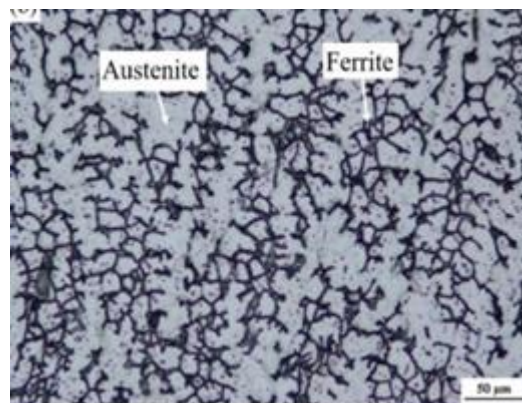
**Figure I.1 :** Micographie de l'austénite. [5]



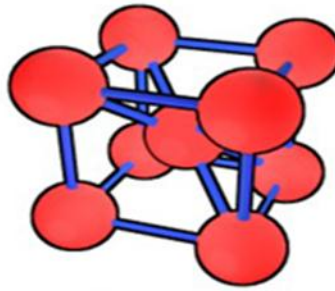
**Figure I.2.** Structure cristalline de l'austénite cfc .

## b. Ferrite

La ferrite est une phase métallique de l'acier qui se forme lors d'un refroidissement lent de l'austénite à une température inférieure à celle de la trempe. La ferrite est une phase cristalline ayant une structure cubique centrée (CC). Cette phase est caractérisée par une faible dureté et une haute ductilité.



**Figure I.3.** Micrographie de l'austénite et la ferrite .[5]



**Figure I.4.** Structure cristalline de la ferrite (cc)

## c. Bainite

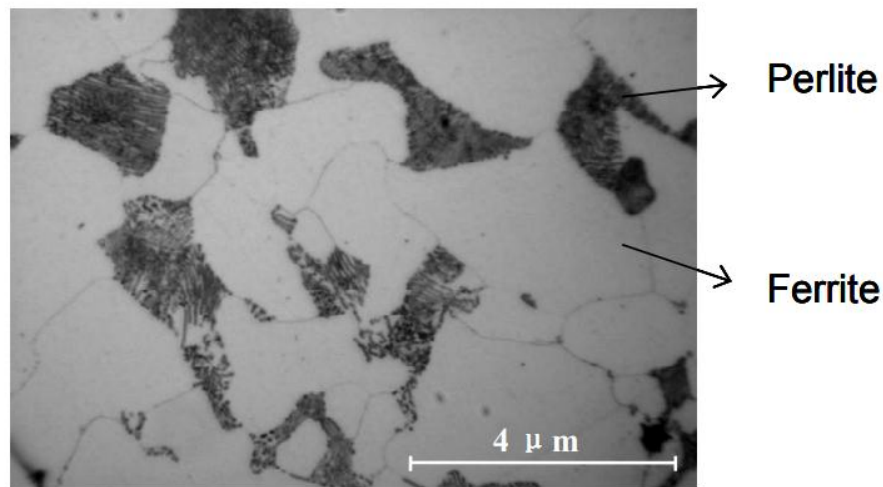
La bainite est une structure métallique qui se forme lors du refroidissement de l'austénite à une température intermédiaire entre celle de la trempe et celle du recuit. La bainite est une structure formée de matière de ferrite et de cémentite. La bainite sphérique est caractérisée par une dureté moyenne et notamment une bonne ductilité.



**Figure I.5.** Micrographie de bainite .[5]

## d. Perlite

Est une structure bimétallique formée d'une alternance de lamelles de ferrite et de cémentite



**Figure.I.6.** Micrographie de perlite et ferrite. [3]

### **e. Cémentite ou Carbure de Fer ( $Fe_3C$ )**

La cémentite est un composé métallique de l'acier formé de fer et de carbone

$\%C = 6,75$ . La cémentite est un carbure de fer de formule chimique  $Fe_3C$ . Elle se forme dans l'acier lors du refroidissement lent de l'austénite à une température intermédiaire entre celle de la trempe et celle du recuit. La cémentite est très dure et cassante.

### **f. Martensite**

La martensite est une phase métallique de l'acier sursaturée qui se forme lors de la trempe de l'acier. La martensite est caractérisée par une dureté très élevée et une fragilité élevée. Elle a une structure cristalline tetragonale centrée. La martensite est souvent utilisée pour produire des pièces d'outillage et des pièces soumises à des contraintes mécaniques élevées (frottement). [5]

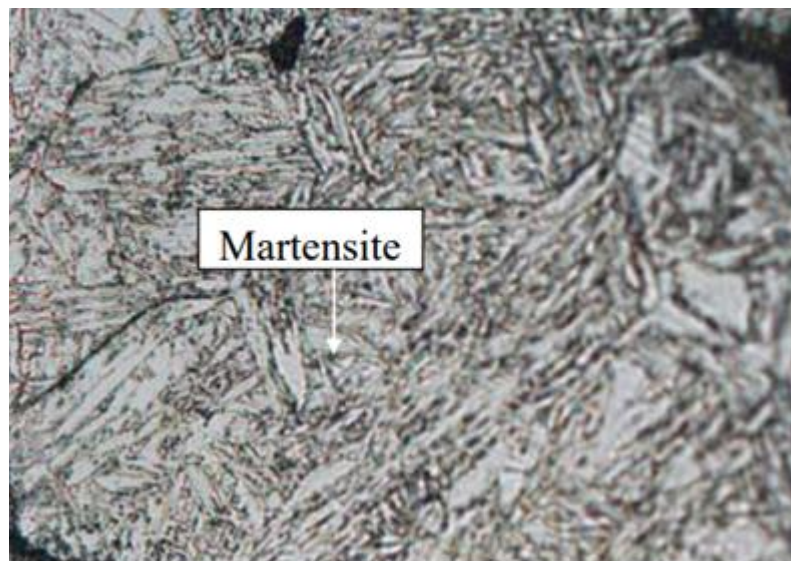


Figure I.7. Micrographie de la martensite. [5]

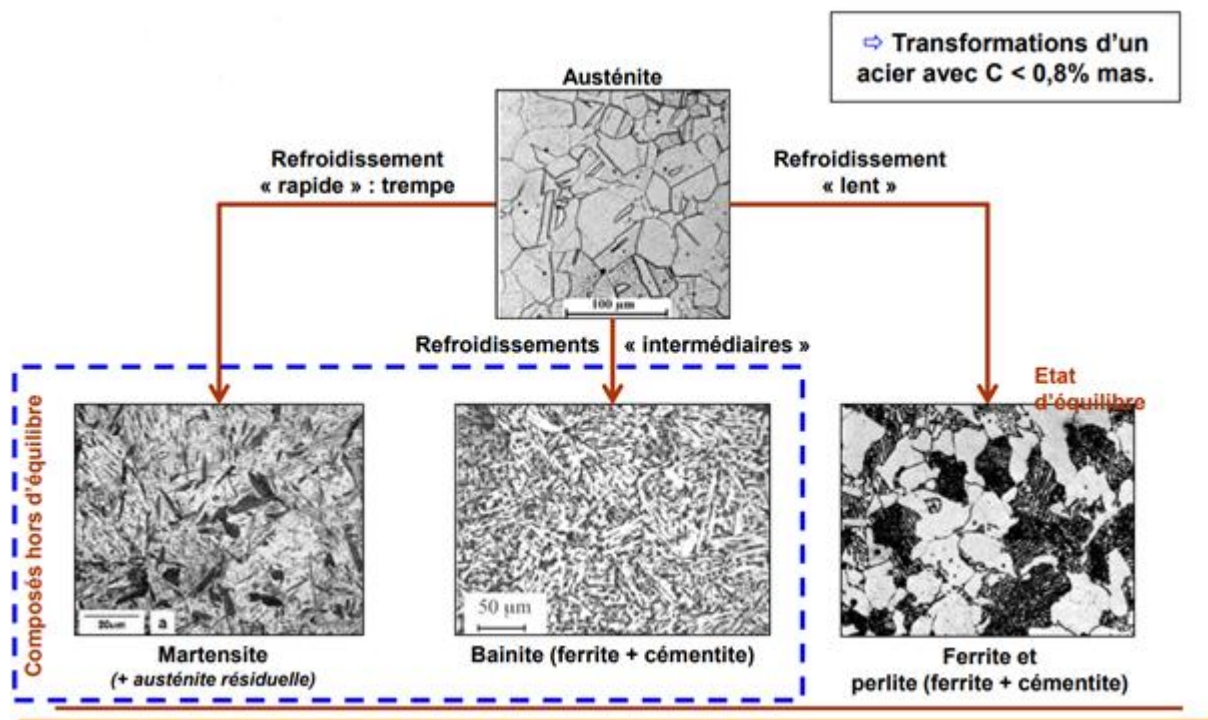


Figure.I.8 : Microscopie de différentes phases [6].

## I.3. Classification des aciers

Les aciers peuvent être classés en fonction de leurs compositions chimiques, de leurs traitements thermiques, de leurs microstructures, de leurs résistances et de leurs applications.

### I.3.1 Classification en fonction de leur composition chimique

- **Aciers au carbone** : contiennent principalement du fer et du carbone avec une teneur en carbone inférieure à 2%.
- **Aciers alliés** : contiennent du fer, du carbone et d'autres éléments d'alliage tels que le chrome, le nickel, le molybdène, le vanadium et le tungstène, qui sont ajoutés pour améliorer certaines propriétés mécaniques spécifiques.

### I.3.2 Classification en fonction de leurs traitements thermiques

- **Aciers trempés et revenus** : sont traités thermiquement pour obtenir une combinaison optimale de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure.
- **Aciers recuits** : sont chauffés à une température élevée pour améliorer leur ductilité et leur résistance à la fatigue.

### I.3.3 Classification en fonction de leurs microstructures

- **Aciers à grains fins** : ont une structure fine qui leur confère une meilleure résistance à la fatigue une meilleure ductilité et d'élasticité.
- **Aciers à grains grossiers** : ont une structure de grains grossiers qui leur confère une meilleure résistance à la corrosion (Nombre de joints de grains faible).

### I.3.4 Classification en fonction de leurs résistances

- **Aciers à haute résistance** : ont une résistance à la traction élevée et sont utilisés dans des applications nécessitant une résistance mécanique élevée.
- **Aciers à basse résistance** : ont une résistance à la traction faible et sont utilisés dans des applications nécessitant une grande ductilité.

## I.3.5 Classification en fonction de leurs applications

- **Aciers de construction** : sont utilisés pour la construction de bâtiments, de ponts, les rails et d'autres infrastructures.
- **Aciers inoxydables** : sont utilisés pour les applications nécessitant une résistance à la corrosion élevée.
- **Aciers à outils** : sont utilisés pour la fabrication d'outils tels que les forêts, les fraises et les lames de scie les cisailles, les outils de coupe.

### Conclusion :

La classification des aciers peut varier en fonction des critères utilisés. Cependant, il est important de comprendre que la sélection de l'acier approprié pour une application spécifique dépend de nombreux facteurs tels que les propriétés mécaniques requises, la résistance à la corrosion, la température de fonctionnement et le coût.

# *Chapitre II*

## *Généralités sur le soudage*

### **Introduction**

Dans le chapitre précédent nous avons donné une description théorique plus ou moins détails sur les aciers. Et dans ce présent chapitre nous allons présenter la notion assemblage métallique et les différents procédés de soudage.

### **II.1. Définition de soudage**

Le soudage est un mode de fabrication qui consiste à assembler deux ou plusieurs pièces métalliques en les chauffant à une température élevée pour les faire fondre et réaliser un bloc unique ensemble. Le soudage permet de créer des joints permanents entre les pièces, avec des caractéristiques mécaniques similaires ou supérieures à celles des pièces d'origine.

Le soudage peut être réalisé avec différents types de sources de chaleur, telles que la flamme, l'arc électrique, le laser ou l'ultrason. Le choix de la méthode de soudage dépend de la nature des pièces à assembler, de leur épaisseur, de la qualité de la surface et des propriétés mécaniques souhaitées.

Le soudage est utilisé dans de nombreuses industries, telles que la construction, l'aérospatiale, l'automobile, la fabrication de machines et de structures métalliques, ainsi que dans la réparation ainsi que dans la maintenance des pièces métalliques.

#### **II .1.1. Historique**

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux s'est fait par forgeage. La rupture est intervenue à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène O<sub>2</sub> et l'acétylène H<sub>2</sub>C<sub>2</sub> désormais stockables en toute sécurité et ensuite ils sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie.

Le soudage à l'arc, le soudage par résistance et le soudage sous protection gazeuse ont tous été inventés avant la Première Guerre mondiale. [7]

### II.1.2. Domaine d'application du soudage

Le soudage est une technique de fabrication qui est utilisée dans de nombreux domaines industriels, notamment :

- **L'industrie de la construction** : Le soudage est utilisé pour assembler des structures métalliques telles que les ponts, les bâtiments, les passerelles, etc.
- **L'industrie automobile** : Le soudage est utilisé pour assembler les carrosseries, les châssis et les pièces métalliques.
- **L'industrie aérospatiale** : Le soudage est utilisé pour assembler les structures des avions, des fusées et des satellites.
- **L'industrie navale** : Le soudage est utilisé pour assembler l'ossature des navires, les sous-marins et les plates-formes offshore.
- **L'industrie pétrolière et gazière** : Le soudage est utilisé pour assembler les pipelines, les réservoirs de stockage et les plates-formes offshore.
- **L'industrie des appareils électroménagers** : Le soudage est utilisé pour assembler les pièces métalliques des appareils électroménagers tels que les réfrigérateurs, les lave-vaisselle, etc.
- **L'industrie de la machinerie lourde** : Le soudage est utilisé pour assembler les pièces de machines lourdes telles que les excavatrices, les bulldozers, les grues, etc.

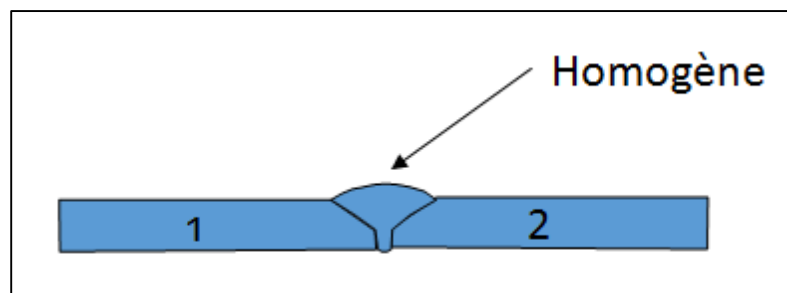
### II.1.3. Types de soudures :

#### a. Soudure autogène homogène

La soudure autogène est un assemblage de pièces métalliques ou plastiques de même nature, ou qui sont compatibles entre eux, sans qu'il n'y ait besoin d'un apport de matériau extérieur (MA) procédé laser et procédé par friction.

Le soudage autogène consiste à chauffer les lèvres ou bordures des matériaux à assembler jusqu'au point de fusion afin d'obtenir une soudure à la fois très résistante et véritablement durable. Il s'agit d'une technique permettant de réaliser l'assemblage de pièces de toutes tailles et de tous volumes. Cette méthode de soudage permet de réaliser des assemblages qui peuvent être plus ou moins résistants en fonction des matériaux et des techniques de soudage utilisées.

Les soudures autogènes sont utilisées dans de nombreux secteurs industriels (emballage, plasturgie, mécanique, construction automobile...). Elles permettent d'assembler des pièces thermoplastiques ou métalliques pour la production d'objets en petites. [7]



**Figure II.1.** Soudure homogène. [10]

### b. Soudure hétérogène

Le soudage hétérogène consiste à assembler des métaux de natures différentes, en utilisant du métal d'apport pour former un joint solide. Contrairement au soudage homogène, les pièces à assembler ne sont pas portées à la température de fusion, mais seulement le métal d'apport qui assure la liaison entre les surfaces à assembler. (Brossage)

Il existe plusieurs types de soudage hétérogène, dont le brasage fort et le brasage tendre. Le brasage fort utilise un métal d'apport avec une température de fusion supérieure à 450°C, tandis que le brasage tendre utilise un métal d'apport avec une température de fusion inférieure à 450°C. Dans les deux cas, un décapant, tel que le Borax (minerais boraté de sodium), peut être utilisé pour faciliter le processus de soudage.

Le soudo-brasage est également une technique de soudage hétérogène qui combine les principes du brasage et du soudage. Il est généralement réalisé au chalumeau, avec des températures de fusion variant en fonction des métaux à souder. Par exemple, pour souder de l'acier ou de la fonte, une température de 600 à 900°C est nécessaire, tandis que pour le cuivre, une température de 850 à 900°C est requise. Pour l'aluminium, la température de fusion nécessaire est d'environ 600°C.[7]

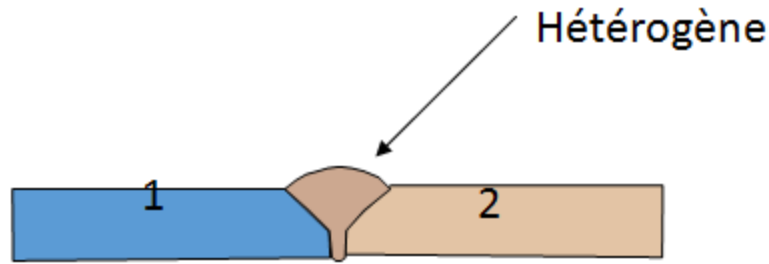


Figure II.2. Soudure hétérogène[7]

### II.2. Procédés de soudage

Il existe une grande variété de procédés de soudage sur le marché et sont classés la source d'énergie utilisé :

- Energie thermoélectrique ;
- Energie thermochimique ;
- Energie mécanique ;
- Energie focalisée ;

#### II.2.1 Procède de soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW)

L'électrode servant de métal d'apport se fusionne dans l'arc en se mélangeant avec des bords adjacents du joint et l'ensemble forme un cordon de soudure.

L'enrobage (basique cellulosique) assure la protection du bain de fusion et du transport de la matière au l'arc entre l'oxydation et la nitruration.



Figure II.3. Poste a soudage à l'arc à l'électrode enrobée. [8]

L'électrode enrobée, ou baguette de soudage, est constituée d'une âme métallique et d'un enrobage (figure II.4).

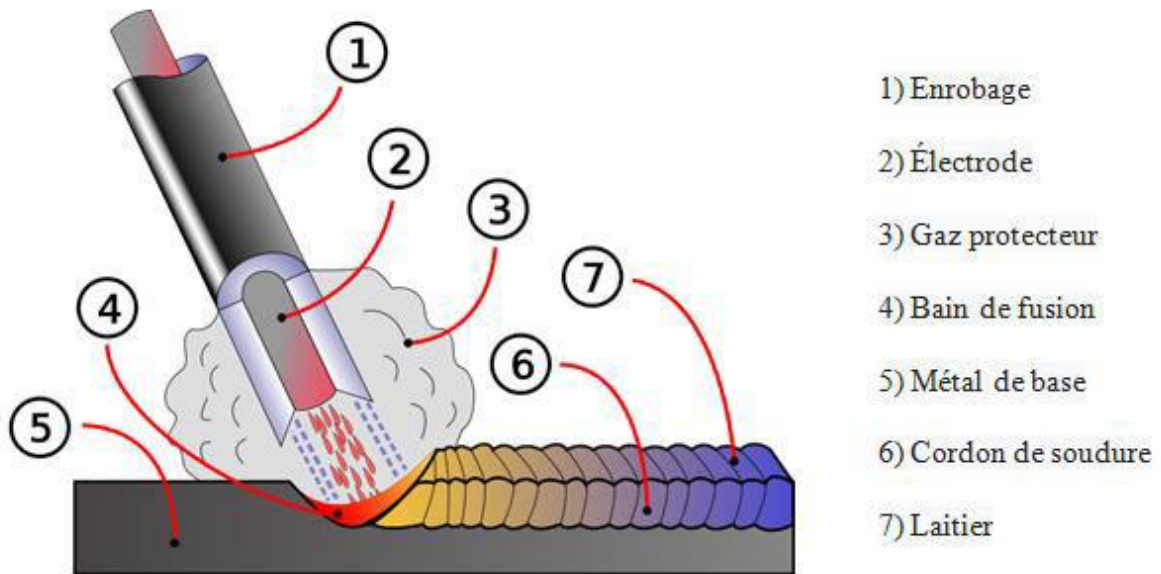


Figure II.4. Constitution d'une électrode enrobée. [7]

❖ Formules de calcul pour déterminer les paramètres de soudage (SMAW)

- L'intensité de soudage ( I )

$$I = 50(d - 1) \quad (A) \quad (II.1)$$

**d**: le diamètre de l'électrode en mm

- La tension de soudage ( U )

$$U = 20 + (0.04 \times I) \quad (V) \quad (II.2)$$

- L'énergie de soudage ( E )

En ( J / cm )

$$E = (60 \times U \times I) / V_s \quad (II.3)$$

**V<sub>s</sub> (cm / min)** : la vitesse d'avance pour le soudage à l'arc avec électrode enrobée

V<sub>s</sub>=20cm/min

**Remarque :** Ces paramètres peuvent être affinés selon la positions de soudage et la nature de matériaux CMB et MA

### + Avantages :

- Soudure de bonne qualité ;
- Procédé "économique" ;
- Résistance des soudures.

### + Inconvénients :

- Aspect des soudures moyen ;
- Les électrodes doivent toujours être maintenues dans un état sec notamment pour l'enrobage basique ;
- Déformations éventuelles des pièces soudées.

## II.2.2 Procèdes de soudage semi-automatique MIG-MAG FCAW :

### II.2.2.1. Soudage MIG (Métal Inert Gas) :

Encore appelé semi-auto, il est très adapté à la petite industrie : facile d'emploi ; arc visible ; pas de laitier ; grande vitesse de soudage ; temps de formation réduit. Il utilise une électrode fusible (fil se déroulant automatiquement) travaillant en atmosphère inerte (gaz protecteurs :

Argon, argon + hélium, etc.) afin de protéger le bain de fusion.

### Installation d'une unité de soudage MIG

La figure II.5. Présente une installation d'une unité de soudage MIG :

- a) Bobine et système de dévidage
- b) Système de dévidage et les galets lisses ou crantés
- c) La torche
- d) L'unité de réglages



Figure II.5 : Poste de soudage MIG/MAG.[9]

### II.2.2.2 Soudage MAG ( Metal Active Gas ) :

Est une variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO<sub>2</sub> et d'argon adaptée au soudage des aciers au carbone de construction et faiblement alliés.

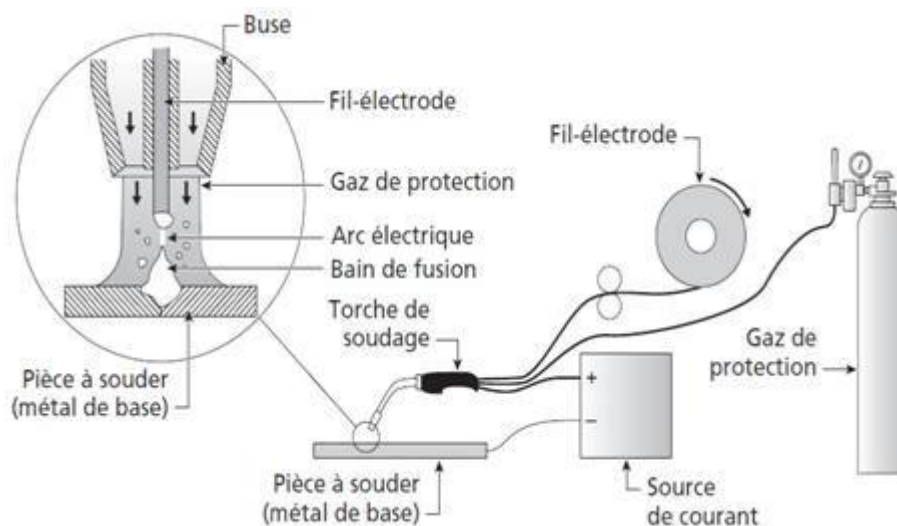


Figure II.6 : Schéma du procédé MIG/MAG. [9]

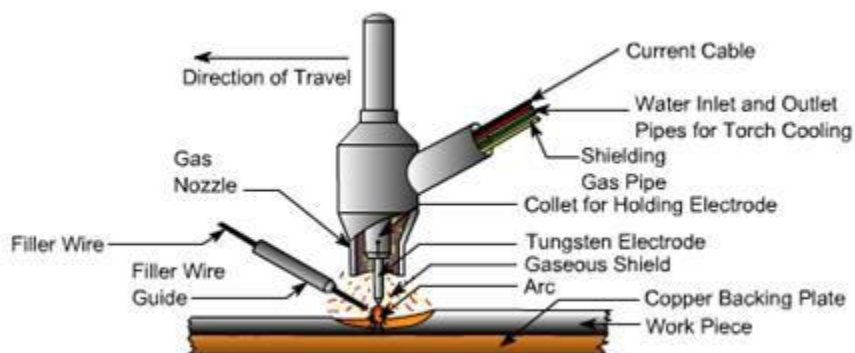
#### ✚ Avantages et inconvénients du procédé de soudage MAG :

- Rentabilité du procédé ;
- Vitesse très élevée en soudage ;

- Taux de dépôt de métal élevé ;
- Longueur possible d'un cordon sans point d'arrêt très important ;
- Pas de décrassage du laitier ;
- Plage d'épaisseurs de soudage très importante ;
- Possibilité de soudage dans toutes les positions ;
- Contrôle relativement aisé de la pénétration en régime de court-circuit ;
- Aspect de cordon correct ;
- Procédé automatisable et utilisé en robotique.

### II.2.2.3 Procède de soudage TIG(GTAW) :

Cette variante de plus productive aux précédentes. Elle utilise une électrode réfractaire ou non fusible en tungstène. Le métal d'apport est amené manuellement (baguette) ou automatiquement (fil déroulé). Il convient bien aux faibles épaisseurs (0.20 à 3 mm) et peut aussi s'utiliser sans métal d'apport et remplacer le soudage par points (voir soudage par résistance ci-après).



**Figure II.7.** Principe du soudage TIG. [10]

Ce procédé est très utilisé dans l'industrie, du fait que la fusion entraîne moins de déformations que le chalumeau. Il est employé dans la construction mécano-soudée, la chaudronnerie, les charpentes métalliques, les chantiers navales, l'industrie automobile et l'aérospatiale.

### ✚ Avantages de soudage TIG :

- Large gamme d'épaisseurs à souder ;
- Simple d'emploi ;
- Travail précis et esthétique ;
- Peu de fumées ;
- Soudage dans toutes les positions ;
- Procédé automatisable ;
- Faible vitesse de soudage ;
- Apport important d'énergie.

### ✚ Inconvénients de soudage TIG :

- Équipement dispendieux ;
- Prix élevé de la soudure à cause du gaz de protection et du coût de l'équipement ;
- Déformations des pièces soudées.

#### II.2.2.4 Procède de Soudage à Gaz (FO) :

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur de soudure est produite par la combustion de gaz. La composition oxygène-acétylène (oxyacétylénique) est aujourd'hui presque exclusivement employée. L'emploi de flux décapants permet de combattre l'oxydation en cours de soudage. Ce procédé se subdivise comme suit :

- sans flamme auxiliaire.
- avec flamme auxiliaire réductrice.

Flamme oxyacétylénique résultant de la combustion d'un volume d'acétylène (gaz combustible) pour deux volumes et demi d'oxygène. On notera qu'une trop forte proportion d'oxygène entraîne une chaleur plus importante mais le risque d'oxydation augmente.

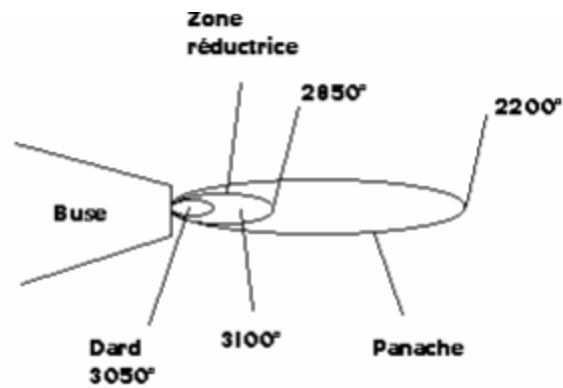


Figure II.8. Flamme oxyacétylénique. [10]

### Schéma d'un chalumeau soudeur

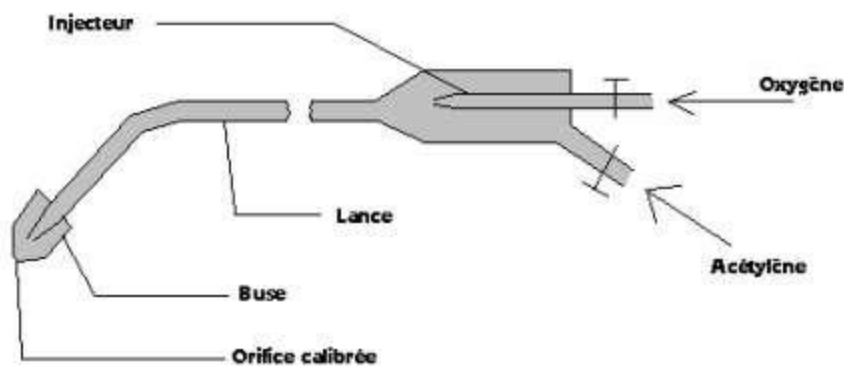


Figure II.9. Chalumeau soudeur [10]

L'aspect économique et la rapidité d'exécution font que ce procédé est beaucoup plus employé par les artisans.

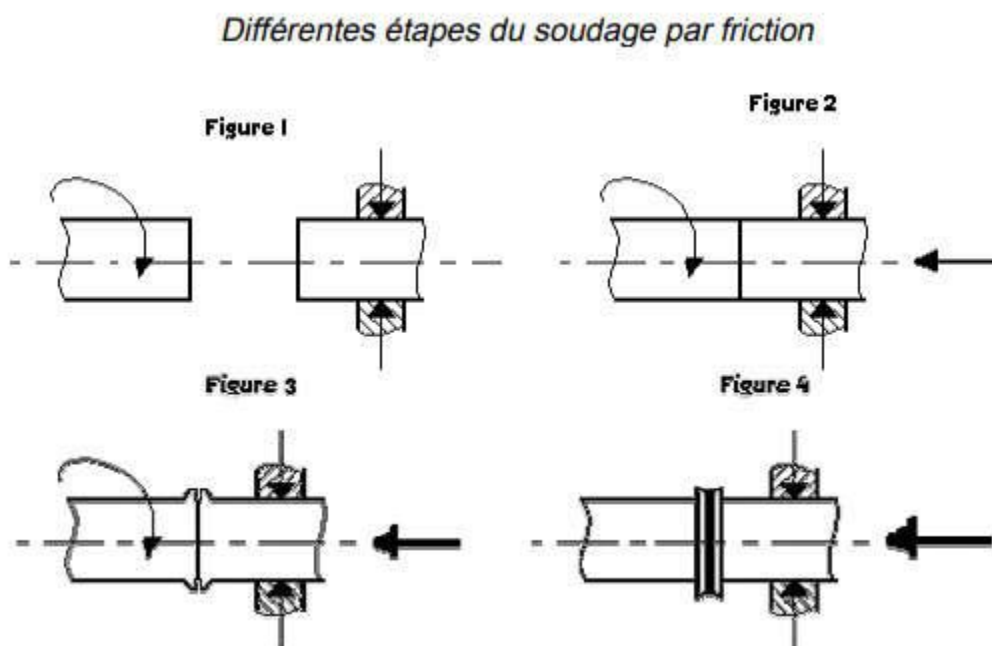
### II.2.2.5 Procède de soudage par friction (FSW) :

Dans ce procédé le soudage de deux pièces métallique se réalise par la mise a profil de l'effet de frottement.

Une des deux pièces à assembler est entraînée en rotation (fig. 10.1). Les deux pièces sont mises en contact par un effort axial déterminé (fig. 10.2). Par frottement les pièces

s'échauffent de part et d'autre du plan de joint ( $V = 100 \text{ m/min.}$ ). Un bourrelet commence à se former (fig. 10.3). Après un brusque arrêt de la pièce en rotation, l'effort axial est augmenté (Fig. 10.4). C'est la phase de forgeage de la soudure qui se traduit par la formation d'un bourrelet très caractéristique. On élimine ensuite ce bourrelet à la fin de l'observation par usinage. On notera qu'il est préférable de souder deux pièces de même section. Exemples d'applications :

Utilisé dans les mécanismes nécessitant une grande résistance (arbres de boîtes de vitesses, leviers sur axes, goujons sur moyeu de poids lourds, rallonges de forêts, queues de soupapes...)



**Figure II. 10 :** Etapes du soudage par friction [11]

### ✚ Avantages :

- Exécution de joint de qualité :
- pas d'inclusion, déformation et contrainte limitée, cycle de soudage contrôlé, soudage autogène et hétérogène. Permet d'obtenir une microstructure à grains fins dans la zone de soudage. Cordon de bonne étanchéité.
- Grande productivité : Rapidité d'assemblage de surfaces importantes ; automatisation possible.
- Équipement mécanique robuste et simple ;
- Pas de consommables :( métal d'apport, gaz de protection) ;

- Pas de consommation d'énergie importante.

### ✚ Inconvénients :

Limitation du procédé par la mise en rotation d'un des composants, importante précision de l'alignement axial du joint soudé. Investissement important, effort de bridage important, besoin d'un dispositif d'appui arrière.

### II.2.2.6 Procède de soudage aluminothermique (TW) :

Est un procédé de soudage utilisant la chaleur générée par une réaction chimique exothermique entre les composants de l'aluminothermie (un mélange d'un oxyde métallique et d'aluminium en poudre). Le métal fondu, produit par la réaction, joue le rôle de matériau de remplissage reliant les pièces à usiner après solidification. On en détail sur les méthodes et procédés appropriés à cet effet au chapitre III.

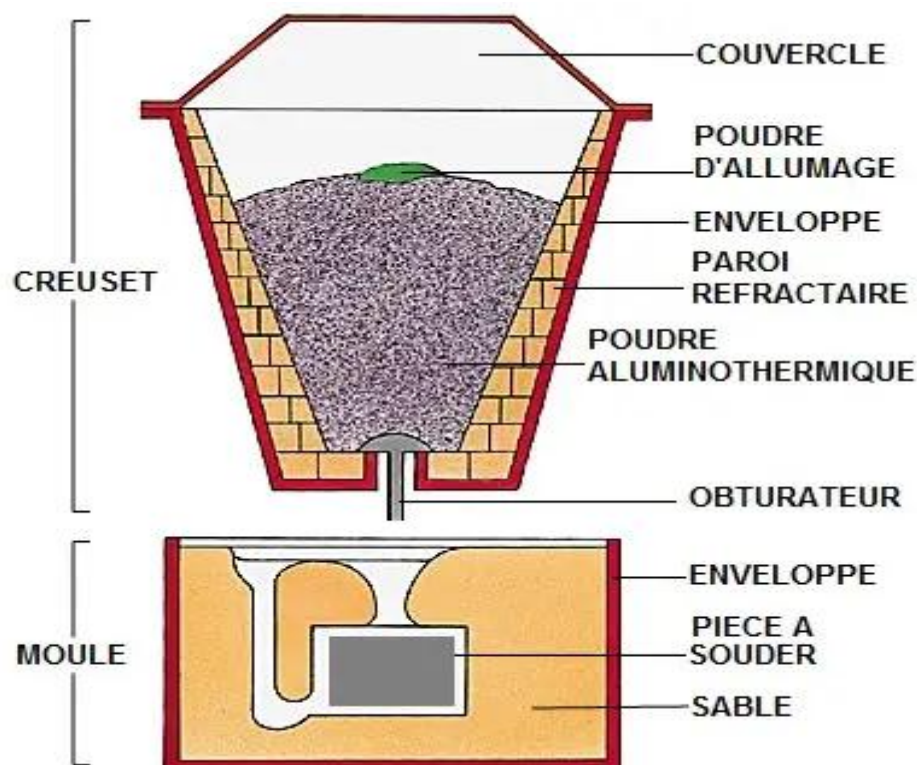


Figure II.11. Soudage aluminothermique [12]

### **❖ Règles générales à respecter :**

- 1 : Souder des épaisseurs aussi voisines que possible.
- 2 : Placer la soudure dans les zones les moins sollicitées. Eviter, en particulier, les sollicitations en flexion et en torsion.
- 3 : Penser aux déformations engendrées par les dilatations locales lors du soudage. Eviter en particulier les soudures d'angle sur pièces prismatiques
- 4 : Afin d'augmenter la durée de vie des outils, éviter d'usiner une soudure.
- 5 : Eviter les masses de soudure et veiller à une bonne conception des renforts. Pour une construction fortement sollicitée, on supprime les amorces de rupture en effectuant un cordon de soudure.
- 6 : Veiller aux possibilités d'accès du soudeur, du chalumeau ou des électrodes. A vérifier notamment dans le cas des soudures en X ou avec reprise à l'envers.
- 7 : Prévoir des formes qui permettent le positionnement des pièces à souder ou à défaut, concevoir un montage de soudage.
- 8 : Songer à des surépaisseurs pour l'usinage éventuel des faces après soudage (déformations).

### **❖ Avantages techniques et économiques du soudage :**

- 1) Les assemblages soudés présentent une résistance élevée par rapport à d'autres assemblages
- 2) Le soudage est très souvent employé en combinaison avec le moulage, forgeage, estampage etc., ce qui permet d'obtenir des pièces de formes très compliquées et de dimensions très grandes.
- 3) Haute productivité, bas prix de revient avec possibilité d'obtention des assemblages étanches.
- 4) Diminution des dépenses initiales des équipements.

## **II.3. Différentes parties d'une soudure :**

### **II.3.1 Zone fondue (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 chaude vers la moins. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté. [13]

### II.3.2 Zone affectée thermiquement (ZAT)

Zone 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.

### II.3.3 Zone de liaison

Cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et le zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

### II.3.4 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.

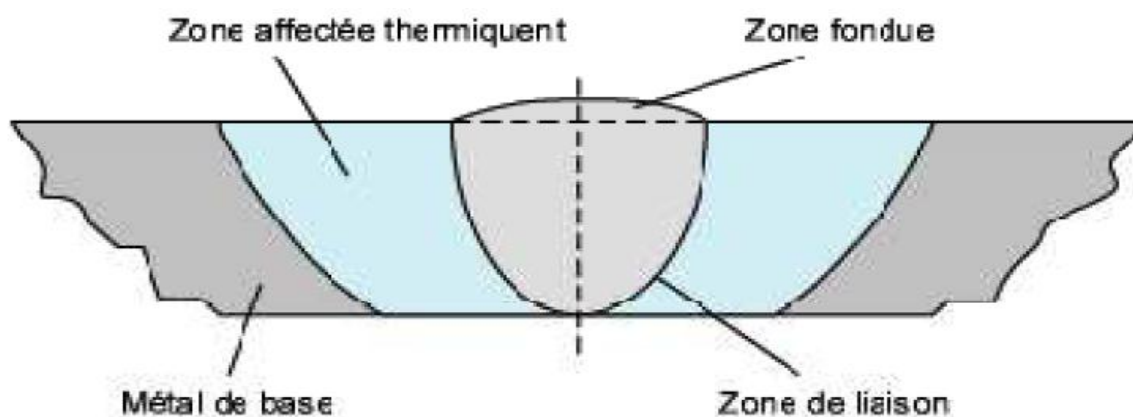


Figure II.12. Schématisation des parties suscites et leurs localisations [13]

### II.4. Classification des défauts de soudures

Les défauts des soudures peuvent être divisés en deux catégories :

- les défauts internes comme les fissures à chaud, les fissures à froid, les fissures au réchauffage et les porosités etc. ;
- Les défauts ayant une origine purement opératoire tels que caniveaux, manque de pénétration, collage.

#### II.4.1. Fissures :

##### II.4.1.1 Fissuration à chaud

Lors de la solidification du bain de fusion d'une soudure, il peut y avoir une fissuration à chaud, particulièrement si le métal de base contient des impuretés telles que le soufre ou le phosphore. Pour éviter cela, il est recommandé d'utiliser des électrodes à flux basique et de choisir un métal d'apport compatible avec le métal de base. Le cordon de soudure doit également être suffisamment large pour éviter les fissures. Par ailleurs, si l'on soulève l'électrode trop rapidement à la fin de la soudure, un cratère peut se former, créant une cavité interne susceptible de provoquer une fissure. Pour éviter cela, on peut effectuer un léger retour en arrière avec l'électrode, préchauffer le métal, réduire l'écartement entre les pièces ou augmenter la quantité de métal d'apport pour combler le cratère.

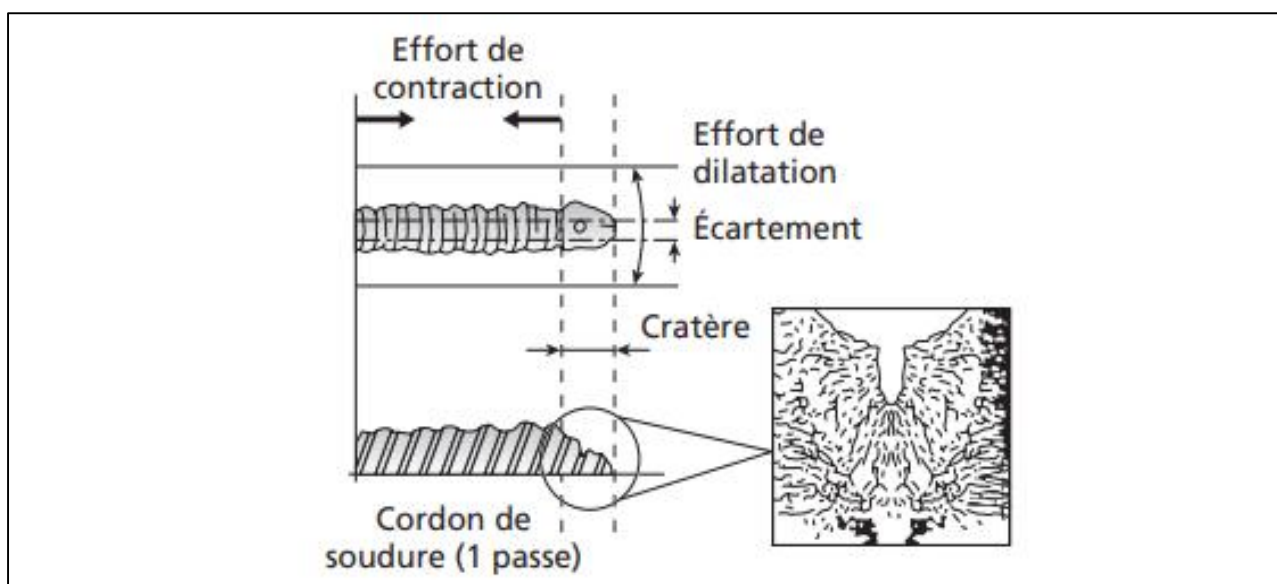
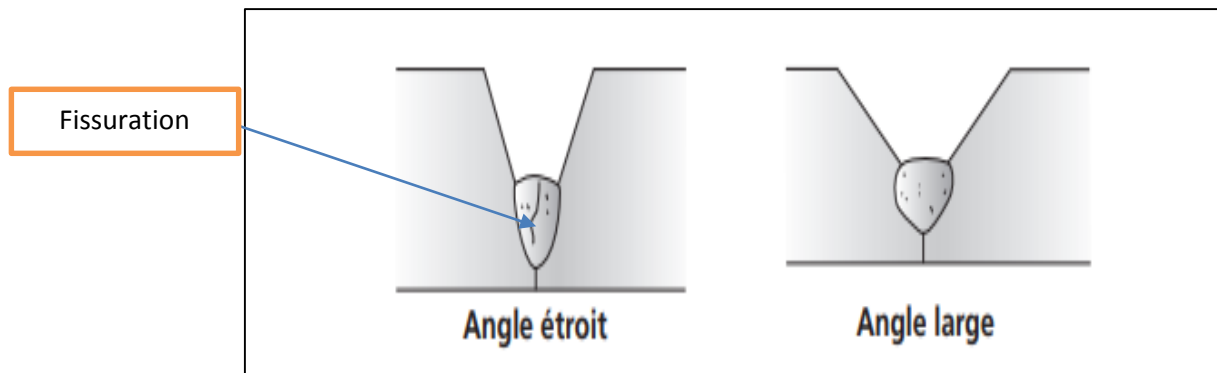


Figure II.13. Fissure de cratère [14]

La préparation des joints joue un rôle majeur dans la prévention de la fissuration à chaud, car des joints trop étroits et plus profonds favorisent son apparition, tandis que des joints plus larges et de moindre profondeur en diminuent les risques.



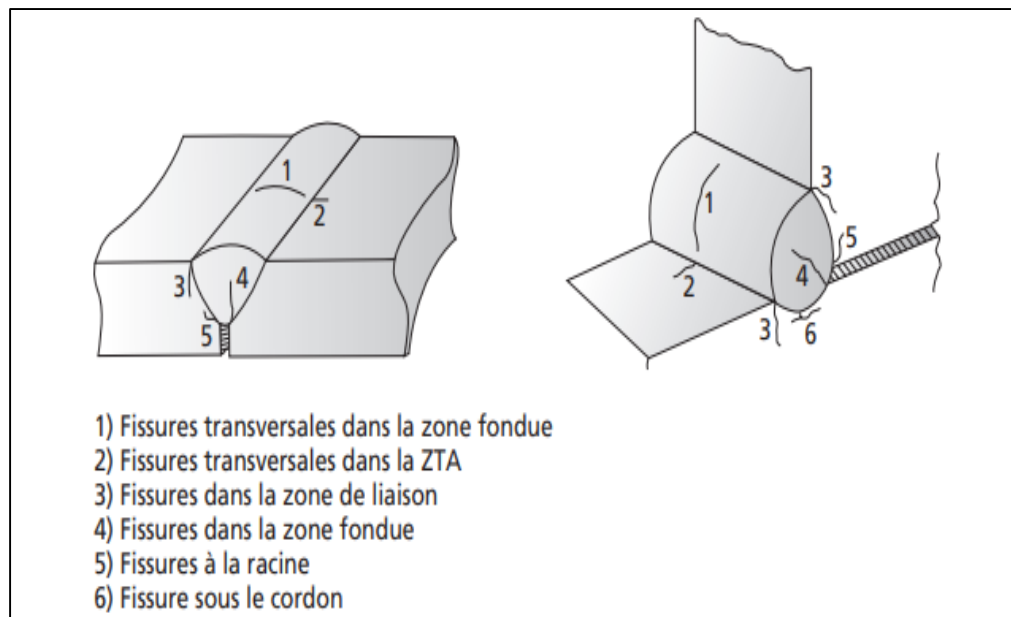
**Figure II.14.** Préparation d'un joint pour la prévention de la fissuration à chaud [14]

### II.4.1.2 Fissuration à Froid

La fissuration à froid est un phénomène qui peut survenir lorsque les matériaux subissent des contraintes mécaniques, chimiques ou thermiques qui dépassent leur résistance à la rupture à température ambiante ou inférieure à leur traitement thermique. Les fissures à froid peuvent être invisibles à l'œil nu et peuvent réduire considérablement la résistance et la durée de vie des matériaux, pouvant causer des défaillances structurales, des dommages ou.

Pour prévenir ce défaut, il est important d'utiliser des matériaux de qualité adaptés à l'application, de suivre les procédures de fabrication et d'assemblage appropriées, de réduire les contraintes thermiques, mécaniques et chimiques, et de réaliser une inspection de qualité pour détecter les éventuelles fissures à froid.

La fissuration à froid survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT en raison de tensions internes résiduelles importantes et d'hydrogène emprisonné dans la soudure. Les aciers à forte teneur en carbone et les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir ce type de fissuration.



**Figure II.15.** Type de fissuration à froid [14]

La fissuration à froid peut être influencée par plusieurs facteurs tels que la trempabilité reliée au carbone équivalent, la présence d'hydrogène due à l'humidité, l'humidité dans l'air, et le refroidissement rapide de la pièce, et la présence de défauts à la surface de la pièce. Le préchauffage approprié des pièces à souder est la meilleure prévention contre la fissuration à froid, ce qui permet d'évaporer l'hydrogène contenu dans l'humidité présente sur la pièce. Il est également recommandé de choisir des enrobages à basse teneur.

### II.4.2. Défauts des cavités

Ce sont des défauts volumiques, de types :

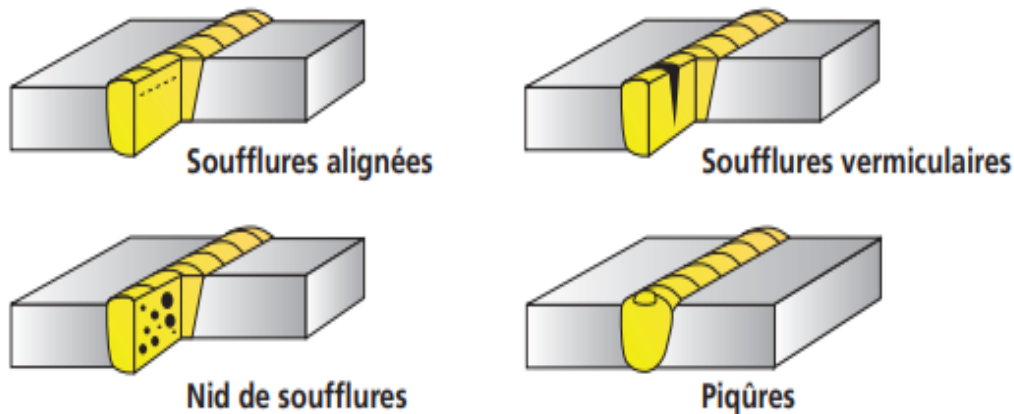
#### II.4.2.1 Soufflures

Les soufflures (cavités) sont des défauts fréquents en soudage. Ce sont souvent des bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure. Les piqures sont des soufflures débouchâtes, donc visibles en surface.

Les types de soufflures fréquentes sont :

- Nid de soufflures ;
- Soufflures sphéroïdale isolée ;
- Soufflures uniformément réparties ;
- Soufflure alignée ;

- Soufflure allongée ;
- Soufflures vermiculaires ;
- Piqures.



**Figure II.16.** Types de soufflures [14]

Pour prévenir les soufflures lors du soudage, il est important de nettoyer la surface de la pièce à souder, de régler les paramètres de soudage de manière appropriée, de choisir un matériau d'apport de qualité et d'utiliser un préchauffage. En suivant ces étapes, on peut réduire considérablement la formation des soufflures.

### II.4.3. Défauts des retassures

Les retassures sont des espaces vides apparaissant lors d'un retrait du métal en se refroidissant lors du soudage :

#### II.4.3.1 Inclusions

Les inclusions sont des impuretés étrangères qui sont piégées à l'intérieur de la soudure lors du processus de soudage. Elles peuvent avoir un impact négatif sur la qualité de cette dernière. Les inclusions peuvent provenir de la surface de la pièce à souder, des matériaux d'apport, du flux de soudage ou de l'environnement de soudage. Pour prévenir la formation d'inclusions, il est important de nettoyer soigneusement la surface de la pièce à souder, d'utiliser des matériaux d'apport de qualité, de régler correctement les paramètres de soudage et de protéger la soudure contre l'exposition à l'air ou à l'humidité pendant le refroidissement.

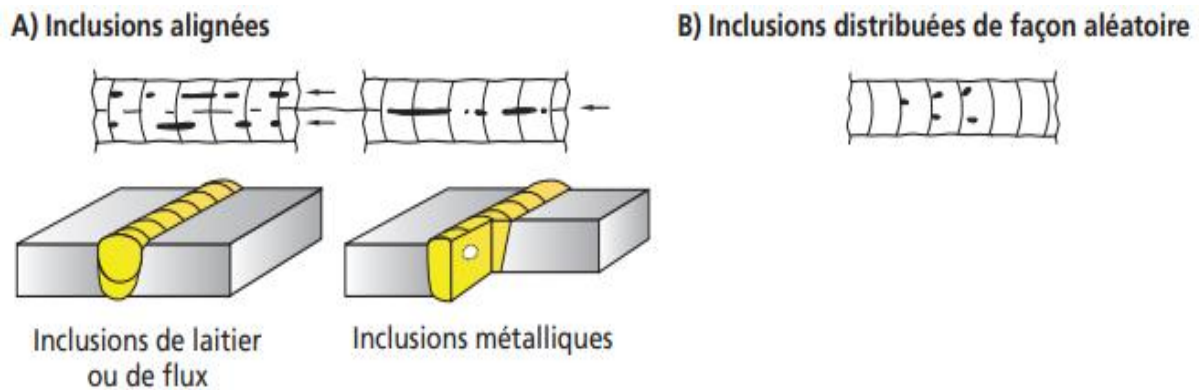


Figure II.17. Inclusions [15]

Tableau II.1. Type d'inclusions [20]

Type d'inclusions	Description
<b>Inclusion solide</b>	corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières)
<b>Inclusion de laitier</b>	Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
<b>Inclusion de flux</b>	Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
<b>Inclusion d'oxyde</b>	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification
<b>Inclusion métallique</b>	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger)

### II.4.4. Morsures et Caniveaux :

a- Une morsure est un creusage ou insuffisance du métal de base sur une partie du cordon.

b- Un caniveau est une morsure de grande taille due à une chaleur élevée du métal d'apport.

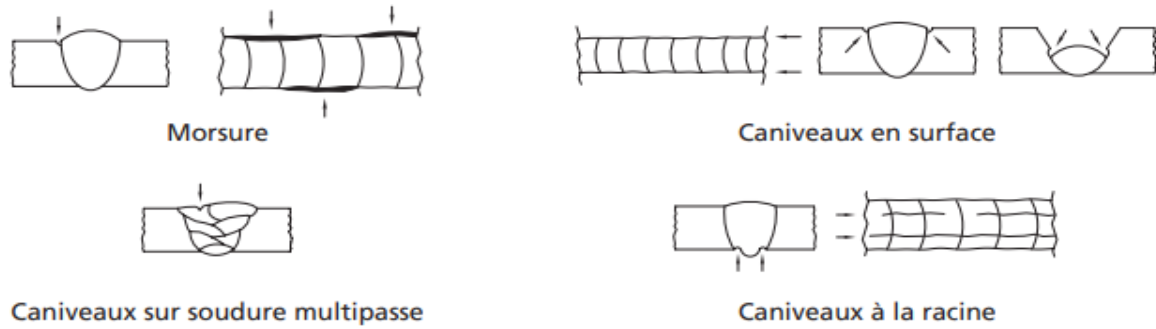


Figure II.18. Morsure et caniveaux.[14]

### II.4.5. Manque de pénétration

Absence partielle de fusion des bords à souder, laissant subsister espace entre ces bords.

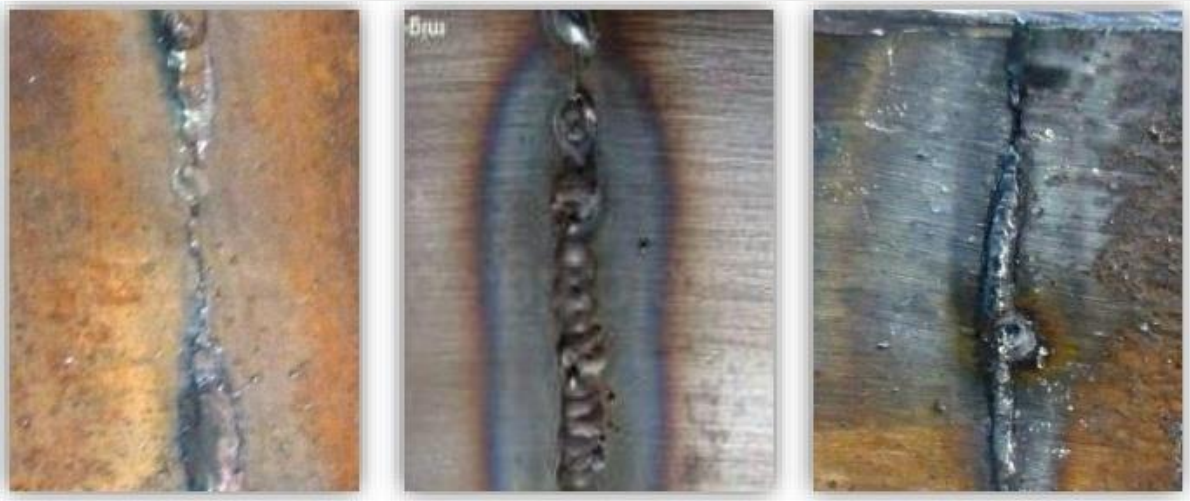


Figure II.19. Manque de pénétration

### ✚ Causes possibles

- La vitesse est trop haute.
- Intensité de courant trop basse.
- Chanfrein trop étroit ou absent
- La base est trop épaisse et froide.

### ✚ Moyens de prévention

- Diminuer la vitesse.
  - Augmenter l'intensité.
  - Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces.
- S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée

### II.4.6. Manque de fusion (collage)

Il s'agit d'une mauvaise continuité métallurgique entre les métaux à assembler. Il peut aussi s'agir de manque de fusion des passes les unes avec les autres .

#### ❖ Types de fusion :

- Manque de fusion latéral qui intéresse les bords à souder ;
- Manque de fusion entre les passes ;
- Manque de fusion à la racine.

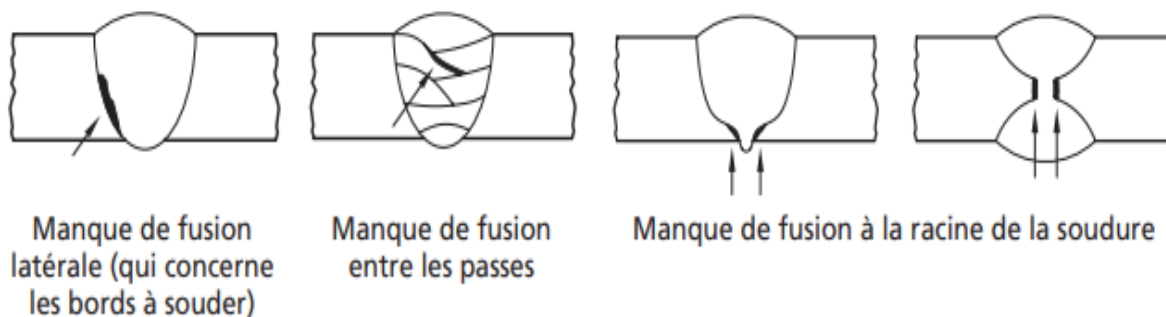


Figure II.20. Collage ou manque de fusion [15]

### ✚ Causes de Manque de fusion :

- Energie de soudage trop faible (courant) ;
- Vitesse de soudage élevée ;
- Pièce humide et sale ;
- Pas de préchauffage de la pièce ;

- Non-respect du temps entre passes.

### **II.4.7. Défauts de forme du joint du cordon :**

#### **II.4.7.1 Défauts de géométries des cordons**

Ce sont des défauts où les déformations du cordon sont liés à la mauvaise préparation des pièces à unir, ils peuvent être : des défauts d'alignement ou des défauts angulaires.

#### **II.4.7.2 Défaut d'alignement :**

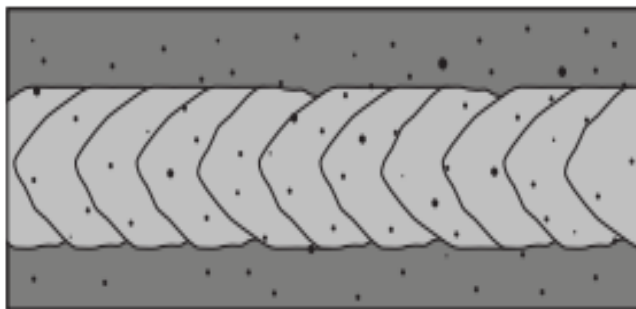
Il est remarqué en soudage bout à bout quand les pièces à unir sont mal bridées le pointage est insuffisant.

#### **II.4.7.3 Défauts angulaires :**

Les défauts angulaires sont des déformations (le pliage ou le cintrage) générés grâce à la dilatation des pièces sous le grand effet calorifique au cours de l'opération du soudage.

### **II.4.8. Défauts des projections**

Les projections sont des particules métalliques en fusion projetées pendant le soudage qui adhère au métal de base ou au cordon solidifié. Elles sont causées par un courant fort, et par un arc long. [15]



**Figure II.21.** Projections [15]

### II.4.9. Facteurs exogène favorisant les défauts de soudage

Il y a effectivement plusieurs problèmes qui peuvent survenir en dehors de la soudure, tels que :

- **La préparation de la surface** : Si la surface à souder n'est pas correctement nettoyée, dégraissée ou décontaminée, cela peut entraîner une mauvaise adhérence de la soudure ou des défauts de soudure tels que les porosités.
- **Les matériaux** : Des matériaux de mauvaise qualité ou des matériaux incompatibles peuvent entraîner des problèmes de soudure tels que les fissures, une mauvaise adhérence ou les défauts de forme.
- **La conception** : Une conception inadéquate peut entraîner des problèmes de soudure tels que des contraintes excessives ou des déformations, ainsi que des problèmes de des fissures
- **Les paramètres de soudage** : Si les paramètres de soudage tels que la température, la vitesse de soudage ou le flux de gaz de protection ne sont pas correctement réglés, cela peut entraîner des problèmes de soudure tels que des défauts de soudure, une mauvaise adhérence ou des déformations.
- **Les outils** : Des outils de soudage endommagés ou mal entretenus peuvent entraîner des problèmes de soudure.
- **Les conditions environnementales** : Des conditions environnementales telles que l'humidité, la température ou la pression peuvent également affecter la qualité de la soudure, en particulier pour les soudures réalisées à l'extérieur ou dans des environnements hostiles.

#### Conclusion :

Il est donc important de prendre en compte ces facteurs lors de la préparation et de l'exécution d'une soudure afin de minimiser les risques. [15]

# *Chapitre III*

*Rail / soudage aluminothermique*

## Introduction

Le présent chapitre constituera le complément des chapitres précédents avec un détail sur le soudage aluminothermique des rails.

### III.1. Rail

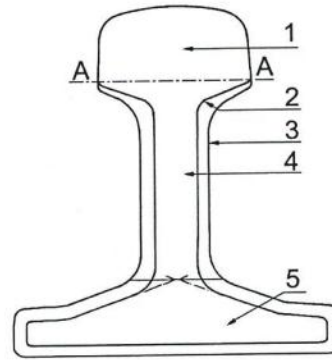
Le rail est un produit laminé en acier perlitique (teneur en carbone comprise entre 0,5 et 0,85 %) de dureté HB (Hardness Brinell) variant de 200 à 440, avec ou sans addition d'éléments d'alliages et avec ou sans traitement thermique, il présente une structure laminée avec un grain d'indice 7 à 9, ce qui correspond à un diamètre moyen de grain compris entre 18 et 36  $\mu\text{m}$ .

Géométriquement, il se compose, à la partie supérieure, d'une bande de roulement massive appelée « champignon », de largeur jusqu'à 75 mm avec un rayon transversal de 300 mm sur la partie majeure centrale, complétée par deux rayons symétriques de 80 mm puis de 13 mm en raccord avec les parois verticales. Cette surface quasi horizontale supporte toutes les contraintes de contact rail-roues (contraintes de Hertz), ainsi que celles des roues motrices (contraintes de Hertz et traction) .

La partie soutenant le champignon de roulement est une âme verticale d'épaisseur moyenne de 16 mm et de hauteur de l'ordre de 100 mm, destinée à résister aux efforts verticaux de flexion.

Enfin, la partie basse (patin) est en forme de trapèze très aplati de 150 mm de large, assurant la pose et la stabilité latérale sur les traverses. [16]

- 1 champignon
- 2 profil de rail
- 3 profil de soudure
- 4 Ame
- 5 Patin



**Figure III.1.** Champignon, amé et patin de rail. [17]

### **III.2. Différents types des rails**

Il existe plusieurs types de rails :

- Le **rail Vignole** est le plus couramment utilisé. Il est composé de deux parties, le patin qui repose sur la traverse et le champignon où prennent appui les roues des trains.
- Le **rail de type Broca** est le rail utilisé pour les tramways. Il est constitué d'une gorge qui reçoit le boudin de la roue, car la voie est encastrée dans la chaussée routière.
- Le **rail à double champignon** était utilisé avant la Seconde Guerre mondiale. Une fois que l'un des champignons soit usé, on fait retourner le rail. Cela permettait des économies pour les compagnies. Mais le deuxième champignon, au départ en-dessous, était écrasé par le passage des trains et il fallait le changer. On trouve encore ce type de rail en France, notamment sur les voies peu fréquentées et peu entretenues, et aussi sur les voies de service.

Les figures suivantes représentent les différents types de rails ;

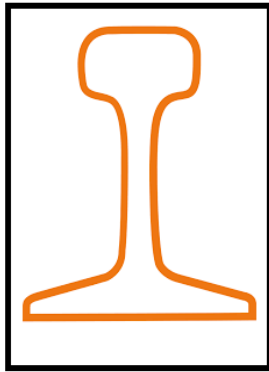


Figure III.2. Rail Vignole.[16]

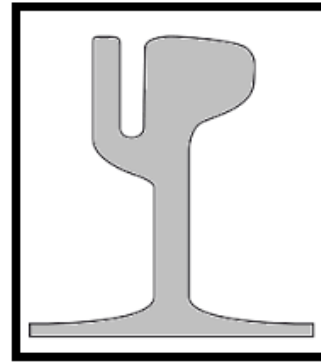


Figure III.3. Rail de type Broca.[16]



Figure III.4. Rail à double champignon.[16]

### III.3 Composition chimique de la nuance de rail R260

Le tableau suivant représente la composition chimique du rail R260 utilisé

Tableau III.1. Composition chimique du rail R260. [17]

Qualité de L'acier	Composition chimique %												
	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Ni	%Mo	%Al	%Cr	%V	%N	%Cu	%Nb
R260	0,62	0,70	0,15	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX		MAX	MAX	MAX	MAX
	0,80	1,20	0,58	0,025	0,0025	0,10	0,02	0,004	0,15	0,03	0,009	0,15	0,01

La figure suivante représente le diagramme d'équilibre Fe-Fe<sub>3</sub>C avec localisation de la matière utilisée soit R260.

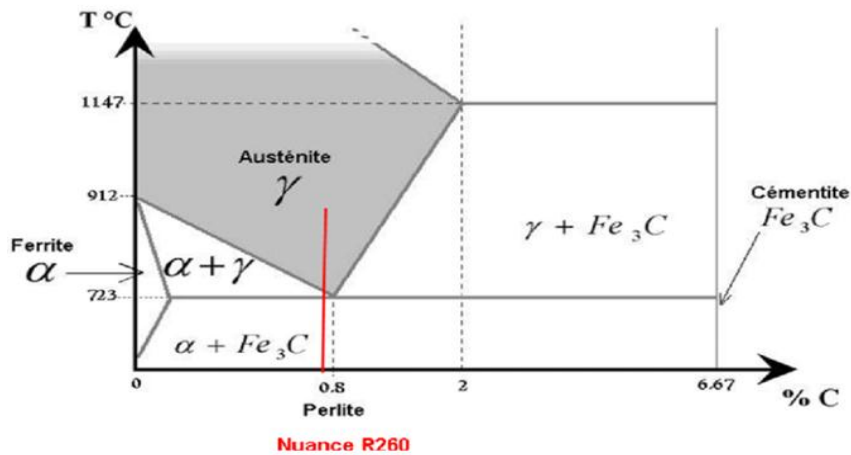


Figure III.5. Diagramme d'équilibre de l'acier nuance R260.[17]

### III.4. Rôles métallurgiques des éléments chimiques :

- **L'aluminium** : excellent désoxydant. Associé à l'oxygène, réduit la croissance du grain en phase austénitique. Peut rendre l'acier inapte à la galvanisation à chaud.
- **Le chrome** : c'est l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation. Il joue aussi un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion en formant  $Cr_2O_3$ . Il augmente aussi la trempabilité.
- **Le manganèse** : forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Augmente modérément la trempabilité.
- **Le molybdène** : augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Augmente aussi la trempabilité.
- **Le nickel** : rend austénitique les aciers à forte teneur en chrome. Sert à produire des aciers de trempabilité modérée ou élevée (selon les autres éléments présents), à basse température d'austénitisation et à ténacité élevée après traitement de revenu.
- **Le titane** : pouvoir carburigène élevé (comme le niobium) et réduit donc la dureté de la martensite. Élimine le carbone en solution à haute température et réduit le risque de corrosion intergranulaire ( $TiC$  se forme avant  $Cr_{23}C_6$  évite donc l'appauvrissement en chrome au joint de grain).
- **Le phosphore** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion et diminue la résistance mécanique. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

- **Le silicium** : favorise l'orientation cristalline requise pour la fabrication d'un acier magnétique, augmente la résistivité électrique. Améliore la résistance à l'oxydation de certains aciers réfractaires. Utilisé comme élément désoxydant.
- **Le niobium** : même avantage que le titane mais beaucoup moins volatile, il le remplace donc dans les métaux d'apport en soudage.
- **Le tungstène** : améliore la dureté à haute température des aciers trempés revenus. Fonctions sensiblement identiques à celles du molybdène.
- **Le vanadium** : augmente la trempabilité. Élève la température de surchauffe. Provoque une résistance à l'adoucissement par revenu (effet de durcissement secondaire marqué).[18]

- **La bainite** : est une autre structure microstructurale qui se forme dans les aciers. Elle est caractérisée par une distribution fine de ferrite et de carbures, mais elle se forme à des températures plus élevées que la martensite et avec une croissance plus lente et La transformation perlétique par la bainite se produit lorsque l'acier subit un traitement thermique spécifique. Il est généralement chauffé à une température élevée, puis refroidi à un taux intermédiaire, ce qui favorise la formation à la fois de la perlite et de la bainite.

### A) Bainite inférieure :

Dans cette zone la ferrite se forme des lattes, les plaquettes de carbure de fer participent en ces lattes par a elles.

### B) Bainite supérieur :

Dans cette zone la ferrite formée à devenir de plus en plus aciculaire, avec des basse température il est évident que la diffusion des carbures se fait difficilement et les aiguille de ferrite sont saturée en carbone pendant leurs formation ,les plaquette de carbures  $Fe_3C$  participent à l'intérieure des aiguilles en ferrite sous forme tres fine, et les carbures conduisent aussi a un durcissement de la structure ferritique .La bainite une structure microstructurale composée principalement de ferrite fine saturée en carbone, avec la présence de carbure sphériques dispersés dans la matrice ferritique.

### **III.5. Procèdes et Méthodes de soudage des rails**

Le soudage dans les rails coupés d'équerre (non chanfreinés comme pour le soudage des Structures) nécessite les méthodes suivantes :

- Un préchauffage élevé pour tenir compte de la composition chimique de l'acier.
- Des taux de dépôt de métal élevés.
- Un niveau de défaut acceptable pour la résistance à la fracture de l'acier.

Le soudage à l'arc en coffrage et le soudage aluminothermique remplissent ces critères. Le soudage bout à bout par étincelage ne convient pas à la plupart des rails européens à grande section. Les deux méthodes à l'arc en coffrage et aluminothermique exigent que des soudeurs qualifiés respectant rigoureusement les modes opératoires de soudage. [18]

#### **III.5.1 Soudage à l'arc en bain de fusion (en coffrage)**

Le soudage à l'arc en coffrage (en bain de fusion) est largement utilisé dans le monde pour souder les rails de grue. Avec cette méthode, les deux extrémités des rails sont découpés d'équerre, placés avec un espace d'environ 25 mm entre eux, préchauffés puis soudés au moyen d'électrodes métalliques manuelles spéciales.

#### **III.5.2 Soudage bout à bout par étincelage**

Le soudage bout à bout par étincelage est couramment utilisé pour souder les rails de chemin de fer dans les aciéries avant leur expédition. Il est parfois utilisé pour souder les rails sur site. Il nécessite des milliers d'ampères d'intensité et par conséquent du matériel coûteux. Les extrémités des rails sont chauffées par un courant qui les traverse. Dès qu'elles sont suffisamment chauffées, elles sont forgées ensemble.

Dans ce procédé, la machine à souder aligne les rails, les presse bout à bout et fait passer un courant électrique l'intensité de soudage varie de 10 kA à 100 kA et une tension de 5 à 20 V. La durée d'un cycle varie de 10 à 100 s pour les souder par forgeage. On cisaille ensuite le bourrelet qui s'est formé après assemblage et on meule le champignon et le patin du rail. Les caractéristiques géométriques de la soudure sont ensuite vérifiées (à l'aide d'une règle et d'une jauge d'épaisseur). Le procédé comprend aussi un contrôle magnétoscopique de la soudure. La qualité des soudures par étincelage est plus uniforme et le taux de défauts des soudures est inférieur à celui des autres procédés.

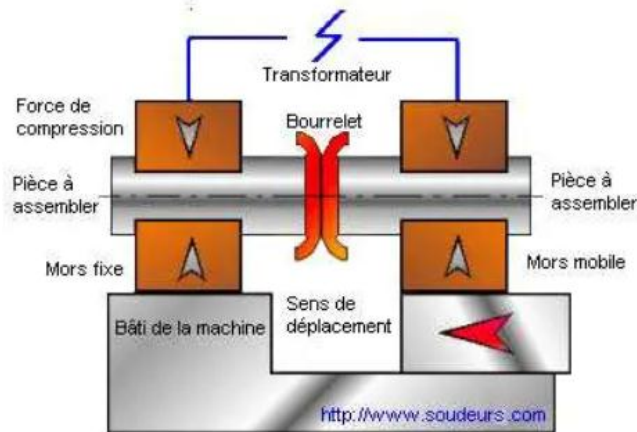


Figure.III.6. Soudage bout à bout [19]

### III.5.3 Soudage aluminothermique

La soudure aluminothermique est un procédé d'assemblage par fusionnement moléculaire de deux parties métalliques, au moyen d'une réaction chimique dénommée aluminothermie. Cette technique est principalement connue pour son utilisation dans le raccordement des rails de chemins de fer, mais elle est également appliquée en construction navale, dans les transformateurs électriques et le câblage de lignes en haute et moyenne tension, pour la protection cathodique, et dans la construction métallique en général.

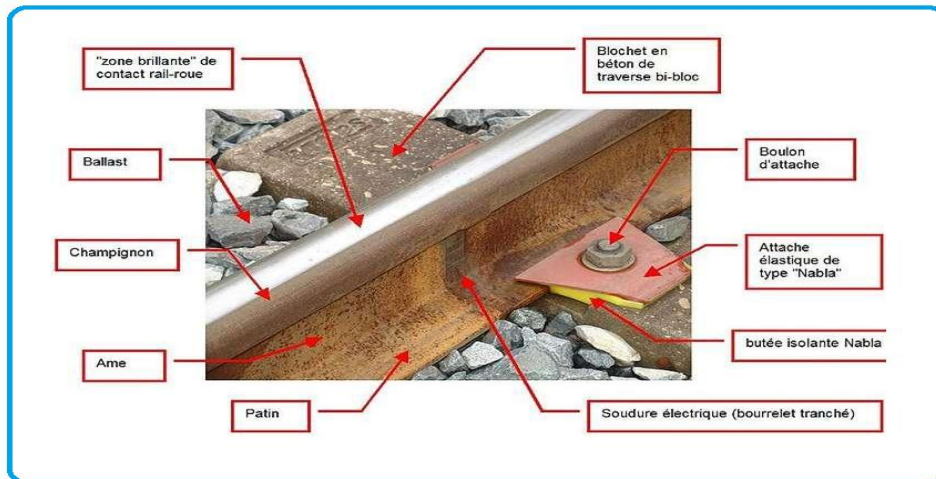
Elle permet un assemblage de haute qualité, quasi-inaltérable, exempt de porosité, et très résistant à l'oxydation. Les pièces sont amalgamées de façon totalement homogène.

#### III.5.3.1 Processus de soudage aluminothermique

Le soudage aluminothermique (TW : Alumino-thermic welding) est un procédé de soudage par réaction chimique exothermique dans un creuset et par coulée de métal en fusion. La chaleur nécessaire à la fusion des abouts de rails est obtenue par la réduction de l'oxyde de fer par l'aluminium.

La réaction chimique se produit lorsqu'une partie du mélange est portée à une température de 1200° à 1300° Celsius par une flamme oxyacétylénique par exemple. La durée de la réaction dure entre 30 et 90 secondes. La fusion est réalisée dans un creuset à partir d'une charge d'oxydes métalliques et ferriques et d'une fine poudre d'aluminium. Des éléments d'addition peuvent être incorporés à la charge pour améliorer la qualité métallurgique du joint soudé. Le métal en fusion résultant de cette réaction et qui constitue le métal d'apport est

déversé dans un moule de coulée. L'acier liquide fait fondre les bouts de rail et après refroidissement forme une soudure homogène. Le moule assure la protection du métal fondu lors de sa solidification et son refroidissement. Il est nécessaire de préchauffer les bouts des pièces à souder pour éviter un refroidissement trop rapide de la zone thermiquement affectée et du métal fondu lors de la sortie du creuset. [18]



**Figure III.7.** Soudage aluminothermique des rails. [19]

### III.5.3.2 Composition chimique de la soudure (zone fondue)

Le tableau suivant représenter les compositions chimiques de la soudure utilisée :

**Tableau III.2.** La composition chimique de la zone fondue [17]

Elément %	Intervalle autorise %		Nuance de rail
	MIN	MAX	
Carbone	0.35	0.70	R260
Silicium	0.00	1.20	R260
Manganèse	0.45	1.20	R260
Phosphore	0.00	0.035	R260
Soufre	0.00	0.035	R260
Chrome	0.00	0.20	R260
Molybdène	0.00	0.10	R260
Nickel	0.00	0.10	R260
Aluminium	0.02	0.60	R260
Cuivre	0.00	0.20	R260
Etain	0.00	0.02	R260
Titane	0.00	0.05	R260
Niobium	0.00	0.01	R260
Vanadium	0.00	0.25	R260

### III.5.3.3 Recommandation du procédé de soudage aluminothermique

- 1) Le procédé est principalement utilisé pour le soudage des pièces en aciers et permet de souder de mêmes sections ou de sections différentes en atelier ou sur chantier.
- 2) Le rabotage des rails des voies de chemins de fers est la première application du procédé et est encore actuellement utilisée.
- 3) Le rabotage des câbles, des barres.

**✚ Avantages du procédé de soudage aluminothermique :**

- 1) Aucune source d'alimentation externe n'est nécessaire ;
- 2) Très grandes sections de pièces peuvent être jointes.

**✚ Inconvénients du procédé de soudage aluminothermique :**

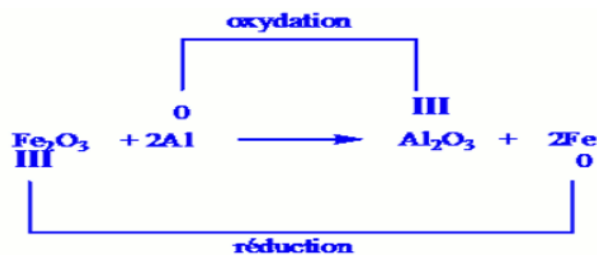
- 1) Seules les pièces en acier peuvent être soudées ;
- 2) La vitesse de soudage est lente ;
- 3) Le processus à haute température qui peut provoquer des distorsions ;
- 4) Les soudures peuvent contenir des défauts comme des poches de gaz et des inclusions de scories.

**III.5.3.4 Différents types de moule de coulée :**

- 1) Les moules en sable
- 2) Les moules préfabriqués (Oxyde de fer + sable + silicate)

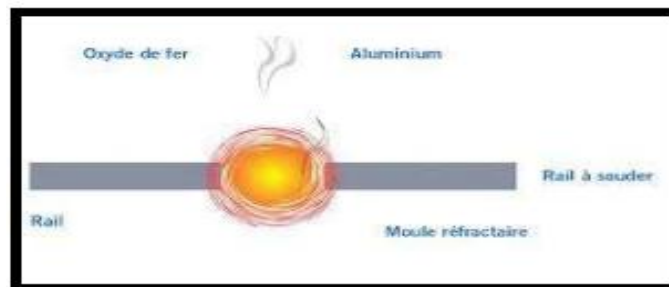
**III.5.3.5 La réaction aluminothermique :**

La réaction aluminothermique sur une pièce en fer permet le soudage des rails de chemin de fer à partir d'un mélange de poudre d'hématite (oxyde de fer Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'aluminium (Al)



La réaction ne dure que vingt-cinq secondes en dégageant une chaleur exothermique  $Q=181,5$  Kcal

Un autre oxydant utilisé en aluminothermie est l'oxyde de fer noir ou bleu ( $Fe_3O_4$ ), la magnétite. La thermitite est un type de réaction aluminothermique dans laquelle le métal aluminium est oxydé par l'oxyde d'un autre métal, généralement l'oxyde de fer.[17]



**Figure III.8.** Principe de la soudure aluminothermique. [19]

- **Influence de la composition chimique du rail :**

Certaines nuances, fortement alliées, peuvent nécessiter un post chauffage résistant, après soudure, afin de diminuer la vitesse de refroidissement, ce qui a l'inconvénient d'élargir la zone affectée par la chaleur (ZAT).

- **Préparation de la soudure :**

Les gabarits utilisés pour le soudage aluminothermique sont réalisés en matériau céramique avec la forme du rail. Ceux-ci sont placés sur le rail et doivent être bien alignés. L'espace entre le gabarit et le rail est rempli de sable ou d'une sorte de pâte pour l'étanchéité. Lorsque le gabarit est en place, le préchauffage peut commencer. Dans le soudage aluminothermique, ce réchauffage se fait par une source externe, à savoir le propane. L'acier doit être échauffé à quelque 700 °C. Comme il est difficile de mesurer la température, on travaille avec des temps d'attente. Après environ 5 minutes, l'acier a atteint la bonne température de soudage.

- **Composition initiale de la charge aluminothermique**

Le tableau suivant présente la composition initiale d'une charge aluminothermique :

**Tableau III.3.** Composition initiale de la charge aluminothermique [20]

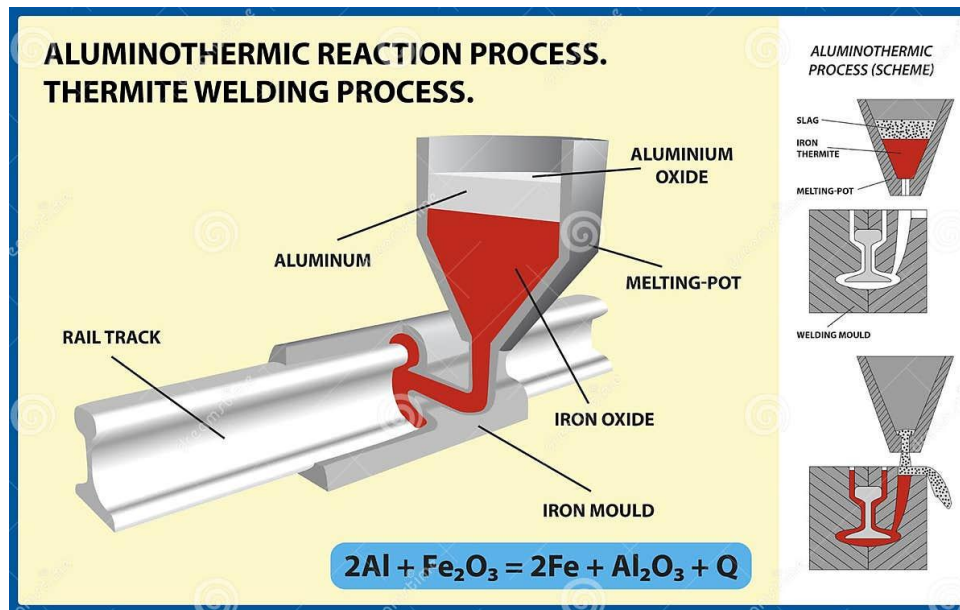
<b>Désignation de la substance</b>	<b>Concentration</b>
<b>Tétra oxyde de trifer (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)</b>	50 < X(%) < 70
<b>Aluminium<sup>1</sup></b>	10 < X(%) < 30
<b>Fer</b>	5 < X(%) < 30
<b>Manganese<sup>1</sup></b>	0 < X(%) < 4
<b>Carbure de silicium<sup>1</sup></b>	0 < X(%) < 2
<b>Silice<sup>1</sup></b>	0,1 < X(%) < 0.5
<b>Cuivre<sup>1</sup></b>	X(%) ≤ 0,1
<b>Chromium<sup>1</sup></b>	X(%) < 0,1

- **Caractéristiques chimiques spécifiques de la charge aluminothermique :**

La charge est stable dans les conditions normales. Dans les conditions normales d'utilisation le produit n'est pas explosif.

- Possibilité de réactions dangereuses ;
- Réactions dangereuses avec l'eau.

## III.5.3.6 Chronologie d'exécution d'une soudure aluminothermique



**Figure III.9.** Schéma illustrant le procédé de soudage aluminothermique [21]

Les étapes de réalisation d'une soudure aluminothermique sont les suivantes :

- ✓ L'enlèvement du ballast à hauteur du joint ;
- ✓ La dépose et repose des fixations nécessaires pour l'exécution de la soudure ;
- ✓ La fourniture de tous les matériaux et du moule en fonction du profil et de la dureté du rail .
- ✓ La préparation du joint à souder (meulage) ;
- ✓ La pose du moule ;
- ✓ Le préchauffage du rail ;
- ✓ L'exécution de la coulée ;
- ✓ L'ébavurage de la soudure ;
- ✓ Le meulage de la soudure ;
- ✓ Le nettoyage et le marquage de la soudure ;
- ✓ L'élimination de tous les déchets en dehors du domaine du chemin de fer.

**III.5.3.7 Méthodes de soudage aluminothermique**

La méthode de soudage d'un rail réalisé au niveau de la gare d'Alger. Lors de la pose des voies des travaux d'aménagement de la Gare d'Alger, la soudure de ces dernières a été effectuée comme suit :

**1. Réglage du joint**

Le réglage du joint à souder comporte quatre paramètres :

**a) Intercalaire de soudage**

C'est l'espace entre deux rails à souder. Cet intercalaire est de 25 mm +/- 2mm

**b) Réglage du point**

Les rails doivent former avant soudure une pointe de façon à ce qu'après l'exécution, du fait du refroidissement, les rails ne puissent être en creux et qu'une surépaisseur subsiste pour permettre le meulage

**c) Alignement**

L'alignement se mesure sur la face interne (coté intérieur à la voie) : l'alignement des flans des champignons doit être précis, il faut faire très attention à ce que les semelles soient alignées.

**d) L'inclinaison**

Il s'agit de contrôler l'inclinaison des deux rails à souder. On doit avoir un alignement simultané sur la face interne des champignons à la base de lame



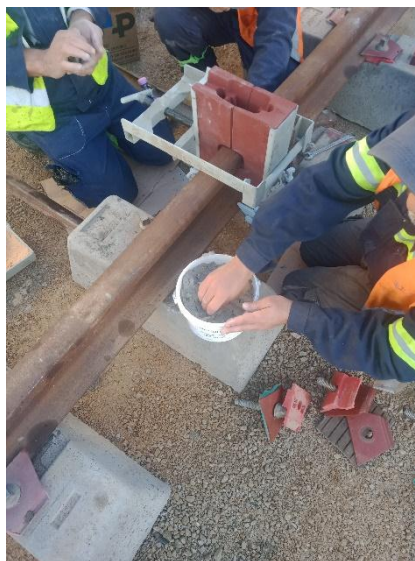
**Figure III.10.** Réglage du joint.

**2. Pose des moules**

- a. Poser la briquette de fond dans sa plaque
- b. Poser l'ensemble briquette-plaque de fond, vérifier le centrage de la plaque de fond Par rapport à l'intercalaire. Serrer ensuite les boulons à la main
- c. Vérifier le réglage après la mise en place de la plaque de fond.
- d. Accoler chaque carcasse sur son demi-moule.
- e. Mettre en place un demi-moule (centrage en haut et en bas par rapport à l'intercalaire et à la briquette) ;
- f. Mettre en place les seconds demi-moules qui ne doivent pas être décalés l'un par rapport à l'autre
- g. Terminer l'ajustement et le réglage en positionnant la presse à moules

**3. Lutage**

- a. Disposer à la main un cordon de pâte homogène sur tous les contours des moules.
- b. Poser, ensuite le bac à corindon et jointer l'intervalle entre le bac et le moule avec un filet de pâte à luter.



**Figure III.11.** Pose de moules et Lutage .

### 4. Préchauffage

- Brûleur air-essence ou oxygène propane.
- Durée : suivant prescription du fabricant.
- Pose du brûleur dans le moule au moyen de pinces spéciales.
- Versement de la charge dans le creuset et mise en place du creuset.



Figure III.12. Préchauffage.

### 5. Réaction

- Allumer la charge à l'aide d'un tison, refermer le couvercle du creuset ;
- Durée de la réaction : 16 à 25 secondes.



Figure III.13. Procédé (AT).

**6. Retrait du bac à corindon****7. Tranchage**

Le tranchage se fait à l'aide d'une ébavureuse dont les couteaux sont réglés à 3 mm minimum de hauteur par rapport au plan de roulement.

Le tranchage intervient environ 5 minutes après la fin de la coulée.

**8. Enlèvement des événements**

En les amorçant à la tranche dans un premier temps puis en les cassant à froid.

**9. Meulage de dégrossissages**

Cette opération est obligatoire avant toute circulation, la surépaisseur du métal restant ne doit pas dépasser 0,5 mm.



**Figure III.14.** Meulage Final.

**10 . Conditions d'exécution des soudures**

Pour les soudures la température ambiante doit se situer entre  $-3^{\circ}$  et  $+40^{\circ}$  C pendant le soudage. Le cas échéant, les bouts des rails sont à préchauffer sur une longueur jusqu'à 1m.

Pour le soudage des appareils de voie à l'exception des aiguilles proprement dites, la température ambiante doit se situer entre  $+3^{\circ}$  et  $+25^{\circ}$  C ; pour le soudage des aiguilles, elle se situe entre  $+10^{\circ}$  et  $+15^{\circ}$  C.

**11. Conditions de réception**

La réception provisoire des soudures est prononcée après contrôle portant sur :

- Tolérances : pas de flèches supérieures à 0,5 mm mesurés sur un mètre ;
- Vérification d'aspect après finition :
- Pas de solution de continuité de la table de roulement ;
- Pas d'inclusion de corindon ou sable, ni criques
- Essai de dureté sur 2 % des soudures à l'aide d'un appareil portatif à billes .il est procédé à 2 mesures sur chaque rail, en dehors de la zone affectée thermiquement et a 3 mesures dans le plan médian de la soudure, la moyenne des 3 mesures de la soudure doit être supérieur à + 5 à 40 H Brinell à la moyenne des 4 mesures sur rails.

**12. Procédés aluminothermiques selon la prescription technique :**

Procédés certifiés Railtech

- PLA/PLR - rails ferroviaires
- SRG - rails de tramways
- APR - Rails burbac

**13. Erreurs et problèmes dans le soudage aluminothermique**

Le processus du soudage aluminothermique semble simple à suivre mais pourtant

Quelques erreurs ou problèmes fréquents se produisent

Le tableau suivant présente les erreurs et problèmes fréquente dans le soudage aluminothermique.

**Tableau III.4.** Les erreurs et problèmes dans le soudage aluminothermique. [13]

<b>Les erreurs</b>	
<b>Temps d'ébavurage</b>	L'une des erreurs les plus délicates possibles dans le soudage exothermique est la mauvaise estimation des temps d'ébavurage. Si l'ébavurage commence trop tôt, on se voit heurter à de l'acier liquide, ce qui peut créer des déchirures .

<b>Etanchéité</b>	<p>Lorsque les gabarits sont placés autour d'un rail, il reste toujours un peu d'espace entre le gabarit et le rail. Ces espaces sont colmatés avec soit du sable, soit une sorte de pâte spéciale. Le sable doit être bien tassé afin d'optimiser l'étanchéité. Si cela n'est pas le cas, ou si le sable contient des pierres, la soudure échouera. Par exemple, le métal liquide peut s'échapper. L'erreur n'est pas toujours l'apanage du soudeur lui-même.</p> <p>Parfois il arrive que le fournisseur du sable ait un problème de qualité (comme les pierres dans le sable).</p>
<b>Alignement</b>	<p>L'alignement des rails est important car les tolérances équivalent à seulement quelques millimètres. C'est pourquoi c'est une affaire de spécialistes. Les rails sont détachés sur quelques traverses et puis remis en place. Puis les gabarits sont déposés par-dessus et le reste de la soudure est effectué. Si l'alignement n'est pas bien exécuté, l'acier liquide risque de s'échapper. Ceci est aussi appelé une coulée.</p>
<b>Coulées</b>	<p>Dans le cas où l'alignement n'est pas bien exécuté ou si les gabarits ne sont pas bien placés, vous avez des coulées. Une belle quantité d'acier liquide veut s'échapper du gabarit.</p> <p>Si cela arrive, il ne vous reste qu'une chose à faire: vous rendre vers un endroit sûr et attendre.</p> <p>Tenter d'éteindre n'aide pas. L'acier liquide peut avoir une mauvaise réaction avec l'eau et cela accroît le risque de brûlures.</p> <p>Dans le cas de coulées, la soudure échoue, ce qui obligera de remplacer la partie complète du rail.</p>

**III.5.3.8 Contrôle de la soudure Aluminothermique**

- **Contrôle avant soudage**

Analyse chimique du matériau, mise en évidence de zones d'impuretés dans les zones proches du joint, etc. le soudeur doit aussi vérifier :

- Les kits
- La température
- La géométrie du chanfrein s'il existe
- Le réglage des moules
- La température et l'étendue du préchauffage

- **Contrôle pendant le soudage**

Il a surtout pour but de vérifier que les conditions d'exécution sont bien respectées, ainsi que les règles de l'art du soudage.

- ✓ La température
- ✓ La qualité de l'élimination du laitier
- ✓ Différents contrôles visuels

- **Contrôle après le soudage :**

-  **Contrôle destructif**

Utilisé surtout pour des productions en séries, donc assez peu pour nos métiers.

- ✓ Essais de traction
- ✓ Essais de dureté
- ✓ Macrographies
- ✓ Essais de résilience

**III.6. Essais mécaniques et observation métallographique des soudeurs**

L'essai de traction consiste à exercer une déformation croissante sur un barreau prismatique ou cylindrique et à mesurer l'évolution de la force nécessaire pour le déformer jusqu'à sa rupture.

L'examen du diagramme effort-déformation (ou courbe de traction, figure III.15.) fait apparaître un domaine élastique 'OA' dans lequel les déformations sont réversibles et

proportionnelles à la charge appliquée et un domaine plastique ‘AC’ dans lequel les déformations sont permanentes. De ‘A’ A ‘B’, les déformations sont homogènes, tandis que de ‘B’ A ‘C’, elles ne sont plus homogènes (elles sont localisées) par suite de la striction qui précède la rupture.

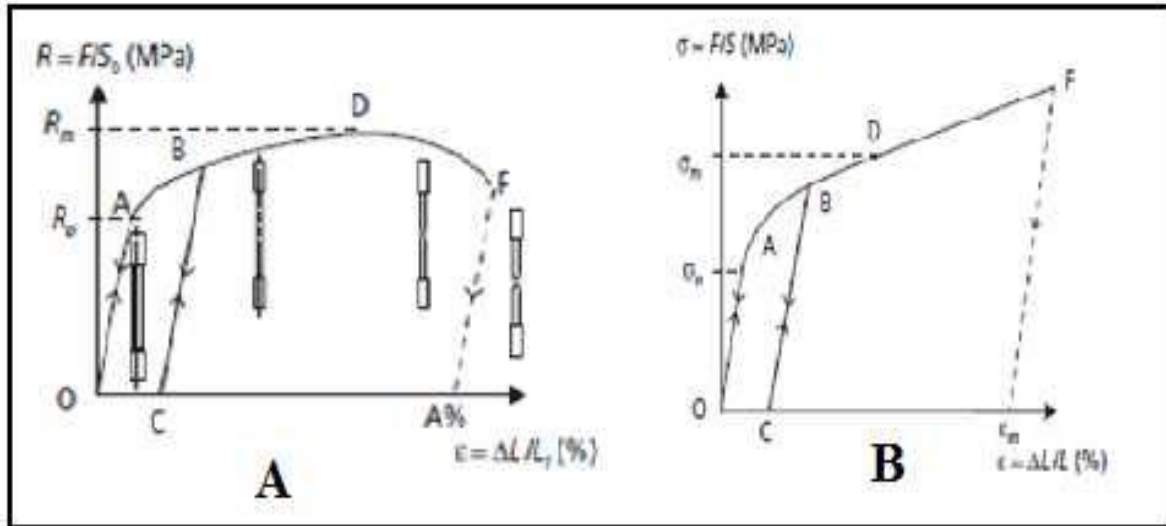


Figure III.15. A) Courbe conventionnelle R X ε e B) courbe rationnelle  $\bar{\sigma}$  X ε

### III.6. 1. Grandeurs conventionnelles

L’allongement pour-cent après rupture A est l’allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture  $L_u - L_0$ , exprimé en pourcentage de la longueur initiale entre repères  $L_0$ .

$$A = 100 \frac{L_u - L_0}{L_0} \text{ (\%)} \text{ (III.2)}$$

- La résistance à la traction  $R_m$  est la charge unitaire qui correspond à la charge maximale supportée par l’éprouvette.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (Mpa)} \text{ (III.3)}$$

La charge unitaire à la limite apparente d’élasticité s’appelle aussi, par abréviation, limite apparente d’élasticité  $R_e$  (ou parfois limite d’écoulement). Elle correspond à la charge  $F_e$  pour laquelle, pour la première fois, l’allongement de l’éprouvette continue à augmenter sans que la charge augmente, ou alors que celle-ci diminue.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ (Mpa)} \text{ (III.4)}$$

**III.6. 2. Grandeurs rationnelles**

Les grandeurs et caractéristique définis précédemment sont celle tirées d'une courbe de traction conventionnelle, elles sont liées à l'état initial de l'éprouvette, si l'on rapporte ces grandeurs à l'état instantané de cette dernière (section S et longueur L) on aura :

$$\sigma_e = F_e / S \quad (\text{Mpa}) \quad (\text{III.4})$$

Avec l'hypothèse de la conservation de volume après déformation plastique :

$$S.L = S_0 \cdot L_0 \rightarrow S = S_0 \cdot L_0 / L \quad (\text{III.5})$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{F_e \cdot L}{S_0 \cdot L_0} \\ \rightarrow \sigma_e &= R_e \cdot \frac{L}{L_0} \\ \rightarrow \sigma_e &= R_e \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \\ \rightarrow \sigma_e &= R_e \cdot (1 + e) \quad (\text{III.6}) \end{aligned}$$

$$\text{Avec : } e = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{III.7})$$

Ainsi, la limite d'élasticité rationnelle  $\sigma_e$  est supérieure de (1+ e) fois  $R_e$  (limite d'élasticité conventionnelle). Par un raisonnement analogue en remplaçant  $F_e$  par , on déduit  $\sigma_m$  représentant la résistance rationnelle (vraie) à la traction :

$$\sigma_m = R_m \cdot (1+e) \quad (\text{III.8})$$

On définit aussi la déformation vraie de l'éprouvette  $\epsilon$  , qui caractérise la somme des déformations relatives de l'éprouvette à tout instant et qui s'exprime par

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (\text{III.9})$$

Ce qui donne :

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \text{ (III.9)}$$

### III.6. 3. Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type IBERTEST. Cette machine est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre servant à mesurer la force appliquée à l'éprouvette, et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin mise en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette. On commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur. Ses caractéristiques sont :

- Vitesse d'essai : 0.9 mm/min ;
- Alimentation électrique T=220V, F=50Hz.

Une fois que la courbe brute de traction qui donne la variation de charge (**F**) appliquée à l'éprouvette en fonction de l'allongement ( $\Delta L$ ) subi par celle-ci est obtenue, il est nécessaire de modifier cette courbe afin de la rendre indépendante des dimensions initiales de l'éprouvette et uniquement caractéristique du matériau étudié. Pour se faire on divise la charge (**F**) sur la section initiale (**S<sub>0</sub>**) de l'éprouvette pour obtenir la contrainte nominale ( **$\sigma$** ).

L'axe des ordonnées est donc maintenant gradué en unité de contrainte, de façon semblable on divise l'allongement ( $\Delta L$ ) qui est la différence entre la longueur instantanée (**L**) et la longueur initiale entre repères (**L<sub>0</sub>**) de l'éprouvette par cette longueur initiale (**L<sub>0</sub>**) et on obtient ainsi la déformation généralement exprimée en pourcentage et l'axe des abscisses devient ainsi l'axe des déformations ( **$\varepsilon$** ), cette courbe relative est appelée courbe nominale de traction du matériau ou simplement courbe de traction .



**Figure III.16.** La machine de traction

#### **III.6. 4. Géométrie et dimensions des éprouvettes de traction ISO 5892-2 :**

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai.

La figure suivante représente notre éprouvette



**Figure III.17.** Éprouvette de l'essai de traction

#### **III.6. 5. Conditions de déroulement de l'essai**

Cet essai est réalisé au sein du laboratoire de epe/electro\_industries/spa dans des conditions ambiantes et isothermes, sur des éprouvettes cylindriques.

Les conditions de l'essai sont prescrites dans le tableau ci-après

**Tableau III.5.** Conditions de l'essai de traction

<b>Dimension des éprouvettes</b>	<b>valeurs</b>
<b>La longueur <math>L_0</math></b>	<b>50 mm</b>
<b>La longueur <math>L_c</math></b>	<b>60 mm</b>
<b>La température</b>	<b>25c°</b>
<b>La vitesse de l'essai</b>	<b>0.00025.Lc=0.9mm/min</b>

### **III.6.6. Méthodes de mesure de dureté**

Pour réaliser les essais de dureté sur matériaux métalliques, les principales méthodes utilisées s'appuient sur l'application d'une force statique moyennant un pénétrateur la profondeur de pénétration, soit la taille de l'empreinte, donne la mesure de dureté. Parmi les méthodes statiques de l'essai de dureté, on distingue les méthodes de mesure de la profondeur et les méthodes de mesure optiques.

#### **III.6.6.1 Méthodes de mesure de la profondeur**

La méthode Rockwell (HRA, HRC) est la seule dite normalisée de mesure de la profondeur. Des méthodes de mesure de la profondeur non-normalisées sont également proposées : Brinell et Vickers .

#### **III.6.6.2 Méthode de mesure optique :**

Consiste à mesurer la taille de l'empreinte permanente du pénétrateur. Les méthodes d'essais de dureté optiques normalisées sont l'essai de dureté Brinell, essai de dureté Knoop et essai de dureté Vickers .



**Figure III.18.** Unite pour L'essais de dureté de brinell.

### **III.6.7. Observations métallographiques**

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques. On soudage, on s'intéresse au changement structural principalement dans la ZAT de cordon de soudure

Avant l'utilisation de la microscopie optique, une préparation des échantillons devait être établie au préalable de la manière suivante :

1. Polissage,
2. Attaque chimique,

Pour cette analyse microscopique, nous avons utilisé un microscope optique , ayant un agrandissement variant de 50 à 1000. Il est équipé d'une caméra reliée à l'écran d'un ordinateur pour permettre la capture de photos de la structure observée et désirée.

La figure suivante représente le microscope utilisé au niveau du laboratoire du département de mécanique.



**Figure III.19.** Microscope optique.

- **Polissage**

Cette étape permet d'obtenir une surface avec un effet de miroir (la plus lisse possible et sans rayure). De la qualité du polissage dépendront en partie la viabilité des observations et les résultats de l'examen micrographique.

L'opération consiste à polir mécaniquement les échantillons à l'aide de papiers abrasifs en carbure de silicium. Ces papiers sont classés par grosseur de grains: 240,280, 400, 600, 800, 1000 et 1200. Ces nombres correspondent au nombre de grains utilisé par unité de surface (grains/cm<sup>2</sup>).

Le polissage est accompagné d'une lubrification constante à l'eau de l'échantillon afin d'éviter tout risque de surchauffe de ce dernier. Une opération de finition est exigée en utilisant un tapis de velours et une patte d'alumine( $Al_2O_3$ ). Cette ultime étape nous permet d'obtenir une surface avec un effet miroir où l'état de la surface doit être le plus lisse possible et ne possédant aucune rayure.

L'expérience s'est déroulée au niveau du centre de recherche et développement URD et au niveau de notre laboratoire SDM. La polisseuse utilisée est représentée dans la figure suivante.



**Figure III. 20.** Polisseuse utilisée.

- **Attaque chimique**

Par la suite, et pour mettre en évidence les phases présentes dans l'échantillon qu'est la structure micrographique, ces échantillons seront attaqués chimiquement par un réactif Nital qui consiste de : 1 à 4% de  $\text{HNO}_3$  , reste  $\text{C}_2 \text{H}_5\text{OH}$

Les échantillons furent immergés durant 30 à 40 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire.

L'opération s'est déroulée au niveau du laboratoire des recherches scientifiques.

### **III.6. 8. Aspects métallurgiques de soudage par aluminothermique**

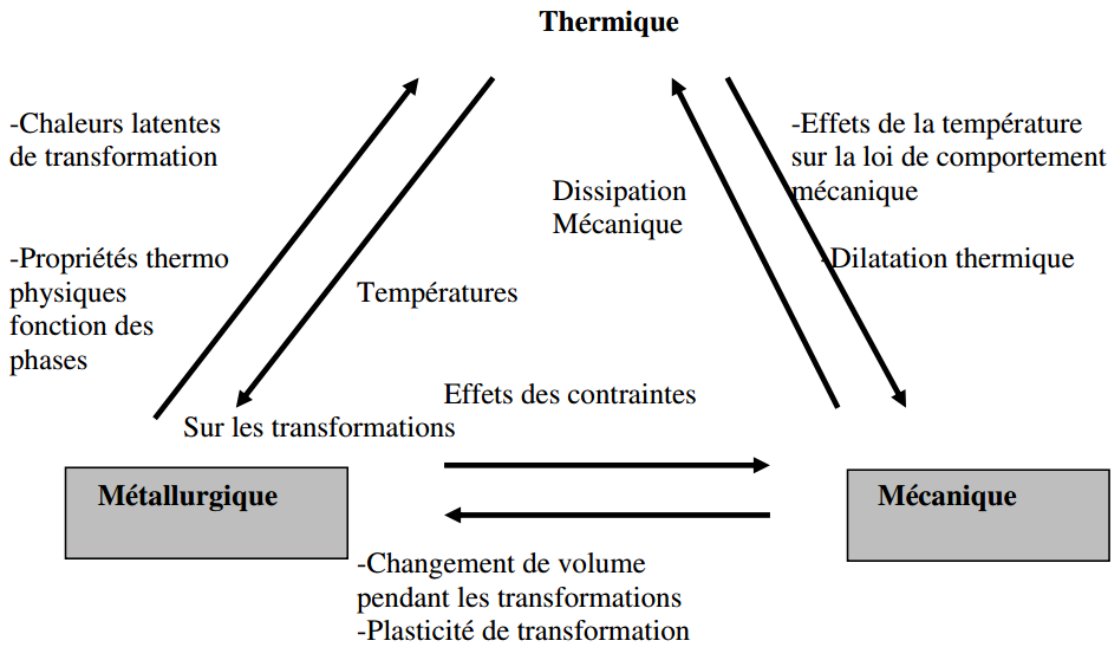
Le procédé de soudage consiste à assembler deux éléments métalliques, par fusion impliquant des phénomènes qui interviennent de façon couplée dans le cordon de soudure.

Ces phénomènes sont définis par les qualificatifs suivants :

**a. Thermique :** Apport de chaleur (conduction et convection),

- b. Métallurgique :** Evolutions microstructurales,
- c. Mécanique:** contraintes et déformations résiduelles induites lors du soudage.

Les interactions entre ces phénomènes sont représentées par la figure



**Figure III. 21.** Phénomènes physiques impliqués et leurs couplages lors de soudage. [20]

**Conclusion**

Le soudage aluminothermique est le procédé le plus adaptable pour l'assemblage, des rails malgré ces quelques défauts tels que les souffleurs

# *Chapitre IV*

## *Résultats et discussions*

## Introduction

L'agence ANESRIF a récemment offert une expérience inestimable en matière de développement de compétences dans le domaine du soudage des métaux, en mettant particulièrement l'accent sur le soudage thermo-thermique. Cette opportunité s'est révélée cruciale pour répondre à une problématique spécifique, à savoir le choix des procédés de soudage appropriés pour les rails ferroviaires. Dans le cadre de notre scène pratique au sein de l'entreprise, nous avons entrepris la collecte d'échantillons représentatifs de soudures réalisées avec différents procédés sur le matériau R260. Notre objectif principal était d'évaluer la fiabilité de ces soudures en termes de résistance à la traction et à l'usure, deux critères essentiels dans l'industrie ferroviaire. Cette démarche a permis d'approfondir nos connaissances et compétences dans le domaine du soudage des métaux

### IV.1. Composition chimique de l'acier utilisé

- **Matériau utilisé** : acier de nuance R260 utilisé dans le chemin de fer est de structure perlitique  $[P=F+Fe_3C]$  selon la norme EN13674, présentant un durcissement structural appréciable
- **Composition chimique R260**

Tableau IV.1. Composition chimique de l'acier R260[17]

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Al	%V
0,50% 0,76 Soit 0,6	1,8	0,31	0,013	0,018	0,040	0,003	0,004

### VI.1.1 Propriétés mécaniques de l'acier

Les caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Propriétés mécaniques de l'acier R260 [17]

Re(Mpa)	Rm(Mpa)	Ar%	HRC
480	880	10	60-64

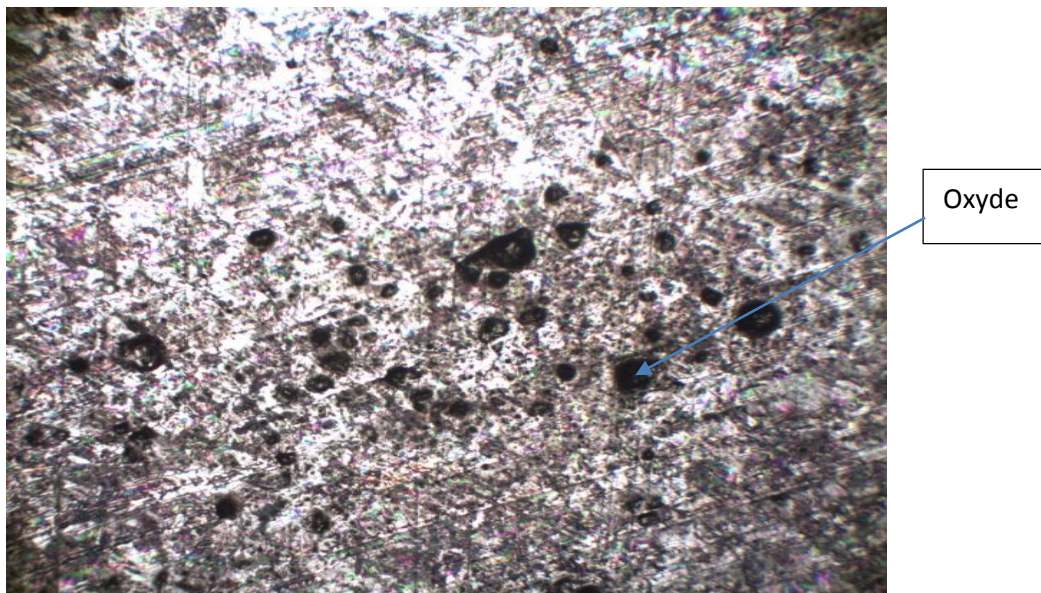
**VI.1.2 Essai de dureté de métal de base(MB)**

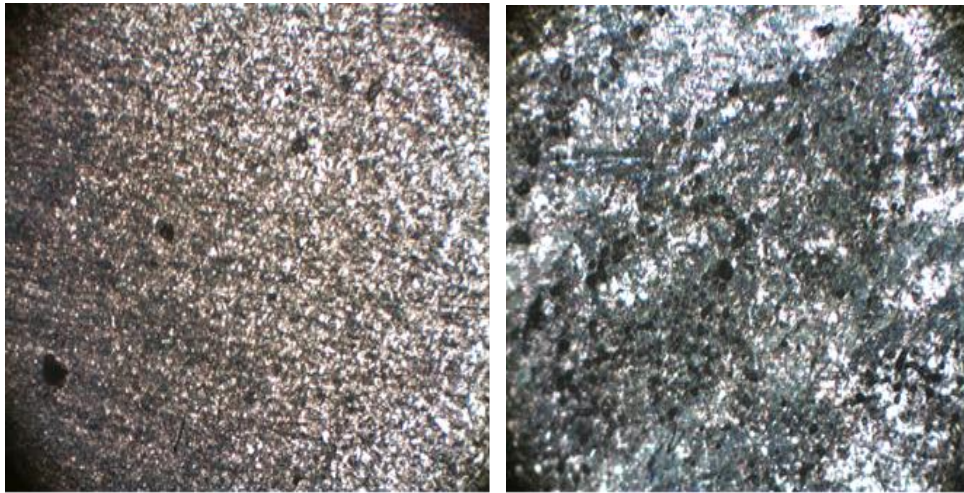
Les essais de dureté représentent une grande utilité dans la caractérisation de la soudure en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues permettent certains classements. Selon les critères imposés Cependant, le processus opératoire doit être très précis pour assurer une meilleure fidélité des résultats. Ceci explique le grand nombre de normes dans ce domaine. Le principe des essais de dureté consiste à enfoncer un pénétrateur en bille en acier dure dans le métal analysé.

Les valeurs de l'essai de dureté HRA de l'acier R260 (métal de base) sont illustrées dans le tableau suivant :

**Tableau IV. 3.** Les valeurs de l'essai de dureté (HRA/R260)

Echantillon	1	2	3	Dureté moyenne
Dureté (HRA)	60	60,3	61	60,33

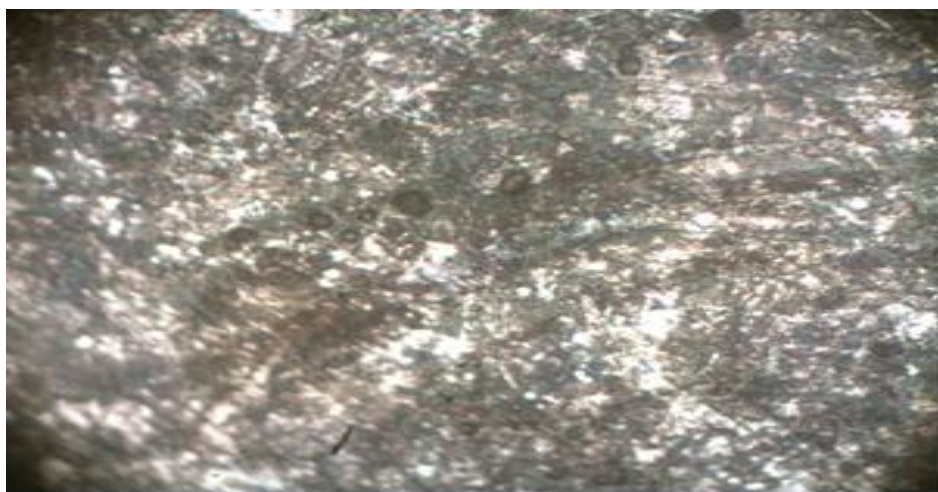
**VI.1.3 Microstructure de l'acier de nuance R260 (MB)****Figure IV.1.** Microstructure du métal de base R260, G X40



**Figure IV. 2.** Micro structure du métal de base R260 X100



**Figure IV.3.** Microstructure du métal de base R260 , G.X200



**Figure IV.4.** Microstructure du métal de base R260,G.X400

**Discussions :**

L'acier de nuance R260 est principalement constitué de grains de ferrite et de perlite en abondance . La ferrite est une phase cristalline du fer qui est stable aux températures plus basses. Elle est généralement douce et ductile . La perlite est une structure composee de ferite et de la cementite favorisant la resistance à l'usure .

**VI.2. Soudage aluminothermique**

**VI.2.1. Composition chimique de la charge aluminothermique**

Elément %	Intervalle autorise %	
	MIN	MAX
Carbone	0.35	0.70
Silicium	0.00	1.20
Manganèse	0.45	1.20
Phosphore	0.00	0.035
Soufre	0.00	0.035
Chrome	0.00	0.20
Molybdène	0.00	0.10
Nickel	0.00	0.10
Aluminium	0.02	0.60
Cuivre	0.00	0.20
Etain	0.00	0.02
Titane	0.00	0.05
Niobium	0.00	0.01
Vanadium	0.00	0.25

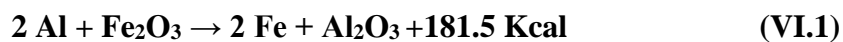


**Figure IV.5.** Poudre aluminothermique [17]

**VI.2.2 Bilan technique de la réaction chimique :**

**VI.2.2.1 Calcul de la charge :**

soit la reaction :



Un poids de fer coulé optimal doit être défini comme suit : si le lingot est trop petit, il refroidit trop vite et entraîne des défauts du type fissures à chaud . L'expérience montre que le poids optimal de fer à couler est 5,8 fois le poids de l'intercalaire .

pour un rail de 66 kg/m, soit 66 g/mm, l'intercalaire de 25 mm pèse 1 660 g. Le poids de fer à couler est donc de :

$$\text{Poid de fer} = 1660 \times 5,8 = 9570 \text{ g de fer}$$

➤ Le rapport stœchiométrique aluminium/fer

$$\text{Rapport stœchiométrique aluminium/fer} = 54 / (2 \times 55,8) = 0,45$$

En pratique, on utilise un ratio de 0,30. La quantité d'aluminium à utiliser sera donc :

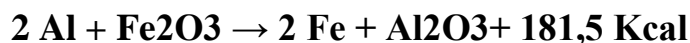
$$\text{Al (g)} = 9570 \times 0,30 = 2871 \text{ g}$$

Donc la charge va contenir

$$2871 \text{ g (Al)} \times DG^\circ \text{ (Al)} (1600\text{J/g (Al)}) = 46 \text{ MJ}$$

soit 4 fois plus qu'une soudure électrique .

### **VI.2.3 processus de la réaction chimique lors de soudage aluminothermique**



Le soudage aluminothermique est un procédé de soudage par réaction chimique exothermique dans creuset et par coulée de métal en fusion.

La chaleur nécessaire a la fusion des bouts de rails de fer par l'aluminium suivant la réaction précédente

Celle-ci se décompose en deux demi réactions :



**VI.2.4 Température de préchauffage (TP)**

La température de préchauffage (TP) compte tenue de la teneur élevée de l'acier R260, un pré chauffage avant d'entamer de la soudure est plus que nécessaire pour éviter de la structure fragile (martensite).

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

$$\text{CeqC} = \text{Ceq} + 0,0254 \times e$$

$$\text{Tp} = 350 \sqrt{\text{Ceqc} - 0,25} \text{C}^\circ$$

**Si Ceq %  $\geq$  0,43 le préchauffage est nécessaire**

Soi la composition suivante R260

**0,62 %C, 0,7% Mn, 0,15% Si**

- $\text{Ceq} = 0,62 + 0,7/6 = 0,73\%$

**Ceq% est  $\geq$  0,43%**

- **Carbone equivalent compensé  $\text{CeqC} = \text{Ceq} + 0,0254 \times e$**

$e = 150 \text{ mm}$

- $\text{CeqC} = 0,73 + 0,0254 \times 150$

$\text{Ceq C} = 4,48\%$

$$\text{Tp} = 350 \sqrt{(\text{Ceqc} - 0,25)}$$

$\text{Tp} = 653,31\text{C}^\circ$

VI.2.5 Essai de dureté

Nombre d'essais	1	2	3
ECH (HRA)	64	64,5	64

VI.2.6 Essai du dureté de la zone fondue du soudage aluminothermique

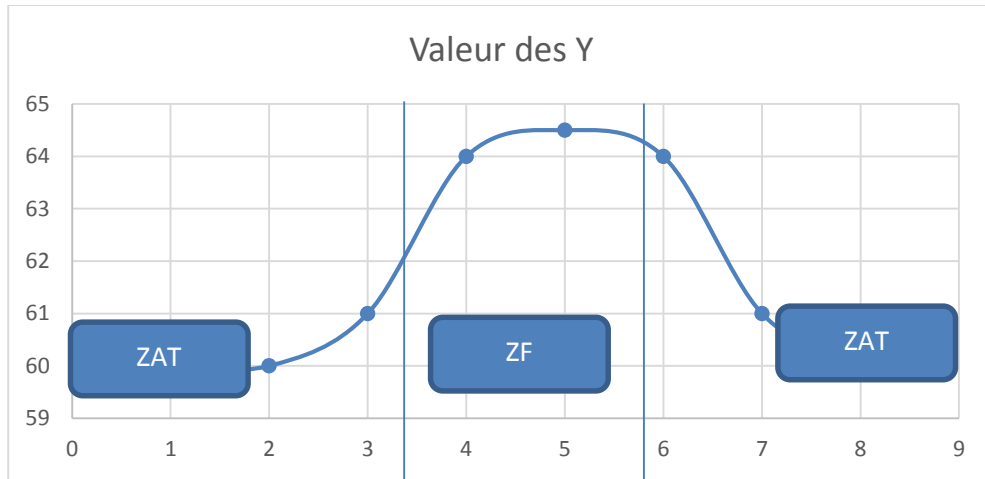


Figure IV.6. Durete HRA de la soudure aluminothermique

VI.2.7 Microstructure de la zone fondue aluminothermique

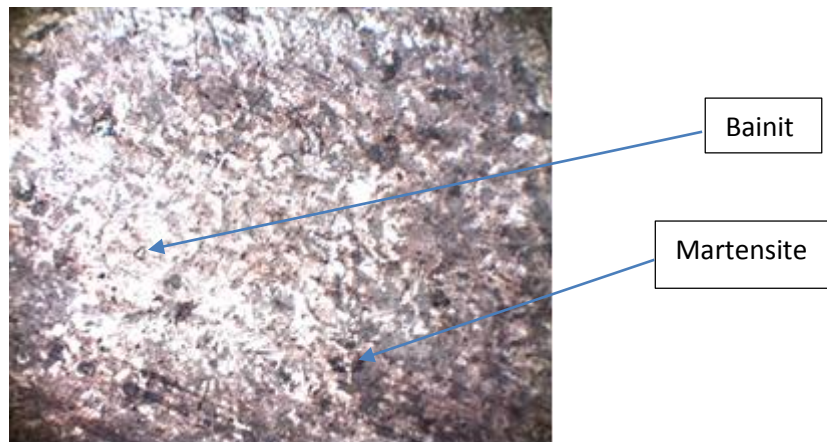
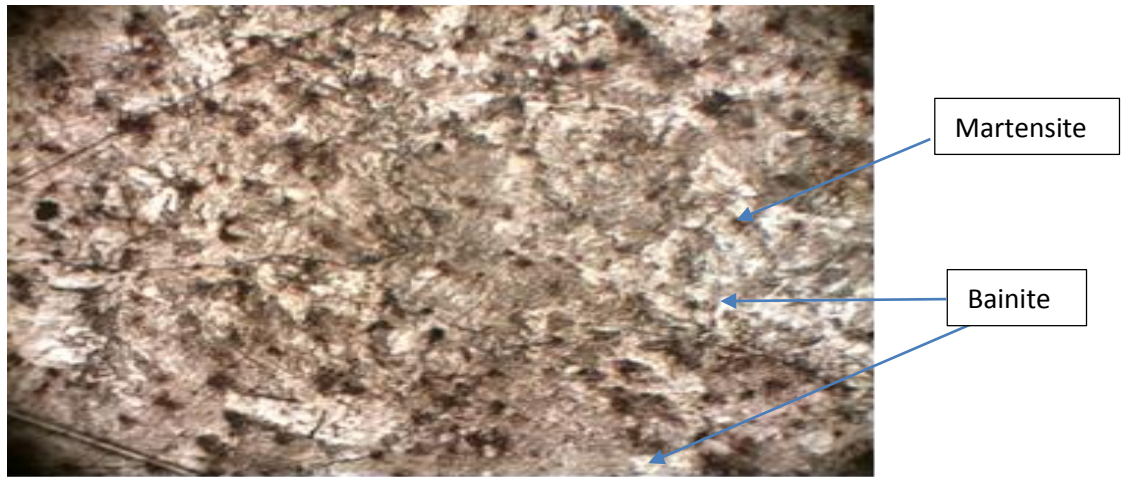
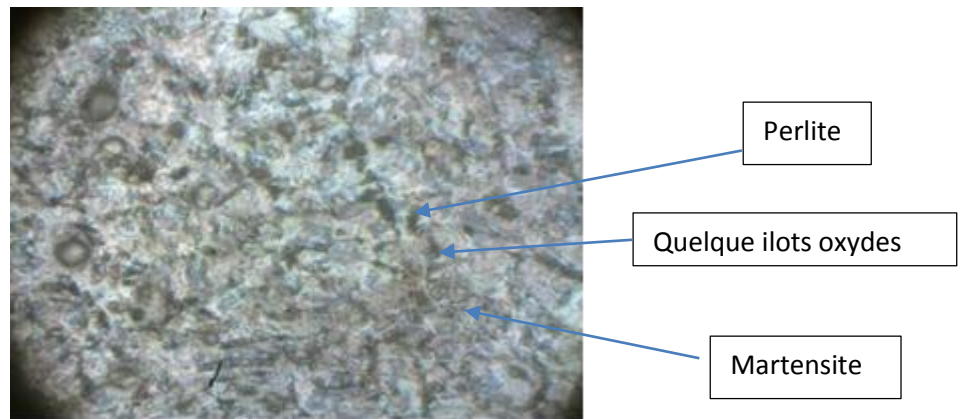


Figure IV. 7. Microstructure de la zone fondue G.X40



**Figure IV.8. Microstructure de la zone fondue G.X100**



**Figure IV.9. Microstructure de la zone fondue G.X400**

**Discussions :**

Zones de fusion (ZF) : Le processus de soudage aluminothermique implique généralement la fusion de l'acier des rails de chemin de fer dans la zone de soudage. Cette fusion est provoquée par la réaction exothermique entre la poudre d'aluminium et l'oxyde de fer dans le matériau de base. La zone de fusion résultante est généralement caractérisée par une microstructure composée de quelques ilots de martensite devant la perlite avec prédominance de la bainite. Ceci se traduit par l'évaluation substantielle de la dureté par rapport au MB et à la ZAT de la soudure.

VI.2.8 Essais de traction

On commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur. Ses caractéristiques sont:

Vitesse d'essai: 0.9 mm/min ;

Alimentation électrique T=220V, F=50Hz.

Selon la norme ISO 5892-2 :

Température ambiante 23C°

La figure suivante représente la géométrie de l'éprouvette

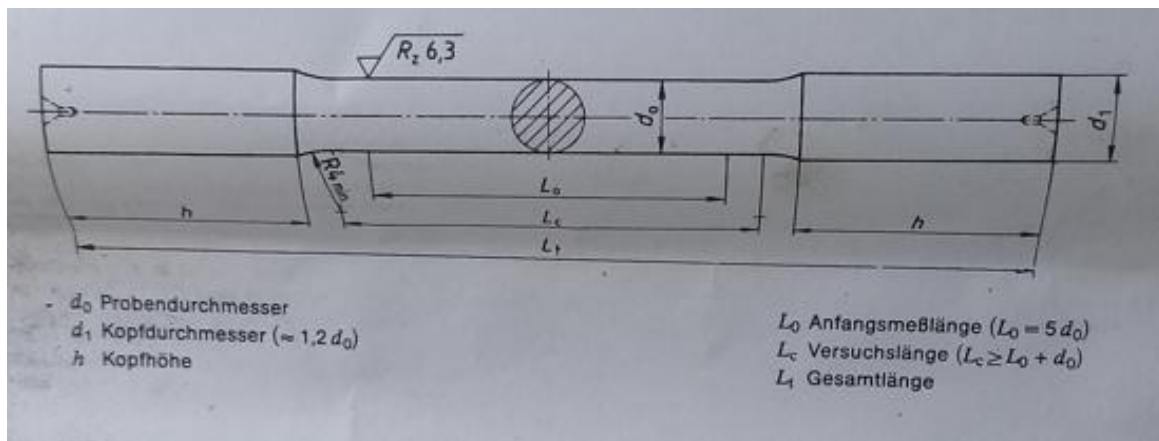


Figure IV.10. Géométrie et dimensions de l'éprouvette

Les paramètres de l'éprouvette

- **Lc=60mm**
- **d0m=9,96mm**
- **L0=50mm**
- **S=77,92mm<sup>2</sup>**

Tableau IV. 4. Résultats de laisai de traction

<b>Force (N)</b>	<b>36000</b>	<b>48000</b>	<b>55610</b>
<b><math>\Delta l</math>(mm)</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>19</b>
<b><math>\bar{\sigma}=F/S_0</math>(Mpa)</b>	<b>462,01</b>	<b>616,01</b>	<b>713,68</b>
<b><math>\epsilon =\Delta l/l_c</math>(%)</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>33</b>

## ❖ Courbe de traction

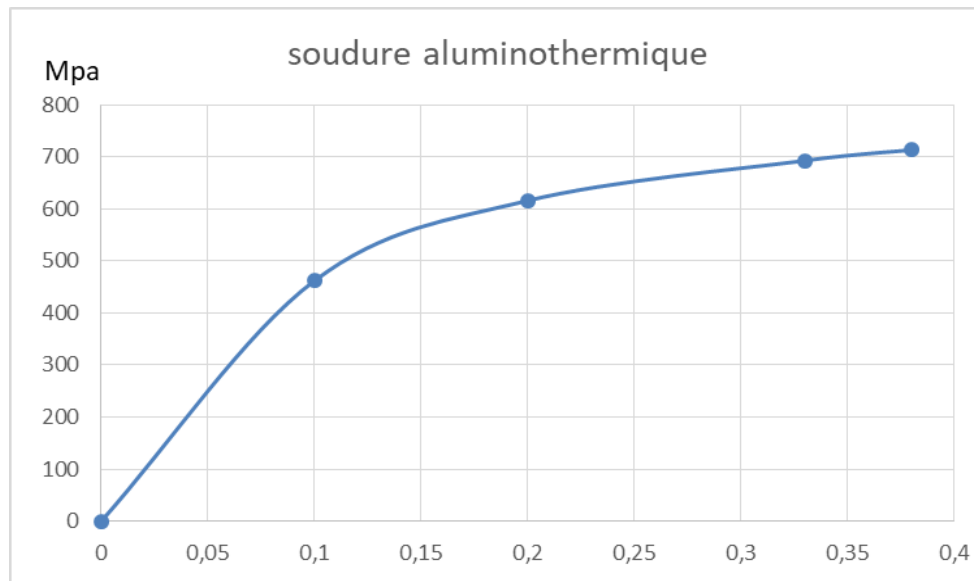


Figure IV. 11. Courbe de traction

### IV.3. Soudage à l'arc électrique(SMAW)

La soudure à l'arc est le type générique de plusieurs méthodes et principes de soudage utilisant l'arc électrique pour élever la température des métaux à souder jusqu'au point de fusion.

#### IV.3.1. Principe de la soudure à l'arc

Le principe de la soudure à l'arc tient dans le principe de l'élévation de la température au point de fusion par utilisation d'un arc électrique.

C'est l'échauffement créé par la résistivité des métaux parcourus par l'électricité qui élève la température au point de soudure jusqu'à celle requise pour la fusion du métal.

- Le poste à souder délivre un courant électrique (alternatif ou continu).
- La pièce à souder est reliée à un pôle et sur le second pôle c'est une électrode qui transporte le courant électrique et se consomme.
- L'opérateur manœuvre le porte -électrode pour amener l'électrode à frôler la surface de la pièce à souder.
- L'arc électrique qui se crée provoque l'échauffement du métal de la pièce à souder.

- Bien évidemment, si l'électrode entrait en contact avec la pièce à souder, le dispositif serait en court-circuit d'où les caractéristiques et protection internes du poste à souder.

### **IV.3.2. Matériel de soudure à l'arc électrique**

La matérielle dessoudure à l'arc se compose

- a. Poste à souder qui est un générateur électrique reliant par un câble à la pièce à souder et par un autre à la porte électrode.
- b. L'électrode soudure qui peut être une baguette ou un fil continu selon le procédé de soudage utilisé, l'électrode est fusible (fondant lors de la soudure) ou non fusible (sans perte de matière d'électrode lors de la soudure) dans ce cas un métal d'apport est nécessaire par utilisation de baguettes à souder.
- c. Le masque à souder et les gants sont la base de l'équipement de protection.

### **IV.3.3. Méthodologie de soudage de l'acier à l'arc électrique**

Avant de souder une pièce en acier il est important de la préparer judicieusement.

- a. Préparation de la pièce : avant de commencer le soudage, la calamine doit être nettoyée .pour cela il suffit d'utiliser un chiffon imbibé de dégraissant .Une fois la pièce lavé il peut être également important de la nettoyer sa surface à l'aide d'abrasifs.
- b. Le bridage des pièces : pour souder correctement il est aussi important de savoir qu'il faudra les brider. L'idéal est de posséder une table de soudure avec un plateau multifonctionnel.
- c. Travailler dans de bonnes conditions : la soudure est une activité à réaliser avec précaution tout d'abord, les travaux de soudure doivent être réalisés dans espace aère. Il est également nécessaire de prendre en considération le caractère inflammable des gaz de protection et d'autre.

### **IV.3.4. Dimensions des pièces à souder**

- La longueur 80mm
- La largeur 8,34mm
- La partie (ZAT) 4mm a 8mm
- Le diamètre d électrode enrobée 5mm

**IV.3.5. Paramètres de soudage appliqués à l'arc électrique sur l'acier R260**

❖ L'intensité du soudage en ampères (I)

$I = 50(d-1) \text{ (A)}$   
 $I = 50 \times (5-1)$   
 $I = 200 \text{ A}$

❖ La tension du soudage en volts (V)

$U = 20 + 0.04XI \text{ (V)}$   
 $U = 20 + (0,04 \times 200) = 28V$

❖ L'énergie du soudage en J/cm

$E = U \cdot I / V$   
 $E = (60 \times 28 \times 200) / 20 = 16,8 \text{ KJ/cm}$   
 (V = vitesse de soudage en cm/min),

**Tableau des paramètres de soudage**

**Tableau IV.5.** Paramètres de soudage

I(A)	U(v)	E(J/cm)	TP C°
<b>200A</b>	<b>28V</b>	<b>16800 J/cm</b>	<b>232 C°</b>

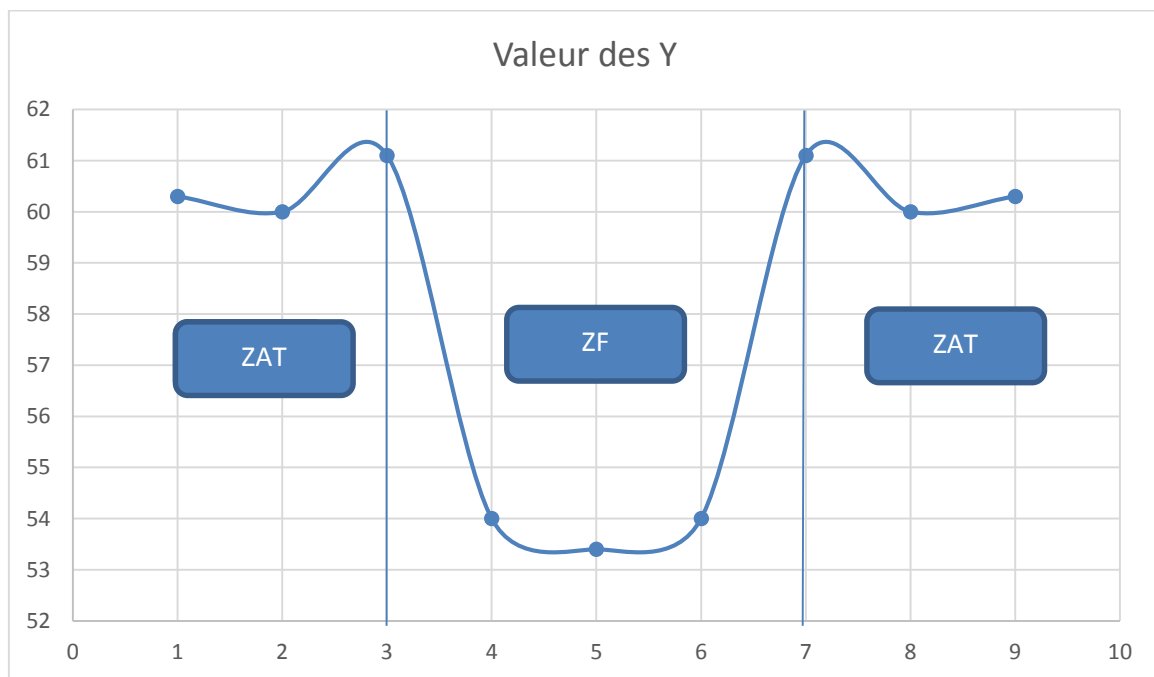
L'exécution de la soudure s'est effectuée sur l'acier R260 de l'épaisseur 4mm, en multi passe avec électrodes basique de diamètre 5mm un préchauffage a été aussi appliqué pour TP=232C°

**IV.3.5. Essais de l'acier R260 de la et de la zone affecte thermique de soudage à l'arc électrique**

**Tableau IV.6.** Durete HRA de la soudure sur R260

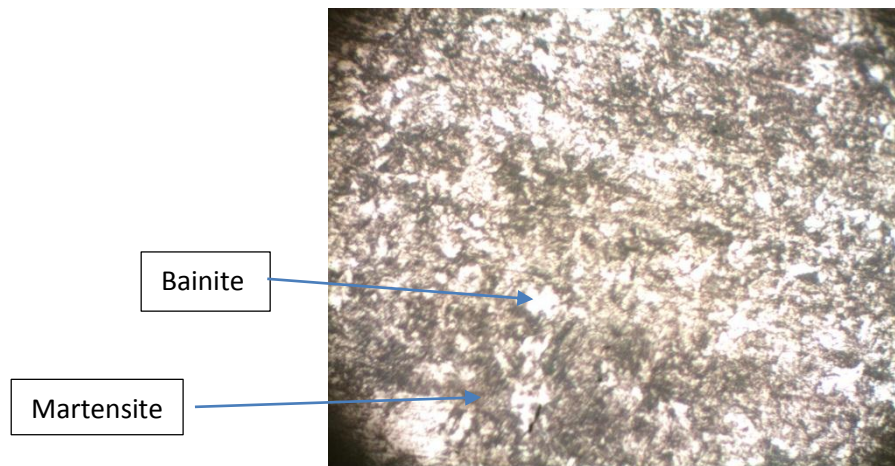
Nombre d'essai	1	2	3	Moyenne
La dureté de la zone fondue ZF (HRA)	54	54	53,8	54
la dureté de la ZAT (HRA)	60	59	61	60

La figure suivante représente le profil de dureté du cordon

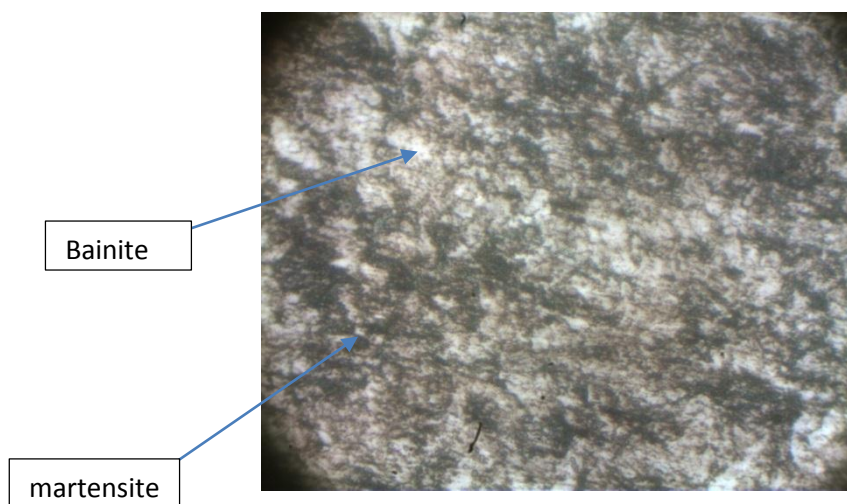


**Figure IV .12 . Profil de dureté du cordon**

**B. Analyse métallographie de la zone fondue ZF**



**FigureIV.13.** Microstructure de la zone fondue G.X200

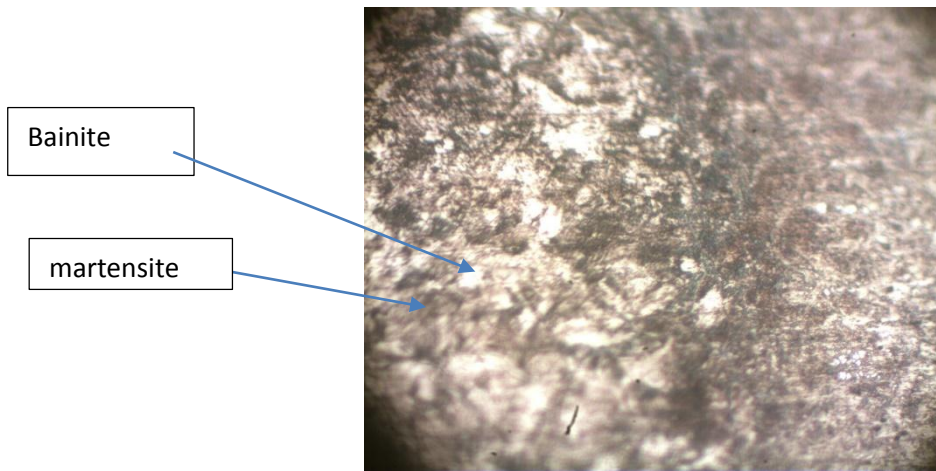


**Figure IV.14.** Microstructure de la zone fondue G.X400

**Discussions**

La structure est prédominée par la présence de bainite devant la martensite.

**C . Analyse métallographie de la ZAT**



**Figure IV.15.** Microstructure de la ZAT x 400

**Discussions**

La ZAT est la zone entourant la zone fondue qui subit de sévère changements structuraux altérant généralement la tenue à la résilience des soudures. A cet , effet un choix judicieux des paramètres de soudage et de préchauffage s'impose.

**D. Essais de traction**

Selon la norme ISO 5892-2

Température ambiante 23C°

Les paramètres de l'éprouvette

- **Lc=60mm**
- **d0m=8,34mm**
- **L0=50mm**
- **S=54,60mm<sup>2</sup>**

**Tableau IV. 7.** Résultats de l'essai de traction

<b>Force (N)</b>	<b>10000</b>	<b>21210</b>
<b>Δl(mm)</b>	<b>2</b>	<b>5</b>
<b>σ=F/S0(Mpa)</b>	<b>183,15</b>	<b>392,77</b>
<b>ε =dl/lc(%)</b>	<b>4</b>	<b>10</b>

## ❖ Courbe de traction

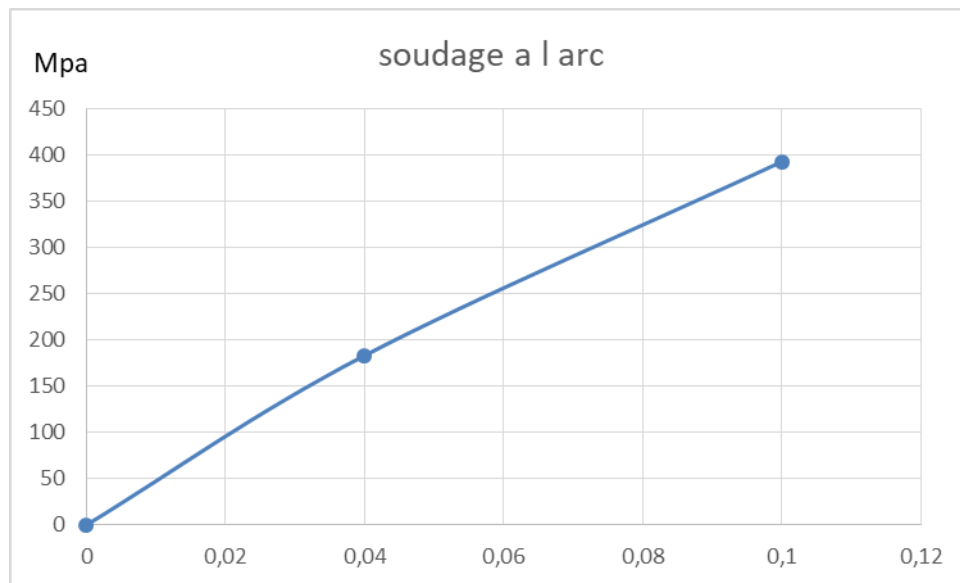


Figure IV.16. Courbe de traction

#### IV.4. Soudage par friction

Le soudage par friction utilise la déformation relative des deux pièces à souder pour produire des interfaces non-contaminées. En même temps, l'énergie dissipée par frottement chauffe les interfaces pour faciliter leurs cisaillements. Poudres géométries cylindriques, le mouvement est en général fait par une rotation ce qui permet de garder pendant tout le cycle de soudage un alignement précis. Les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre de manière que le mouvement relatif produise de la chaleur par frottement. Ensuite, la rotation est arrêtée et la pression est augmentée. Au final on produit un joint forgé par déformation coordonnée.

Il existe plusieurs façons pour réaliser ce mouvement relatif :

- une partie tourne, l'autre est fixée
- les deux pièces tournent en sens opposé
- les deux pièces tournent avec la même vitesse et une troisième pièce au centre reste immobile (une sorte de métal d'apport) joignant ainsi les deux premières pièces

L'usinage d'une pièce rectangulaire en une forme cylindrique sur une machine de tour implique plusieurs étapes de base. Voici les principales étapes du processus :

- **L'usinage de la pièce :**

1. Fixation de la pièce ;
2. Réglage des paramètres de coupe ;
3. Définir la vitesse d'avancement ;
4. Dressage du visage ou de la face ;
5. Usinage de la partie cylindrique en plusieurs passes ;
6. Utiliser des instruments de mesure tels que des micromètres ou des pieds à coulisse, pour vérifier régulièrement les dimensions de la pièce et vous assurez qu'elle atteint les tolérances spécifier ;
7. Finir le travail avec des outils appropriés pour obtenir une surface cylindrique lisse et de haute qualité ;
8. Retrait de la pièce ;
9. Contrôle final ;
10. Nettoyage et entretien ;



Figure IV.17. Soudage par friction

- ✚ **Paramètres de la pièce R260**

- ✓ longueur 140 mm
- ✓ Diamètre 8,41mm
- ✓ Vitesse de Mondrian 500 tr/min

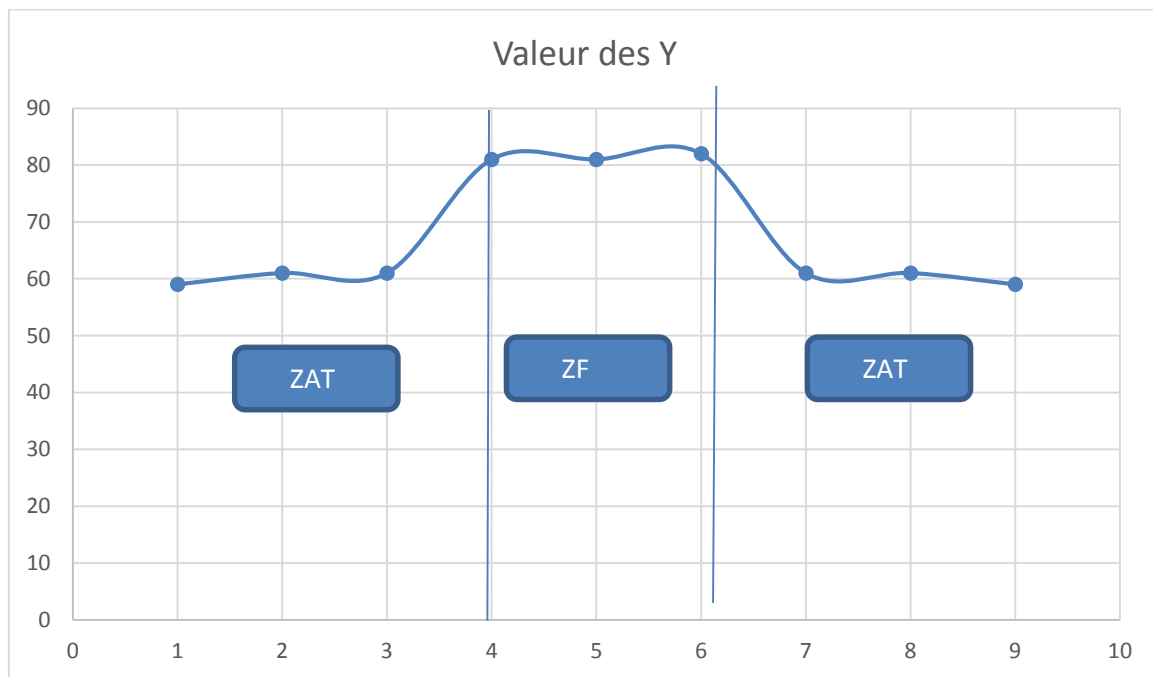
**A. Essais de dureté de la zone fondue ZF et la ZAT**

Les valeurs de l'essai de la zone fondue et la ZAT

**Tableau IV.8.** Valeurs de l'essai dureté zone fondue ZF et la ZAT

Nombre d'essai	1	2	3	Moyenne
L'essai de dureté ZF (HRA)	81	81	82	81,33
L'essai de dureté ZAT	59	61	61	60,33

La figure ci-dessous représente le profils de la dureté HRA de la ZF et de la ZAT



**Figure IV.18.** Variation de la dureté HRA de la soudure par friction sur R260

**Discussions :**

La dureté de la ZF est plus élevée que celle de la ZAT ; Ceci s'explique par la présence notable de la martensite dans la ZF suite au cycle sévère de soudage (dissipation rapide de la chaleur) .

A. Microstructure de la zone fondue (ZF)

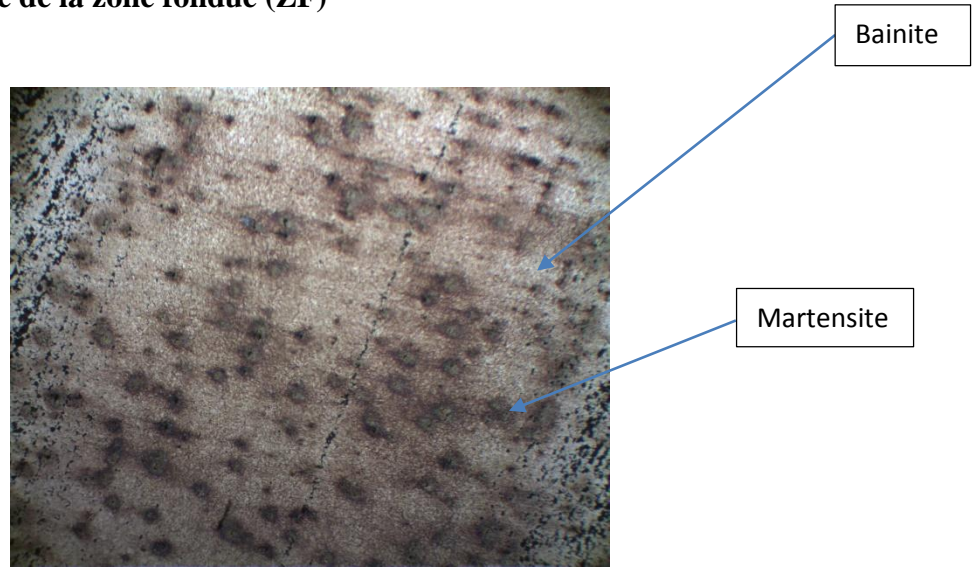


Figure IV.19. Microstructure de la zone fondue G.X40

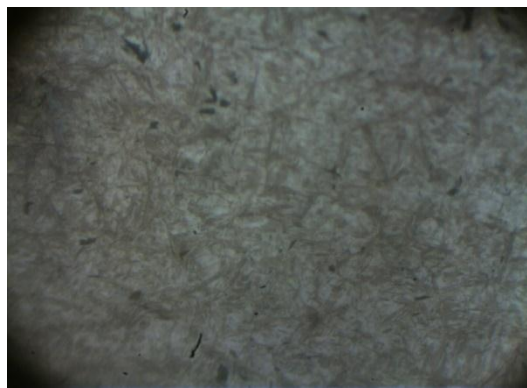


Figure IV.20. Microstructure de la zone fondue 400.

B. Microstructure de la ZAT



Figure IV.21. Microstructure de la ZAT G.x 100

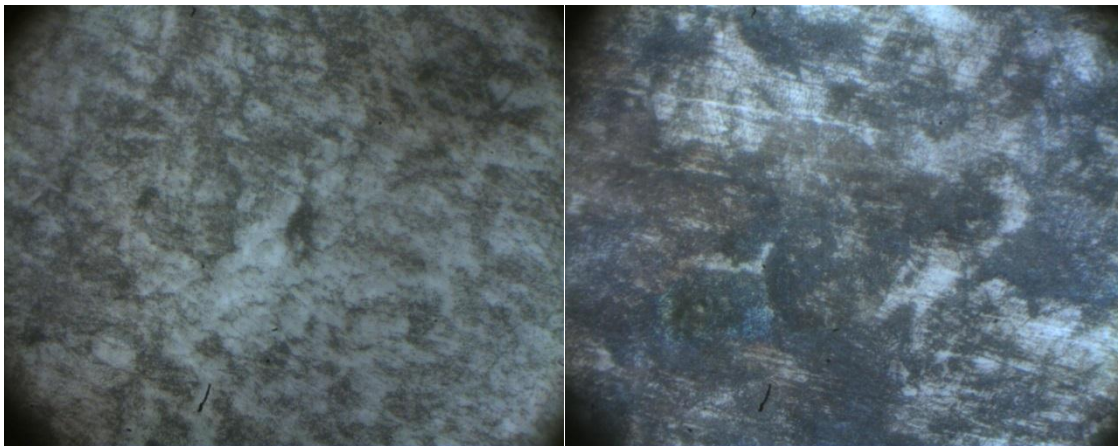


Figure IV.22. Microstructure de la ZAT G.x 400

**Discussions :**

Avec une vitesse de rotation de 500 tours par minute et un temps de soudage de 5 secondes dans le processus de soudage par friction de l'acier R260, on peut s'attendre à une microstructure particulière dans la zone fondue. Ces paramètres de soudage par friction rapide et intense, ce qui peut influencer la microstructure de manière spécifique. Voici ce que l'on peut anticiper d'après cet analyse : Une vitesse de rotation élevée et un temps de soudage court donnent généralement la formation d'une microstructure fine et équiaxe composée de bainite et de martensite dans la zone fondue. Les grains seront relativement petits et répartis, ce qui peut contribuer à de bonnes propriétés mécaniques. la structure décollant dans la zat est de degré moindre qui induit à l'abaissement significatif de la dureté.

**C. Essai de traction**

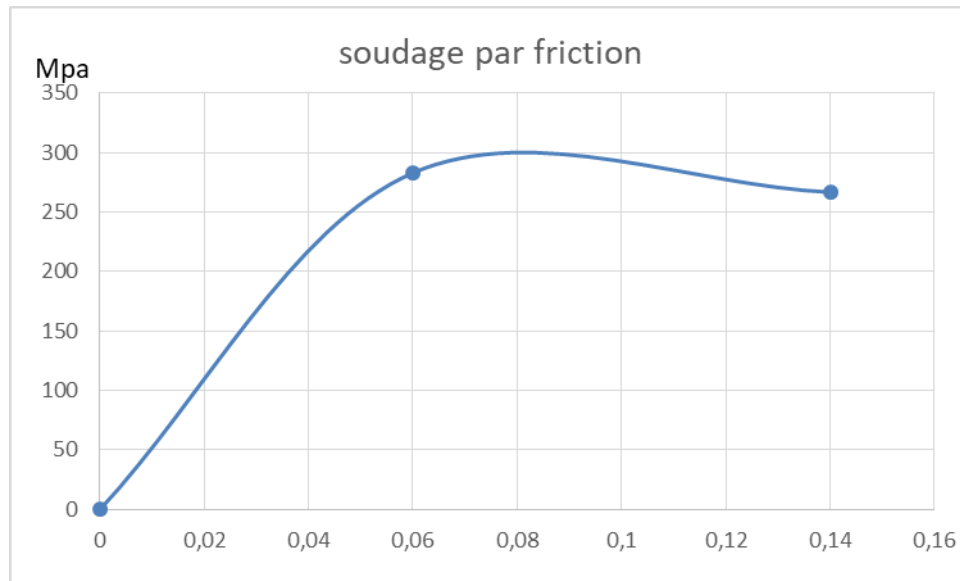
Les paramètres de l'éprouvette :

- **Lc=60mm**
- **d<sub>0m</sub>=8,41mm**
- **L<sub>0</sub>=50mm**
- **S<sub>0</sub>=55,47mm<sup>2</sup>**

Tableau IV. 9. Résultats de l'essai de traction

<b>Force (N)</b>	<b>14800</b>	<b>15700</b>
<b>Δl(mm)</b>	<b>7</b>	<b>3</b>
<b>σ=F/S<sub>0</sub>(Mpa)</b>	<b>266,89</b>	<b>283,83</b>
<b>ε =dl/lc(%)</b>	<b>14</b>	<b>6</b>

## ❖ Courbe de traction

**Figure IV.23.** Courbe de traction**- Discussions des résultats de l'essai de traction :**

L'essai de traction appliqué sur l'assemblage soudé par différents procédés, on constate que la soudure aluminothermique est plus fiable du fait que la rupture s'est réalisée à l'extérieur du cordon.

Quant aux autres soudures la fracture se situe à l'intérieure, ce fait pourrait être attribué à la fragilité de la structure après le refroidissement et éventuellement des défauts métallurgiques.

On observe aussi un écart sensible entre les propriétés de résistance du métal de base et celles des soudures.

**Conclusion**

## Conclusion

Le soudage aluminothermique est une méthode essentielle pour assurer la continuité des rails dans les infrastructures ferroviaires. Grâce à sa capacité à créer une soudure solide à l'échelle atomique, cette technique offre de nombreux avantages, notamment la durabilité, la résistance, et la réduction des coûts de maintenance. Elle est particulièrement adaptée à l'assemblage de rails de divers types, qu'il s'agisse de rails Vignoles, de rails à gorge, d'appareils de voie ou de burbach.

Les avantages du soudage aluminothermique par rapport à d'autres méthodes sont nombreux, notamment sa facilité d'application sur place, son autonomie énergétique, l'élimination des joints de rails traditionnels, la résistance à la corrosion, la conductivité électrique élevée, et les excellentes propriétés mécaniques.

La maîtrise des paramètres de cette technique est cruciale pour garantir des soudures de qualité et contribue à sa pertinence dans diverses applications, y compris le soudage de pièces en acier au carbone et en aciers spéciaux tels que les aciers inoxydables.

Les caractérisations des soudures effectuées par les procédés FSW, SMAW et aluminothermique nous montrent que ce dernier est mieux adaptable au soudage des rails. La microstructure résultante de la ZF et de la ZAT est prédominée par la présence de bainite qui garantit un compromis entre la résistance et la résilience. Ceci se traduit aisément par l'essai de traction, la fracture se réalise en dehors du cordon qualifiant ainsi la fiabilité de la soudure comparativement aux autres procédés.

L'utilisation des procédés SMAW et FSW dans ce domaine de soudage des rails implique des mesures spéciales tels que le préchauffage et post chauffage adéquats afin d'éviter des structures fragiles.

Nous suggérons de reprendre cette étude en introduisant d'autres procédés de soudage tel que le procédé de soudage par impulsion et une de procéder à l'analyse technicoéconomique.

## *Bibliographie*

- [1] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [2] C. CHAUSSIN et G. Hilly « Métallurgie, alliages métalliques » Tome 1, édition DUNOD, Montréal, 1976.
- [3] A. Roos, B. Milet. "Précis de métallurgie Appliquée", Edition Technique et Documentation- Lavoisier (1982).
- [4] J. Paul bailon, J. Marie dorlot." Des matériaux", 3eme édition 2000-2001.
- [5] Mohamed Reda berrahmoun , transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austenitique instable 301In2006
- [6][https://savoir.ensam.eu/moodle/pluginfile.php/339738/mod\\_resource/content/1/Chap1\\_Rap\\_pels%20et%20prerequis.pdf](https://savoir.ensam.eu/moodle/pluginfile.php/339738/mod_resource/content/1/Chap1_Rap_pels%20et%20prerequis.pdf)
- [7] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Soudage.html>
- [8] <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/machines-de-soudage-87>
- [9] Short-arc.Jean-Pierre : « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode »  
Planckaert Centre de Recherche en Automatique de Nancy CRAN – CNRS UMR 7039  
2088
- [10] <https://www.rocdacier.com/soudure-tig-procede-gtaw/>
- [11] <https://www.jungheinrich-profishop.fr/fr/guide-pro/type-de-soudure/>
- [12] <https://www.rocdacier.com/soudage-aluminothermique/>
- [13] Bill Taylor, Anne Guesnier : Métallographie des soudures.
- [14]E. Kaluc, L. Capan, S. Anik : « Effets des paramètres du soudage sur la résistance en traction-cisaillement de différents aciers inoxydables soudés par points »,  
Matériaux et Techniques n° 1-2, pp.11-13, (1997).

[15] <https://www.yumpu.com/fr/document/view/11735528/defauts-de-soudure>

[16] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Rail.html>

[17] Norme EN 14730-1 Soudure Aluminothermique

[18] <https://www.lavoixdunord.fr/art/region/la-soudure-aluminothermique-des-rails-un-veritable-jna27b0n819507>

[19] <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tal>

[20] <http://www.maltep.com/fr/c8-la-soudure-aluminothermique>

[21] <https://www.rocdacier.com/soudage-aluminothermique>